

50 N 13
SGN 13
LEGS de MR DAUBRÉE

ÉTUDES

L'HISTOIRE DE LA TERRE

SUR LES CHANGES DES ÉVÉNEMENTS DE SA SURFACE

Par M. DAUBRÉE

SUR L'HISTOIRE DE LA TERRE

Il est évident que l'histoire de la terre est une science nouvelle, et que l'on ne peut en faire une science exacte, car elle est fondée sur des faits qui sont en partie ignorés, et sur des théories qui sont en partie hypothétiques. L'auteur a donc cherché à établir les faits sur lesquels on peut se fonder, et à en tirer les conclusions les plus probables. Il a aussi cherché à montrer comment les événements de la surface de la terre ont changé au cours des siècles, et comment ils ont influé sur le développement de la civilisation humaine.

PARIS

CARILLOUX, LIBRAIRE

LANGLOIS ET LECLERCQ, LIBRAIRES

1844

LES ÉMIGRÉS

ET

LES ÉMIGRÉS

LES ÉMIGRÉS

LES ÉMIGRÉS

LES ÉMIGRÉS

LES ÉMIGRÉS

SGN. 19
SGN 19

ETUDES

SUR

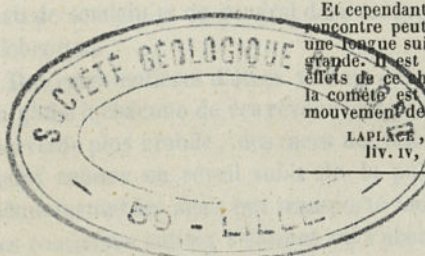
L'HISTOIRE DE LA TERRE

ET

SUR LES CAUSES DES RÉVOLUTIONS DE SA SURFACE,

Par Félix de Bouchepon,

INGÉNIEUR AU CORPS DES MINES.



Et cependant la probabilité d'une pareille rencontre peut, en s'accumulant pendant une longue suite de siècles, devenir très grande. Il est facile de se représenter les effets de ce choc sur la terre si la masse de la comète est un peu grande. L'axe et le mouvement de rotation changés...

LAPLACE, *Expos. du syst. du Monde*, liv. iv, chap. iv.

PARIS,

CARILIAN-GOEURY, LIBRAIRE,

QUAI DES AUGUSTINS, 39 et 41.

LANGLOIS ET LECLERCQ, LIBRAIRES,

RUE DE LA HARPE, 81.

—
1844.

200 18
BOU 12

ETUDES

ETUDES

2. REVISION DE LA LOI

REVISION DE LA LOI
SUR LES CLASSES DES REVOLUTIONS DE LA FRANCE

Par Jean de Goussier

LE GOUVERNEMENT FRANÇAIS
A DÉCRETÉ LA REVISION DE LA LOI
SUR LES CLASSES DES REVOLUTIONS DE LA FRANCE
EN VERTU DUQUEL
M. DE GOUSSIER
A ÉTÉ NOMMÉ COMMISSAIRE
CHARGÉ DE LA REVISION DE LA LOI
DÉCRÉTÉE PAR LE GOUVERNEMENT
LE 15 JANVIER 1844



PARIS
CARILAN-GÉREY, LIBRAIRE
RUE DES ANCIENS, 27 et 29
LANGEAIS ET RECHERCHÉ, LIBRAIRES
RUE DE LA HARPE, 21

1844

ÉTUDES

SUR L'HISTOIRE DE LA TERRE

ET SUR LES CAUSES DES RÉVOLUTIONS DE SA SURFACE.

INTRODUCTION.

Ce qui frappe particulièrement dans l'étude philosophique des systèmes qui ont cherché à embrasser les causes et les lois des révolutions de la surface terrestre, c'est l'insuffisance des hypothèses émises jusqu'aujourd'hui pour expliquer ce qu'il y a eu de soudain et de général dans ces grands faits de l'histoire géologique.

Des races entières d'êtres vivants ont disparu de la surface du globe à chacune de ces révolutions périodiques ; et, par une merveille plus grande, des races nouvelles ont apparu, témoignant comme un réveil subit de la puissance créatrice. Au même instant les mers ont transporté leur lit, ou bien plutôt des continents entiers s'élevant ou s'abaissant par rapport au niveau des eaux, ont changé subitement la face de la terre. Les couches des terrains sont infléchies, brisées et soulevées, et des chaînes des montagnes surgissent tout-à-coup du sein des plaines ou se dessinent en îles à la surface des mers. La végétation change de nature, tantôt développant avec un luxe admirable, mais avec une singulière monotonie, des formes aujourd'hui presque inconnues, tantôt ramenant par alternati-

ves les formes tropicales ou tempérées de notre époque. La nature des sédiments stratifiés par les eaux change aussi localement à chacune de ces périodes : tout annonce enfin, partout où l'observation a pu soumettre à une étude attentive les débris des anciens âges, qu'à diverses reprises une transformation brusque s'est opérée dans toutes les conditions du mouvement organique ou minéral, transformation accompagnée ou précédée de grands bouleversements dans la structure de l'écorce terrestre.

Mais cette série de révolutions soudaines dont l'imagination est d'abord frappée quand elle embrasse dans sa généralité l'histoire géologique, n'est pas le seul grand fait qui doive absorber l'attention du philosophe. Un caractère non moins important de ces grandes divisions de la vie du globe, c'est que les perturbations y ont été suivies d'un état stable ; c'est que la vie s'éteignant pour réparaître sous une autre forme, a conservé cette forme nouvelle sans modifications notables pendant l'immense durée de la période suivante : en un mot, chacune d'elles n'annonce pas autre chose qu'un changement d'équilibre dans les éléments terrestres. La constance des caractères dans toute la durée des dépôts d'un même âge et dans les débris organisés que l'on y rencontre, prouve aussi bien cette stabilité périodique, que le brusque changement des mêmes caractères prouve la subite perturbation qui a mis fin à chaque période. Tout indique que pendant chacun de ces longs intervalles de repos, les conditions physiques, climatériques, ont eu en chaque lieu un caractère propre, constant dans son ensemble.

Et pour arriver à cette conclusion importante, il n'est pas nécessaire que les recherches des géologues aient embrassé tout l'univers, des observations locales y suffisent. Mais à mesure que par la propagation des études libérales sur une plus grande partie du monde civilisé, à mesure que par d'heureuses pérégrinations le cercle de la science s'étend sur la surface du globe, la généralité de cette loi apparaît sous un plus grand jour.

L'observation comparée des contrées lointaines vient confirmer en outre ce résultat, préconçu par l'esprit de généralisa-

tion, que les formations géologiques conservent en réalité sur de vastes espaces les caractères généraux qui leur sont propres. C'était sans doute une chose déjà bien remarquable par elle-même, qu'à la simple inspection d'un fossile renfermé dans un fragment de calcaire, qui ressemble à toutes les pierres de ce genre, ou à la vue d'une feuille d'arbre dont l'impression s'est conservée dans le limon durci d'un ancien fleuve, un géologue puisse dire, dans nos contrées : cette pierre appartient à telle période, immensément reculée, de la durée du globe? Mais combien de pareilles distinctions ne sont-elles pas plus remarquables encore lorsqu'elles se continuent, et dans un ordre constant, sur de vastes étendues, comme l'Europe par exemple, ou pour mieux dire sur toute la terre; car dans l'échelle des lois de succession climatérique, l'Europe c'est le globe.

Maintenant, lorsqu'aux changements brusques et durables dont nous venons de parler viennent se lier des mouvements du sol d'une direction particulière à chaque interruption d'époque, ce rapprochement achève de dessiner les âges géologiques d'une manière complète : ils se personnifient en quelque sorte par les révolutions qui les ont séparés, et des traits reconnaissables viennent y constater ainsi le double caractère d'identité dans toute leur durée, et de soudaineté dans les cataclysmes qui ont amené leur fin.

Vainement, on chercherait à expliquer les deux ordres de faits dont je viens de parler, soit par des catastrophes brusques et de peu de durée, comme une fluctuation passagère des mers ou l'élévation d'une chaîne de montagnes, soit par une action lente et prolongée, comme le décroissement de la chaleur propre du globe. Chacune de ces hypothèses est réellement insuffisante, car l'une exclut la stabilité nécessaire à la constance des faits observés dans chaque âge, l'autre exclut la soudaineté de perturbation qui forme leur division si tranchée. Ces deux séries des faits sont donc, à mon avis, les principaux écueils des divers systèmes géologiques : des causes que ces systèmes mettent en œuvre, l'on ne saurait faire dériver par une déduction rigoureuse ni la brusque transformation des éléments organiques simultanée des grands mouvements du sol, ni la

persistance des mêmes éléments pendant chaque période de repos ; l'on ne saurait surtout en faire dériver le haut caractère de généralité auquel ces faits peuvent prétendre. Nous verrons plus tard que les lois des modifications physiques leur échappent également. Ainsi, les causes fondamentales des révolutions du globe nous semblent demeurer encore ignorées, et le champ reste ouvert aux recherches dans cette grande étude ; il reste ouvert aux inspirations nouvelles que peut amener une plus heureuse combinaison des faits connus.

Quelques esprits, il est vrai, systématiques dans le refus de tout système, et reculant devant toute action qui aurait dérangé, à une époque antérieure, l'harmonie actuellement existante, ont imaginé qu'aucune hypothèse n'était nécessaire pour rendre raison des anomalies dans la continuité de la vie du globe : ils ont cru pouvoir expliquer et les grands mouvements du sol, et la disparition et le renouvellement des êtres par les *causes actuellement agissantes*. Mais en réalité ils ne les ont pas expliqués, car on ne peut faire que ce qui est essentiellement discontinu soit le résultat d'une continuité d'action, on ne peut faire que le renouvellement complet de la vie à la surface du globe dérive des mêmes causes qui l'entretiennent actuellement. En vain ces savants ont-ils analysé avec un rare talent le développement de ce que je pourrais appeler les actions microscopiques de la géologie ; en vain ont-ils montré comment les grands dépôts et les grandes dénudations pouvaient résulter des petites causes de destruction longtemps répétées ; comment les êtres se dispersent sur de vastes surfaces en divergeant de leur centre d'habitation, ou comment ils disparaissent peu à peu d'une contrée ; en vain, ont-ils argué du lent exhaussement de quelques petites portions de nos continents... Ces faits admis, leur analyse s'arrête, et elle est précisément muette sur ce qui a produit, même localement, les interruptions brusques ou les changements d'action dans les causes continues qu'ils signalent : à plus forte raison, n'ont-ils point rendu compte des mouvements généraux qui à diverses époques ont, par une soudaine action, physiquement modifié de si grandes portions de l'enveloppe terrestre. A entendre leur narration

tranquille et paisible, il semble que sur le globe il ne se soit rien passé de général depuis son origine, et ils tiennent en complète abstraction le surgissement des vastes chaînes, le balaiement périodique des races, l'interversion subite des climats, bornant toutes les causes de perturbation aux commotions des tremblements de terre et aux soulèvements volcaniques.

Mais, sans parler ici de l'immense disproportion qui existe entre ces effets bornés et l'élévation des chaînes de montagnes, sujet qui sera traité dans la suite, le changement si tranché dans les espèces fossiles, qui signale les différentes phases géologiques, exige seul plus que des cataclysmes locaux qui auraient produit la destruction des individus : ceux-là détruits, le temps en aurait amené d'autres de même espèce, et la nature aurait reproduit les mêmes plantes par les moyens de propagation qu'elle a été si industrielle à créer. Supposons, si l'on veut, qu'une vaste irruption des mers vienne balayer et anéantir toutes les races terrestres, ou serait la raison pour que l'éléphant succédât à l'ours glacial, ou le chêne au palmier sur le même sol?

Il faut le dire, tout mouvement partiel de la surface du globe me paraît complètement insuffisant pour expliquer la brusque mutation des races : il est plus que douteux que le surgissement d'une chaîne comme les Andes ou les Alpes au travers des continents ou même des mers, puisse détruire une portion, même très petite, des espèces aquatiques : à plus forte raison, un semblable mouvement ne saurait-il établir un changement *permanent* dans les conditions d'existence sur une partie notable de la terre. Le décroissement de la chaleur terrestre ne s'applique pas mieux à un semblable résultat dans ce qu'il a de brusque et de nettement tranché. Eh quoi ! l'on saura bien admettre que les éléphants ont pu vivre sous le ciel de la Sibérie, le lion et le renne habiter presque ensemble le climat de la France et de l'Angleterre, et l'on va croire qu'une variation générale de quelque fraction de degré dans l'état thermométrique du globe sera capable d'amener un renouvellement total des espèces!

Car tel est le trait caractéristique, éminent, des grandes époques : chacune d'elle est moins remarquablement signalée par l'extinction presque complète des espèces vivantes, que par la venue d'une population nouvelle dont les traces ne s'étaient pas encore rencontrées. Évidemment, il y a là un changement non seulement subit, mais permanent, dans les conditions de l'habitation terrestre, car nous devons penser que la nature ne produit rien en vain et sans raison.

La mutation des espèces et des genres me paraît aussi caractéristique en géologie sous le point de vue des conditions d'existence, qu'elle l'est à la surface de la terre relativement aux climats et aux latitudes; et avec des caractères plus prononcés encore, car les différences qui nous sont accusées, dans l'ordre des temps, par l'observation des fossiles sont d'une essence bien plus spéciale qu'elles ne le sont dans l'ordre des distances sur la surface actuelle du globe. Je ne suis pas de ceux qui pensent que les mammifères tropicaux ont pu vivre et se reproduire dans un climat comme celui de l'Angleterre, ou que l'éléphant ait pu se nourrir sur la froide terre de Sibérie. La nature est-elle donc si pauvre ou si avare qu'elle doive faire servir ses formes à plusieurs fins? Et, ne sommes-nous pas portés à une conclusion toute contraire par la distribution du règne organique au tems actuel? Le renne ne saurait vivre en un climat moins froid que ces contrées arctiques; l'oiseau de passage traverse de vastes mers pour retrouver la chaleur et la nourriture; les animaux des tropiques, amenés dans nos climats, ne s'y reproduisent plus qu'exceptionnellement; et relativement aux espèces d'un même genre, le buffle n'est-il pas réservé aux chaudes latitudes, comme l'aurochs aux contrées boréales?

Oui, je crois que la Providence a façonné en effet le renne et l'élan pour les plaines de neige, le chamois pour les glaciers alpestres, l'ours hérissé de fourrure pour le froid des montagnes ou les glaçons du nord, le chameau pour les sables du désert, l'oiseau aux vives couleurs pour faire briller ses ailes au soleil tropical. Transportez les races caractéristiques loin de leur latitude habituelle, elles dépérissent ou dégénèrent, et elles

semblent liées à un certain état atmosphérique, dont livrées à elles-mêmes elles ne sauraient se passer. Quant aux végétaux, leur appropriation au climat est bien plus tranchée encore en raison de leur immobilité. Tout en effet dans la nature physique forme un harmonieux ensemble : le méconnaître et nier les relations nécessaires de chaque être avec le milieu qui l'entoure, ce serait fermer les yeux aux plus beaux rayons de l'intelligence divine, qui dans chaque être nous révèle son but et les soins de sa Providence.

Or maintenant, ces considérations admises, si d'une époque géologique à l'autre nous trouvons une brusque succession entre ces êtres si divers, habitants actuels de latitudes éloignées l'une de l'autre, n'est-ce point là une preuve de changements complets et permanents dans les conditions climatiques d'une même contrée ?

Je ne suis pas non plus de ceux qui pensent que la vie a été se perfectionnant sur la surface du globe depuis son origine : ce qui sort des mains de la nature en doit sortir toujours parfait, comme type d'organisation appropriée aux moyens d'existence. L'appropriation générale des êtres avec le milieu où ils sont appelés à vivre, et l'appropriation spéciale des individus aux variations du climat et des habitudes forment deux grandes classes de modifications, relatives au genre et à l'espèce, qui sont fondées sur la nature des choses : elles ont dû exister de tout tems, le principe des causes finales nous l'indique, et la croyance à la sagesse infinie de la Providence nous indique que dès l'origine elles ont dû être parfaites. Ce qui a changé dans la suite des âges, ce n'est donc certainement pas le but de la création organique ni la mesure de l'harmonie que la Providence établit sans cesse entre les divers éléments de cette création : ce qui a changé, c'est la nature des milieux et des climats. Pourquoi ? Par quels moyens ? C'est là qu'est la question. Et, tant que l'on n'aura point trouvé par quelle modification des causes physiques la nature a pu être déterminée à peupler successivement les mêmes contrées d'espèces si diverses et souvent si paradoxales par leur forme, par leurs habitudes, par leur tendance climatique... jusque là un

grand, un fondamental problème restera inexpliqué dans l'histoire de la terre et des origines.

Notre immortel Cuvier, dont le génie pour ainsi dire créateur a su le premier reconstruire ces organisations perdues de l'ancien monde, Cuvier était profondément frappé de la dissemblance si tranchée qu'il découvrait entre les populations terrestres aux divers âges, et de ces grandes destructions subitement étendues sur tant de races pour faire place périodiquement à des espèces si différentes. Il croyait à l'inaltérabilité normale des espèces, et il l'avait prouvée au moins pour l'intervalle de durée que les monuments humains peuvent embrasser ; il pensait donc que leur mutation sur de vastes étendues, ne pouvait être attribuée qu'à des catastrophes brusques, générales, d'une violence et d'une portée immense. Dans son célèbre *Discours sur les révolutions de la surface du globe*, où il exprime ces idées avec une grande force, il vient à jeter un coup-d'œil sur les divers systèmes géologiques imaginés jusqu'au commencement de ce siècle, et, par un simple exposé, il en met à nu l'insuffisance. Peut-être, il faut le dire, les analyse-t-il, au point de vue physique, avec une trop dédaigneuse ironie et ne fait-il point assez pour eux la part du temps : l'esprit de synthèse, quelles que soient ses aberrations, est aussi un moyen puissant pour les sciences lorsqu'il est aidé de l'observation, et en définitive les faits nous intéressent surtout par les causes qui les ont amenés, par les lois auxquelles ils ont obéi. Mais c'est avec une profonde raison que ce grand naturaliste accuse tous les systèmes à la fois de n'avoir tenu aucun compte de cette variation périodique dans l'organisme, qui forme le caractère si remarquable des âges géologiques. Dans l'étude des perturbations, dans la recherche de leurs causes, ce grand élément ne pouvait plus être négligé, et à nul autre qu'à Cuvier il n'appartenait mieux d'en faire ressortir l'importance.

Pour nous, peu familier avec les études spéciales du naturaliste, ce n'est point par l'observation du caractère des fossiles que nous sommes amenés aux vues nouvelles dont il est question dans ce livre : c'est par une autre voie, c'est

par l'étude des grands mouvements physiques qui ont accompagné ces révolutions dans les races vivantes. Mais, j'ai hâte de le dire, dans le nouveau système que j'expose leurs grandes et périodiques mutations trouvent des causes réelles, et ce n'est pas un médiocre avantage que de relier par un enchaînement nécessaire les révolutions organiques de la surface du globe à ses révolutions physiques.

En résumé deux ordres de faits solidaires demeurent acquis à la science par les recherches simultanées des naturalistes et des géologues : d'une part un renouvellement périodique des races et de la végétation, suivi de leur état stationnaire pendant d'immenses durées ; de l'autre de vastes mouvements du sol synchroniques de ces perturbations, puisqu'ils affectent toujours des formations géologiques entières. Nous disons que ces grandes relations n'ont pas encore été suffisamment expliquées : leur périodicité leur imprime cependant le caractère de loi, et il paraît impossible en effet que des phénomènes solidaires qui à diverses reprises ont si fortement marqué dans l'histoire du globe ne soient pas liés à quelque grande loi de la nature. Elles appellent donc une hypothèse nouvelle et une hypothèse d'une vaste portée.

Celle que nous venons proposer aura en effet ce caractère distinctif, d'assigner des causes déterminantes à tous les faits climatériques et des lois géométriques à tous les mouvements du sol ; elle ne laissera en un mot rien de vague, rien d'indéterminé dans les effets des révolutions du globe. Mais aussi elle s'écarte beaucoup de toutes les opinions actuellement admises. Deux idées principales domineront toute notre étude, et ces deux idées, par un concours singulier, sont peut-être les plus paradoxales qu'il fût possible d'introduire actuellement en géologie. L'une d'elles en effet, et la principale, attribuée à des cataclysmes accidentels, extérieurs au globe terrestre, la cause de toutes les modifications physiques dont on avait jusqu'ici placé uniquement l'origine à l'intérieur de sa masse ; l'autre modifiant le point de vue chimique habituel dans la formation des plus anciennes roches de la surface du globe, les granits, transporte à l'action de l'eau dans cette question

d'origine, la préexistence que l'on semble être convenu maintenant d'accorder à la voie ignée.

C'est la précision des résultats et l'étendue des applications qui seules peuvent justifier l'apparente hardiesse de ces principes. Une hypothèse ambitieuse imaginée pour l'explication d'un fait, ne serait que puérile; elle ne peut prendre de grandeur qu'en proportion de la masse des faits qui s'y coordonnent, ou des loix qu'elle vient à faire surgir. Or une supposition nouvelle sur les causes des révolutions du globe doit rattacher évidemment à elle tous les grands phénomènes de la géologie physique; un coup d'œil général sur ces faits semble donc ici nécessaire, afin d'en établir les véritables conditions de provenance. Entrons en effet dans cette étude, et, suivant pas à pas l'examen des principaux phénomènes géologiques en ce qu'ils ont de saillant et de caractéristique à notre point de vue, essayons d'amener ainsi les esprits à accepter sans étonnement ni défiance le développement d'une théorie si étrangère aux idées reçues, et celui des grands résultats physiques qui en dérivent et qui la constituent.

L'immense durée des âges géologiques étant une des éminentes conditions du problème des révolutions terrestres, et pour ainsi dire la plus importante garantie de probabilité pour l'hypothèse que nous affectons à sa solution, les premières vues seront consacrées à ces considérations fondamentales. Elles n'indiquent point par elles-mêmes, mais elles préparent et justifient nos principes théoriques et doivent les protéger contre l'étonnement des esprits, peu familiers encore avec le nouvel ordre des possibles qu'amène cette numération des longues durées. Analysant ensuite les principaux phénomènes physiques qui ont accidenté d'une manière générale la surface du globe, et discutant rapidement les vues théoriques qui s'y rapportent, nous essaierons de faire voir comment ils échappent tous, par des traits plus ou moins importants, aux explications que l'on en a données, et comment ils viennent concourir au contraire à l'établissement de l'hypothèse qui fait l'objet principal de notre étude.

L'analyse des résultats géométriques de cette hypothèse, les

considérations relatives à sa probabilité rationnelle, aux phénomènes géologiques et aux lois géographiques qui en dérivent, formeront ensuite la partie principale de notre travail : c'est le cœur, où toutes les artères viennent aboutir. Puis, après une digression, qui forme à elle seule une théorie distincte, sur la formation originaire des matériaux qui composent le revêtement terrestre observable, et sur les communications qui ont pu ou peuvent encore exister de l'intérieur à sa surface, considérations qui nous amènent à introduire un élément nouveau dans la formule chimique de la terre, et une hypothèse particulière aussi pour servir à l'histoire des grands faits de son origine : nous arriverons enfin à l'exposé des applications positives de notre théorie principale aux phases géologiques du globe et à l'étude géographique des modifications simultanées de sa surface; nous retrouverons alors, par la trace régulière des saillies qui l'accidentent, toute l'histoire et l'image de ses révolutions passées.



CHAPITRE PREMIER.

DES TERRAINS ET DES TEMS GÉOLOGIQUES.

Lorsque l'on vient à embrasser d'un coup-d'œil l'ensemble des roches et des terrains qui affleurent à la surface du globe, une première division vient naturellement s'offrir à l'observation, c'est celle des roches stratifiées et des roches massives. Pour la presque-unanimité des géologues, elles caractérisent respectivement l'action de l'eau et celle du feu à la surface de la terre.

Malgré les incertitudes qui peuvent exister encore sur la limite réelle de ces deux actions, nous la considérerons ici comme absolue, et renvoyant à un chapitre spécial l'exposé de quelques vues nouvelles sur l'origine et les relations des roches ignées, nous regarderons quant à présent ces roches comme purement accidentelles et comme placées en dehors de ces longues périodes de mouvement superficiel uniforme qui a produit le phénomène des strates.

Quant aux roches disposées par couches elles ont été dès les premiers tems de la géologie considérées comme un ouvrage des eaux. Ce seraient, suivant l'opinion générale, les débris de revêtements successifs par lesquels on pourrait compter les âges séculaires de l'écorce terrestre, comme celui d'un chêne antique par les couches concentriques dont son bois se compose. Il n'en est cependant point tout-à-fait ainsi et nous verrons que d'une période à l'autre la progression des dépôts en étendue a dû modifier singulièrement les lois de leur accumulation verticale, de manière à poser un obstacle à cette su-

perposition continue et universelle qui semble avoir été tacitement admise jusqu'à ces derniers tems. Sans considérer encore du reste ces lois de succession, et anticipant sur les considérations qui vont suivre, nous pouvons dire d'une manière générale : que la stratification est le produit du mouvement des fluides et aussi du mouvement organique à la surface du globe ; sa régularité, son parallélisme indique la persistance uniforme de ces mouvements, ses dérangements en indiquent le trouble.

Le caractère des dépôts que forment les eaux étant de donner aux couches successives des plans de séparation sensiblement horizontaux, c'est par les dérangements de cette horizontalité et par les discordances dans les inclinaisons des couches superposées que l'on est arrivé à la conception des bouleversements intermittents qui ont à divers intervalles interrompu dans l'écorce du globe les longues périodes de repos. Un ensemble de dépôts dont toutes les couches successives ont été soumises aux mêmes mouvements d'inflexion et conservent partout un parallélisme sensiblement exact, est ce qui a pris le nom de *terrain* ou de *formation* : en d'autres termes un terrain est le produit d'une période longue et continue de cette activité normale des éléments que l'on nomme le repos à la surface de la terre.

En étudiant une à une ces masses distinctes de sédiments périodiques, on est venu, comme nous l'avons dit, à découvrir dans chacune d'elles des traits caractéristiques, et retrouvant ces traits distinctifs, dans le même ordre de relation, en des contrées plus ou moins éloignées, la pensée de révolutions générales qui à des âges divers auraient affecté tous les dépôts minéralogiques et toutes les races, s'éleva graduellement dans la science. Cette division de la vie du globe en grandes époques semble avoir acquis dès maintenant un haut degré de certitude par la comparaison des observations les plus éloignées, et il n'y a guère plus de douteux que les causes et les vrais caractères de ces mutations.

Avant de rechercher ces causes, ce qui est l'objet réel de ce livre, et d'en indiquer l'application aux principaux traits ca-

ractéristiques des formations, il convient de poser d'abord quelques principes relativement au phénomène sédimentaire considéré en lui-même, phénomène dont la formule n'a peut-être pas été donnée encore d'une manière assez complètement précise. De sa discussion nous déduirons d'ailleurs, chemin faisant, des données importantes sur la haute antiquité du globe et sur l'immensité des temps écoulés depuis que les premiers dépôts ont été formés à sa surface : grande vue dont la considération est essentielle aux conclusions de cet ouvrage.

Les terrains sédimentaires sont composés de deux sortes de dépôts : dépôt des eaux courantes ou fluviales, et dépôt des eaux nivelées (marines ou lacustres). Le dépôt des eaux courantes est formé des débris de roches terrestres entraînés par les torrents et roulés par eux, et par les fleuves qui en dérivent, jusqu'aux points où leur vitesse s'atténue : C'est donc en général une accumulation successive de gravier ou de limon qui, consolidés par la pression et par les phénomènes ignés, donnent lieu aux grès, aux schistes et aux argiles. L'action décomposante de l'atmosphère, les éboulements des roches, la dilatation de la glace dans les montagnes ou sa fusion périodique, le frottement enfin des eaux qui lavent et qui choquent, et celui des débris qu'elles entraînent, sont les principales causes de cette destruction des roches en place.

Quant aux eaux nivelées elles détruisent comparativement peu, et leur action ne paraît s'exercer que sur les côtes qui les bordent ; les mouvements qui agitent si violemment à nos yeux les eaux de la mer, et dont les vents sont la principale cause, ne se propagent en effet qu'à une petite distance au-dessous de leur surface, et leur fond n'en éprouve l'influence que sur les plages, nullement dans la haute mer : c'est un fait que la théorie indique et que l'expérience vérifie dans nos ports, où le coup de la lame n'attaque en général les jetées que près de la surface des eaux. L'érosion de la mer peut donc être regardée comme peu considérable relativement aux masses de débris apportés par les eaux courantes ; elle disperse d'ailleurs et celles-ci concentrent : aussi est-ce surtout aux bouches des fleuves que la terre ferme empiète progressivement sur le do-

maine des eaux. Les puissantes formations schisteuses ou arénacées que nous offre l'étude géologique doivent donc être spécialement considérées comme le produit de la dénudation des continents et comme l'apport des eaux courantes au sein des mers.

Mais les eaux marines ont une sorte de dépôt qui leur est propre, caractérisé par une substance particulière dont le seul phénomène de la sédimentation tranquille a produit sur le globe des accumulations énormes : Je veux parler du carbonate de chaux, du calcaire. Quelle est l'origine de ce produit ? Et pourquoi caractérise-t-il les hautes eaux, les eaux nivelées ?

Buffon, à qui appartient l'initiative de plusieurs idées vastes et originales, est le premier, je crois, qui ait osé attribuer à l'entassement unique des coquilles ou autres débris organisés marins la formation de tous les dépôts calcaires. Une pareille opinion est si effrayante pour l'imagination, lorsque surtout elle n'est point encore familiarisée par d'autres idées du même ordre avec la longue durée de l'action sédimentaire, que depuis Buffon cette opinion a été souvent classée parmi les rêveries, et n'a été presque jamais répétée qu'avec réserve. Et cependant c'est à cette hypothèse, si fantastique en apparence, qu'il faut en revenir en dernière analyse, ou à d'autres du même genre, c'est-à-dire basées sur l'activité organique, car le recours à des causes minérales manque ici complètement. Le calcaire en effet n'est pas un dépôt chimique qui prenne son origine dans la nature propre de l'eau des mers, car la chaux n'y existe pas en dissolution¹; ce n'est pas un apport mécanique de l'eau des fleuves, car ce produit manque précisément dans tous les attérissements fluviatiles, et comment la pureté des calcaires s'accorderait-elle avec cette hypothèse ? Reste la question des émanations souterraines, des dépôts de sources salines : Mais le phénomène des sources calcaires est si res-

¹ Il ne peut être question ici de la petite quantité de carbonate de chaux tenue en suspension à la faveur de l'acide carbonique, car une fois dissoute il n'y a point de raison pour qu'elle se dépose, si ce n'est par l'intermédiaire de l'organisme.

reint, sur la surface du sol, ses produits si reconnaissables, qu'il est bien difficile de penser que dans les eaux marines il ait pu jouer un rôle important; d'autres raisons paraissent décisives à cet égard : il n'existe point de source calcaire qui ne contienne en proportion considérable des sels de soude ou de magnésie; si donc l'on admet l'apport progressif des calcaires dans les eaux marines par voie souterraine, il faut admettre aussi que la salure des mers a été progressive, ce qui est directement contraire aux observations géologiques, lesquelles nous montrent dans les plus anciennes formations des fossiles marins analogues à ceux de nos eaux salées. L'alternance des calcaires purs avec des accumulations de détritifs dépourvus de carbonate de chaux tels que les grès et les schistes prouve enfin avec évidence qu'aucune cause minérale continue, comme le sont les sources, n'a pu avoir part à leur dépôt, car on ne saurait concevoir des intermittences locales dans l'action d'une pareille cause, au milieu d'un fluide où les dissolutions peuvent se répandre dans tous les sens.

Ainsi l'entassement des calcaires au sein des eaux nivelées ne saurait avoir d'autre cause qu'un phénomène de développement parasite, non point inhérent à la dissolution marine, mais dépendant d'elle toutefois et prenant son accroissement dans son sein; en un mot il n'y a que l'activité organique qui puisse en être considérée comme l'agent.

Parmi les phénomènes de ce genre apparaît en première ligne l'accumulation des débris de coquillages marins, dont les animaux se sont assimilés par la nutrition la matière calcaire. En regard toutefois de ce premier fait nous en placerons bientôt un autre du même ordre qui n'avait point été considéré jusqu'ici et qui viendrait joindre l'action chimique à l'entassement mécanique dans la formation des couches calcaires. Mais considérons d'abord à part l'accumulation des coquilles qui semble y avoir rempli le plus grand rôle. Cette opinion puise en effet dans des observations et des découvertes toutes récentes un appui et une force inattendue. On connaissait déjà des calcaires absolument pétris de débris de coquilles, de polypiers et de coraux, tels que le calcaire à encrines de Dudley,

le Muschelkalk, le marbre à nautilus des Pyrénées, certaines portions du corail rag dans la formation jurassique, etc. Mais combien ces résultats pâlissent devant les découvertes microscopiques dont M. Ehrenberg a récemment enrichi la science géologique ! Elles élèvent l'imagination à des conceptions si merveilleuses qu'après d'elles l'accumulation des coquilles de grandeur appréciable paraît un phénomène de la plus grande simplicité. Rappellerais-je en effet la belle observation qui a fait reconnaître à ce savant que les tripolis ou roches siliceuses grenues de la formation crétacée étaient *entièrement* formées de carapaces d'infusoires microscopiques, dont chaque pouce cube de ce terrain renferme 41 milliards d'individus ? Cette roche en certaine partie de l'Allemagne forme des couches étendues, de quatorze ou quinze pieds d'épaisseur, et quelle imagination ne reculerait devant la supputation en temps et en nombres que suggère un pareil entassement d'infiniment petits ? Des observations du même genre portées sur des portions du calcaire crétacé lui-même ont amené à des résultats analogues c'est-à-dire à distinguer au microscope un nombre infini de débris organisés, par les espèces desquels M. Ehrenberg pense même trouver un moyen de distinguer l'âge des calcaires. Des observations intéressantes faites aux Bermudes ¹ et dans les îles de Corail de la mer du sud indiquent aussi la formation de calcaires pulvérulents analogues à la craie par la désorganisation spontanée des branches de coraux et par d'autres moyens d'une aussi faible portée. Tout concourt enfin à démontrer que l'organisation animale a eu la plus grande part dans la production des calcaires, car les lois de l'induction nous commandent de généraliser les faits de ce genre : ne seraient-ils observés qu'en peu de points, ils doivent avoir eu lieu partout et toujours, cette conclusion est étroitement liée à la constance des lois organiques dans la nature. Néanmoins le tribut détritique de l'organisation animale ne fournissant nullement l'origine de la compacité des calcaires, il y a lieu, comme nous le verrons, de rechercher encore une autre cause,

¹ Lyell, éléments de géologie, p. 374.

une cause chimique, pour une portion intégrante de leur dépôt.

Quoiqu'il en soit, si nous cherchons à porter nos regards sur la grandeur du temps que donnerait aux périodes géologiques le dépôt des calcaires par la seule accumulation des coquilles, l'imagination semble se refuser à embrasser un pareil calcul ; mais cette appréciation est loin d'être isolée et bien d'autres faits viennent concourir à la haute évaluation des durées géologiques. Essayons donc quelques détails propres à donner une idée approximative du temps de l'entassement coquiller. La première considération relative à ce sujet est celle de l'accroissement individuel des corps organisés marins : cette étude est peu avancée encore, cependant la lenteur du développement des coquilles n'est point douteuse. Et d'abord la rapidité de l'accroissement des bancs de polypiers, qui constituent à eux seuls une certaine portion des calcaires, paraît avoir été singulièrement exagérée par quelques voyageurs ; des études faites sur les bords de la mer Rouge par M. Ehrenberg donnent au contraire à ce phénomène une durée extrêmement lente : les bancs de polypiers n'y ont pas plus de 3 mètres et comme ils ne s'accroissent que par le haut il y a tout lieu de penser que c'est là tout leur développement depuis l'origine de cette mer : On a porté avec quelque probabilité leur exhaussement à 1 ou 1 $\frac{1}{2}$ millimètres par année. Ceux de la mer du sud ne se sont accrus jusqu'ici de plus de 10 mètres, encore n'est-ce point parfaitement certain. ¹

Si nous passons aux coquilles, leur longévité individuelle quoique peu connue encore semble toutefois attestée par le nombre des couches ou des cloisons que les mollusques sécrètent et que l'on a lieu de croire annuelles ; il y a des fossiles (nautilus, orthocères) qui présentent ainsi 30 ou 40 concamérations intérieures. La grandeur des coquilles paraît être aussi en raison directe de leur durée, et l'on connaît les dimensions

¹ La plupart des nombres cités dans ce chapitre comme résultats d'observation ont été donnés par M. Elie de Beaumont dans son savant cours du Collège de France.

extraordinaires de coquilles cloisonnées que l'on rencontre quelquefois dans les terrains. Cette longévité et le peu d'épaisseur de beaucoup de coquilles marines concourent donc à faire de leur accumulation un des phénomènes les plus lents que l'on puisse imaginer, si toutefois ces deux causes de durée ne sont compensées en quelque sorte par le nombre des coquilles vivantes. Ce nombre est considérable à la vérité, mais il s'en faut bien que l'ensemble des testacées vivants puisse couvrir toute la portion du fond de la mer sur laquelle se forment les couches calcaires, et c'est un principe d'ailleurs assez reconnu que le foisonnement des espèces est généralement en raison inverse de leur grandeur et de leur longévité. Enfin, quant aux mollusques pélagiques dont les dépouilles amenées de la haute mer viennent échouer sur les plages, nous pouvons voir combien la proportion en est faible dans les sables de nos côtes. En tenant compte de toutes ces circonstances je pense que l'on sera au-dessus de la vérité si l'on suppose que dans l'intervalle de 100 ans, qui renferme peut-être quatre ou cinq générations complètes des grosses coquilles, tout le fond de mer où elles vivent peut-être couvert d'une épaisseur moyenne de 5 centimètres de calcaire compact : Dans cette hypothèse il aurait fallu 2000 ans pour former une couche d'un mètre et pour 500^m qui ne sont qu'une épaisseur ordinaire dans les calcaires d'une formation unique, il n'aurait pas fallu moins de deux millions d'années... Tel serait dans cette supposition le temps d'une simple période géologique ; Et comme on ne peut méconnaître au moins 12 formations comparables entr'elles pour la puissance, cela porterait à plus de vingt millions d'années la période de temps qu'a parcourue le globe depuis qu'il est habitable par les coquilles.

Je ne prétends point élever ce chiffre énorme au rang d'une vérité incontestable, et je n'ai voulu que parler à l'imagination par une évaluation prise dans les limites du possible ; le chiffre exact de la durée du globe habité peut s'en éloigner encore beaucoup sans cesser d'être d'une conception paradoxale. L'entassement coquiller n'est point d'ailleurs la seule origine des calcaires, ainsi que nous l'avons annoncé : nous pensons qu'il

en existe une autre cause, fondée aussi sur le mouvement de l'organisme, mais de l'organisme végétal, et qui se résume non plus par une accumulation mécanique, mais par un dépôt chimique dont le rôle est de cimenter : cause comparable du reste, et au-delà, par la lenteur de ses produits avec celle que nous venons d'analyser, et qui ne saurait diminuer jusqu'à moitié le résultat conditionnel auquel nous sommes parvenus.

Cette sorte d'action chimique, à laquelle on n'avait pas encore songé, ne peut être considérée ni comme une superfétation ni comme une pure hypothèse : sa conception est rendue nécessaire, en résultat par l'apparence même des calcaires, dont la dureté et la compacité ne sauraient s'expliquer par l'entassement seul des coquilles ¹, en principe par la considération des réactions chimiques que nécessite le développement des végétaux marins. Son étude me paraît d'ailleurs mériter quelque intérêt en ce qu'elle semble se rapporter à

¹ En dehors même de la compacité des calcaires, des raisons tirées de leur structure semblent nécessiter un appel à l'action chimique. Examinons par exemple le marbre schisteux des Pyrénées, composé d'une série de nodules d'un calcaire coloré, enchevêtrés dans des lamelles minces de schiste argileux qui se contournent autour d'eux : chacun de ces noyaux représente, ainsi que M. Dufrénoy l'a le premier signalé, un nautilus ou un orthocère, et l'on voit en effet sur les faces usées de la roche, sur celles où l'injure du temps a lentement fait tomber toutes les lames du schiste, on voit par intervalle apparaître l'empreinte nette de ces fossiles plus ou moins déformés par compression. Mais l'on sait que les animaux de l'espèce des nautilus ont un têt mince cloisonné, renfermant seulement une partie charnue : qui a donc rempli ainsi de calcaire pur le vide de cette coquille après qu'elle a été enveloppée dans le limon qui l'enclave ? Ce n'est certainement pas l'animal lui-même qui en a fourni les matériaux, et il faut que ce remplissage ait eu lieu par une action étrangère, par l'apport prolongé de molécules calcaires en dissolution dans l'eau. On peut en dire autant de tous les fossiles, lorsque leur intérieur est complètement rempli de calcaire compact, mais j'ai cité le marbre à nautilus, parce que l'isolement des nodules au milieu du schiste rend le phénomène plus frappant. Il faut donc que l'on imagine une cause de dissolution et de précipitation pour l'élément calcaire qui a rempli le vide des coquilles, une cause chimique enfin. Or l'apport des sources minérales étant exclus il faudra bien en revenir à l'influence organique comme cause productrice.

une de ces lois d'équilibre providentiel dont l'organisme est à la fois l'instrument et le but.

Les végétaux marins présentent en effet un phénomène remarquable, qui paraît être jusqu'à présent hors de la portée des investigations chimiques et ressortir des lois encore occultes qui régissent la matière organisée. Ces végétaux s'assimilent en effet le chlorure de sodium de l'eau des mers et le transforment en oxalate de soude, dont la combustion extrait pour notre usage la soude caustique ou carbonatée. Comment dans cette transformation arrive-t-il que l'acide hydrochlorique se trouve exclu, par rapport à la soude, par un acide plus faible? Je ne sais; cependant le fait existe, et cette réaction implique suivant toute évidence le transport de l'acide hydrochlorique sur d'autres bases, qui ne peuvent être que la chaux ou la magnésie. Que les plantes marines aient la propriété de dissoudre la chaux des terrains à l'état de sel végétal, de transformer ce sel en chlorure par double décomposition et de l'éliminer ensuite partiellement; ou bien que le carbonate de chaux même, dissous à la faveur de l'acide carbonique, réagisse dans la plante sur le chlorure de sodium... C'est une question qu'il ne m'est point donné d'aborder: un fait existe et cela suffit à mon point de vue, c'est qu'il y a eu transport définitif de l'acide du sel marin sur d'autres bases, qui ne peuvent être, je le répète, que la chaux ou la magnésie.

D'autre part on peut admettre que la décomposition végétale doit amener l'oxalate alcalin des plantes flétries à l'état de carbonate: ainsi vont se trouver à la fois dans les eaux du carbonate de soude et du chlorure de calcium, d'où suivra un dépôt chimique de carbonate de chaux et la régénération du chlorure de sodium, du sel marin. Par cette série de réactions les éléments sont seulement déplacés: le sel marin est soustrait et rendu à l'eau des mers, l'acide carbonique enlevé et rendu à l'atmosphère, le carbonate de chaux soustrait aux roches et précipité chimiquement au sein des eaux. Cette régénérescence des produits dans le mouvement de la végétation marine serait quelque chose d'analogue à ce qui se passe

dans les relations de la végétation terrestre avec l'organisation animale. Les naturalistes admirent l'harmonie modératrice que la Providence a établie entre les fonctions respiratoires des végétaux et celles des animaux terrestres, les premiers étant destinés à rendre à l'atmosphère l'oxygène que les seconds lui ont soustrait et transformé en acide carbonique : relativement à la salure des mers les lois chimiques qui président au développement des végétaux marins semblent reproduire un cycle analogue, mais dont ils sont les seuls organes. Le maintien de la salure des mers dans une essence et une proportion constante doit être en effet une condition aussi essentielle à la longévité des races marines et à la conservation de l'harmonie existante au sein de l'élément humide, que le maintien des proportions atmosphériques pour les races terrestres. Or la transformation continue d'une petite quantité de sel marin en carbonate de soude, répétée pendant de longues périodes, donnerait à l'eau des mers une propriété caustique incompatible sans doute avec l'existence des races marines actuelles, tandis que la présence du chlore dans d'autres composés leur serait peut-être également nuisible : le déplacement de l'élément calcaire tel que nous l'avons indiqué fait rentrer le travail de l'organisme marin dans le cercle de l'harmonie générale, et demeure comme une garantie de plus à la longévité de l'état actuel de la terre.

La cause de sédimentation que nous venons de signaler ne semble pas de nature à amoindrir beaucoup l'idée de la longueur des temps de l'entassement des calcaires : cependant toute microscopique qu'elle paraisse à un moment donné, elle doit avoir eu par l'accumulation des temps une assez grande influence sur leur dépôt. Le développement des végétaux marins est en effet jusqu'à un certain point comparable à celui des coquilles, et il peut arriver des cas où le premier soit dominant, comme par exemple autour des lacs salés, lorsque la concentration des sels y dépasse une certaine limite. ¹

¹ Cette dernière circonstance que je signale à dessein, n'est pas d'une médiocre importance géologique, car elle explique immédiatement un assez

Les végétaux marins extrayant en partie le calcaire du fond et du littoral sur lesquels ils s'accroissent, leur rôle pourrait bien être plus important encore que je ne l'ai indiqué, puisque, comme je pense l'avoir démontré, l'origine des calcaires marins n'est ni souterraine ni minérale. Je ne sais si l'on a jamais cherché à se rendre raison du renouvellement continu de l'élément calcaire destiné à la sécrétion des coquilles, tandis que celles-ci, dès qu'elles sont destituées de leurs parties vivantes, se stratifient au fond des eaux et ne sont point résorbées pour servir à la nutrition de coquilles nouvelles. A mesure que par ce dépôt elles sont ainsi perdues pour la vie organique, quel phénomène vient renouveler l'élément calcaire au sein des eaux pour l'alimentation de la génération qui s'accroît? Et la végétation n'y aurait-elle point quelque part? Je ne sais, je m'abstiens, mais j'ai cru qu'il pouvait être bon d'appeler l'attention des savants sur cet intéressant sujet.

L'eau incessamment chargée d'acide carbonique par la respiration des poissons et le contact de l'atmosphère, doit toujours retenir, il est vrai, une petite quantité de carbonate de chaux en dissolution, et peut-être est-ce là l'origine principale des calcaires sécrétés; mais ce qui est essentiel à remarquer c'est que le dépôt incessant des coquilles amenant un épuisement de la matière, il faut que les rivages de la mer fournissent à cette absorption continue. Ainsi, selon nous,

difficile problème, celui des dolomies (carbonate double de chaux et de magnésie), qui forment dans certains terrains des couches puissantes et étendues. Lorsqu'en effet par la concentration des eaux salées dans un récipient sans issue la masse des sels magnésiens et des sulfates alcalins associés à la dissolution marine s'est élevée à une certaine proportion, le chlorure de calcium éliminé des plantes va précipiter peu à peu sa chaux à l'état de sulfate, à cause de la concentration même; et alors le carbonate de soude successivement formé par la décomposition de ces végétaux très abondants autour de pareils lacs, ce carbonate de soude, dis-je, trouvant la magnésie dominante dans la dissolution, la précipitera conjointement avec la chaux et produira ainsi la dolomie, ce composé en proportions atomiques qui ne saurait guère quoique l'on ait dit, admettre une autre formation que celle de la voie humide. Nous reviendrons sur ces questions.

l'entassement du calcaire au fond des eaux ne serait qu'un phénomène de déplacement, la somme en resterait toujours sensiblement la même dans l'écorce solide du globe terrestre, et mettant à part l'apport peu considérable des sources, cette roche ne gagnerait en épaisseur, sur le fond de la mer, que ce qu'elle perdrait en étendue horizontale sur ses bords. Nous exposerons en effet par la suite de nouvelles vues qui permettent de concevoir comment la grande masse des éléments calcaireux est un produit de première origine et non un apport progressif.

On se tromperait donc sans doute si l'on jugeait de la masse totale des calcaires par ceux qui sont accumulés sur nos continents, car elle doit être beaucoup moindre sous le fond des mers; en voici la raison. Il est reconnu que les coquilles ne sauraient vivre à plus de 100 toises de profondeur sous les eaux de la mer, soit par manque d'air et de lumière, soit à cause de la grande pression : leur habitation doit donc principalement se faire le long des côtes, où la profondeur est généralement la moindre; de plus dans le fond de la haute mer le mouvement de l'eau étant très peu considérable les débris ne sauraient y être entraînés fort loin, et enfin les coquilles des testacés nageurs, plus légères que l'eau à cause de leurs cavités aériennes, sont incessamment amenés vers les rivages. Le dépôt des coquilles a donc dû former une série de bordures relativement étroites le long des continents et autour des îles, selon leur délimitation à chacune des périodes géologiques. Ce fait, outre son intérêt propre, en donne à concevoir un autre qui nous est accusé par l'observation, à savoir que la somme des calcaires superposés n'atteint jamais qu'une puissance limitée dans les terrains soulevés le plus récemment hors des eaux, et non pas l'énorme épaisseur qu'elle devrait avoir si les dépôts successifs se formaient indifféremment sur tout le fond de l'Océan : ces deux faits sont solidaires et se prêtent mutuellement appui. En effet les soulèvements successifs qui ont érigé peu à peu nos continents ayant eu pour résultat de n'amener que progressivement de nouvelles côtes à l'exhausse-

ment voulu pour l'habitation des coquilles, il s'en suit que dans chaque formation les calcaires ont dû se déposer *en forme de biseau* sur ceux de l'époque précédente, de manière à donner une épaisseur générale qui ne dépasse pas certaines limites. Les mers n'ont pas, je crois, transporté leur lit d'un continent à l'autre comme quelques savants, et Cuvier en particulier, en ont indiqué l'hypothèse, et quoique les retours de la mer sur des formations lacustres ne soient point rares en géologie, ces phénomènes n'ont qu'une étendue et une importance limitées ; j'espère montrer dans le courant de nos développements théoriques comment l'extension des continents a dû être au contraire progressive, sans un très considérable déplacement des mers relativement à la surface entière du globe ; il s'ensuivrait, d'après ce que je viens de dire, que les sédiments calcaires doivent se trouver concentrés sur les continents, le fond de la haute mer restant peu différent de ce qu'il était à l'origine des dépôts. L'importance de ce principe est grande par elle-même, mais la suite nous en fournira d'intéressantes applications. En voici une conséquence immédiate.

Par le seul phénomène de la sédimentation, et indépendamment de tout soulèvement, le fond de la mer a dû s'élever le long des côtes pendant chaque période géologique, bien qu'avec une extrême lenteur. Or d'après l'étendue bornée de la zone où se forme le dépôt calcaire, il ne peut résulter de ce surexhaussement une altération sensible dans le niveau absolu des mers ; ce niveau restant donc constant et le fond s'exhaussant peu à peu, la profondeur diminuera le long des côtes : il devra donc en résulter à la longue des conditions diverses pour les animaux marins qui vivent ou qui sont apportés sur ces plages. Il y a lieu de penser en effet que ce qui peut influer le plus, dans un même lieu, sur la nature des mollusques sédentaires, c'est la pression de l'eau qu'ils sont appelés à supporter : les uns étant constitués pour habiter les mers profondes, les autres devant stationner près du niveau des eaux. Quant aux mollusques nageurs ou pélagiques la profondeur des eaux doit avoir aussi une assez

grande influence sur l'entassement de leurs dépouilles : la plupart en effet munis de cloisons aériennes, et n'ayant besoin d'effort que pour s'enfoncer, doivent après leur mort être charriés par les vents jusqu'aux plages de la côte; mais d'autres, munis d'une ossature plus pesante, comme ont dû être les bélemnites, échouent probablement peu après la mort de l'animal, dès que l'enveloppe charnue est décomposée. La pesanteur doit donc former dans le dépôt de ces mollusques pélagiques une sorte de triage, de lavage, si l'on peut ainsi parler, inverse de ce qui se passe dans le dépôt des alluvions fluviales, où les fragments plus pesants sont déposés au contraire le long des côtes. De toutes ces circonstances il devra résulter des variations considérables dans le dépôt des fossiles sur un fond de mer à mesure qu'il s'exhaussera : j'ai lieu de croire que telle est la principale cause des mutations d'espèces que l'on observe depuis la base jusqu'au niveau supérieur des formations, bien plutôt que les destructions partielles qui semblent être admises dans les théories ordinaires. Si je prends le terrain jurassique pour exemple, n'est-il pas remarquable que les gryphées y prennent un têt de plus en plus voûté à mesure que l'on descend vers la base de la formation : dans le Lias la Gryphée arquée, plus haut la Gryphée Cymbium un peu plus ouverte, et dans l'étage supérieur enfin la Gryphœa dilatata, dont le têt est considérablement aplati. Ces formes ne seraient-elles pas en rapport avec la pression que ces fossiles ont eue à supporter? Si les étages les plus élevés de la même formation sont caractérisés par l'abondance des polypiers et des coraux, serait-ce point que la profondeur s'était amoindrie de manière à être convenable à l'existence et au développement de ces rayonnés? Enfin la complication plus ou moins grande des figures que la symétrie des muscles d'attache empreint sur le moule des ammonites ne serait-elle pas aussi en rapport avec la profondeur plus ou moins grande où ces mollusques pouvaient descendre en se contractant? Je livre ces considérations à des zoologistes plus exercés.

Après tout ce que nous avons dit sur l'importance des fossiles

dans l'accumulation des calcaires, il est bien inutile de relever cette erreur autrefois vulgaire qui confondait la fossilisation avec la destruction des races, phénomènes qui n'ont aucun rapport; l'entassement des fossiles correspond à la durée des races et non à leur destruction, et il en est de même des animaux terrestres, que l'on rencontre pour la plupart dans des couches alluviennes : si un cataclysme venait à faire périr tous les animaux terrestres d'une contrée, leurs débris non recouverts seraient détruits à la longue par les agents atmosphériques; c'est l'enfouissement seul qui les conserve. Les couches alluviennes n'indiquent donc, avec les fossiles qu'elles renferment, qu'une marche régulière et équilibrée des agents de la nature, ainsi que nous allons l'indiquer.

J'arrive en effet à la question des eaux courantes : mais l'analyse complète de leurs phénomènes de dégradation, d'entraînement et de dépôt appartient aux traités de géologie, je ne veux examiner ici qu'un point de vue particulier de cette question des alluvions, celui qui est relatif au temps; il me conduit toutefois à analyser aussi une circonstance importante et encore controversée des dépôts fluviaux, je veux parler de leur développement en étendue : cette circonstance est relative au temps aussi bien qu'à l'espace.

On a lieu d'être frappé de la vaste étendue de certains dépôts des eaux douces : le terrain des Wealds d'Angleterre, s'il se prolonge en effet souterrainement du comté de Sussex jusqu'au pays de Bray aurait quatre-vingts lieues du nord-ouest au sud-est sur soixante-douze lieues de l'est à l'ouest; en France, le bassin d'eau douce de la Gascogne et du Languedoc s'étend visiblement d'une mer à l'autre dans une longueur de cent lieues sur une largeur de vingt-cinq à cinquante; divers autres dépôts géologiques arénacés, tel que ceux des grès houillers, présentent des étendues comparables, et d'ailleurs tous les schistes à fossiles marins dont l'étendue est immense, semblent, comme nous l'avons dit, ne pouvoir être considérés autrement que comme l'apport limoneux des fleuves dans la pleine mer. Et cependant la limite

des dépôts d'atterrissements sur nos côtes ne s'étend guère actuellement à plus de trente ou quarante lieues. Quelle a donc été la condition des anciens dépôts alluviens ? Que ces alluvions immenses aient été formées dans de grands lacs, dans des golfes ou sur des rivages de la mer, il n'en reste pas moins de difficulté à concevoir non seulement la période de temps qui a pu entasser cette masse de débris, mais aussi l'étonnante distance où des fragments de grosseur notable paraissent avoir été transportés : comment concevra-t-on aussi leur enchevêtrement avec des couches calcaires et l'alternance bien connue des alluvions à coquilles fluviatiles avec des calcaires marins ? Est-ce à dire que ces fleuves, quelque considérables qu'on les suppose, aient occupé toute la largeur des débouchés ? Est-ce à dire que leurs eaux successivement hautes et basses auraient à diverses reprises empiété sur le domaine des mers ou se seraient laissées envahir par elles ? Il n'en est rien, et pour se convaincre de l'étrange erreur où tomberait cette opinion il suffira de dire que l'épaisseur des couches enchevêtrées implique souvent une durée de plusieurs milliers d'années entre chaque alternance du sédiment marin au sédiment des eaux courantes ; il en résulterait des états fixes d'intumescence ou d'affaissement alternatif dans les eaux fluviatiles pendant des périodes énormes, ce qui ne saurait s'appuyer sur aucune raison climatérique connue. D'autre part la constance du parallélisme général des couches de chaque terrain me paraît mettre un obstacle aussi sérieux à ces oscillations du sol dont on a fait dans ces derniers temps, comme un moyen universel. C'est à tort et inutilement, selon moi, que l'on a mis en jeu tous ces mouvements insolites : il n'y a ici qu'un phénomène très ordinaire dans le régime des fleuves, si l'on y tient compte du temps : je veux dire le déplacement successif et alternatif de leur lit.

Sous ce point de vue l'entassement des strates alluviennes devient presque uniquement une question de durée, et c'est à quoi se résument, en effet, toutes les variétés d'action du phénomène sédimentaire ; mais ici toutefois, bien plus que dans la formation des calcaires, la puissance des dépôts, et même leur variation, est une fonction de l'espace.

Voici en effet ce qui doit se produire dans les alluvions fluviales : à l'embouchure des fleuves la vitesse des eaux s'amointrissant subitement, l'accumulation des débris qu'elles entraînent doit être comparativement rapide ; mais comme ces fleuves prolongent leurs cours assez loin dans la mer, le dépôt s'y étendra en décroissant, cette extension n'ayant principalement lieu que dans un sens, celui du cours du fleuve, au moins lorsque la mer est profonde ; en même temps le mouvement de la mer elle-même tend à niveler la surface de ce dépôt, cependant au débouché même il gagnera peu à peu sur elle et s'élèvera enfin au-dessus de son niveau. Bien que le fleuve dépose aussi sur le fond de son lit et qu'il l'élève insensiblement, cet exhaussement est moins rapide qu'à l'embouchure, et il arrivera une certaine limite où, en ce dernier point, les atterrissements ne pourront plus s'élever, sans quoi le fleuve perdrait sa pente : il faudra donc alors ou qu'il creuse ses propres alluvions, ou que, déplaçant son cours, il tourne cet obstacle artificiel qu'il s'est créé lui-même. Le dépôt limoneux qu'il forme dans la mer, solidaire du mouvement de ses eaux, se déplacera en même temps, et c'est ainsi que les dépôts alluviaux s'avancent progressivement dans la mer ou vont parcourir les divers points d'une côte, revenant plus tard aux mêmes lieux pour les quitter de nouveau. Telle est, je pense, l'origine du phénomène de la division en couches, qui indique une interruption, une alternative dans la cause continue de la sédimentation : cette interruption périodique ne dérive, selon nous, que du changement dans le cours des eaux, et si en un point donné une puissante couche arénacée, produit d'une longue période d'ensablement est tout à coup surmontée par un dépôt de schiste ou limon pur, quel moyen aurait-on d'expliquer cette transition si ce n'est de supposer que l'embouchure du fleuve s'est tout à coup éloignée du lieu où elle accumulait ses sables et que dans cette nouvelle position les eaux n'ont pu y apporter que le limon le plus fin ? La même raison expliquera encore l'enchevêtrement des calcaires avec les couches d'atterrissement : là en effet où le fleuve ne

dépose plus parce que son lit a été détourné, et où l'éloignement ne permet plus le transport des limons, la mer va reprendre son action, entasser les débris des coquilles, les cimenter; plus tard revenant vers son ancien cours le fleuve recouvrira ces bancs calcaires de nouvelles alluvions. C'est ainsi que sans perturbations, sans mouvements insolites ou du sol ou des eaux, et par le simple régime habituel des eaux courantes, se trouvent intercallées aux alluvions ces puissantes couches de calcaire marin qui contrôlent par la longue période de leur accumulation, produit du repos, la durée de l'accumulation des limons et des sables, produit du mouvement. ¹

Ce phénomène de déplacement s'observe même dans l'intervalle des durées qui nous sont appréciables: ainsi sous nos yeux se forment les deltas. Le Gange, si volumineux et par ses eaux et par ses alluvions a plusieurs fois changé son cours, car on en a retrouvé et tracé sur des cartes les anciens sillons; on a vu le Mississipi témoigner aussi de ses déplacements par l'alternance de ses limons bleus avec ceux d'une rivière ocreuse; c'est en déplaçant ses eaux que le Nil a formé son delta; ainsi le Rhin, le Rhône se divisent et se dévient à leur embouchure; le Pô enfin, ce grand déversoir méridional des Alpes, passait vers le douzième siècle, suivant les recherches de M. de Prony, au sud de l'emplacement actuel de Ferrare, et depuis lors il aurait sans doute changé de nouveau son cours, s'il n'était maintenu sans cesse dans son exhaussement par des travaux d'art qui deviendront enfin impuissants à le contenir. Ces déplacements, qui sont pour nous d'une lenteur sé-

¹ C'est sans doute ce dépôt des calcaires simultanément aux entassements limoneux qui contribue à maintenir au fond de la mer l'horizontalité dans l'ensemble des couches d'un même terrain. Nous ne prétendons du reste appliquer ce point de vue théorique qu'à l'enchevêtrement des calcaires d'une même formation; le passage du dépôt alluvien et quelquefois des dépôts lacustres à ceux de la haute mer dans les changements d'époque est un phénomène d'un tout autre ordre et qui, indiquant pour nous un mouvement de la mer elle-même, nécessitera une idée théorique toute spéciale.

culaire, sont seuls capables, mais avec l'immense durée des tems, de nous faire concevoir l'étendue en tous sens des vastes dépôts alluviens des âges géologiques et les croisements si multipliés ainsi que les variations infinies de leurs couches; ¹ et ce phénomène s'ajoute à la lenteur de l'accumulation verticale pour caractériser l'immensité des durées.

Les géologues qui ont voulu donner une idée de la rapidité avec laquelle les fleuves apportent leur limon à la mer, ont cité des villes autrefois maritimes qui se sont reculées depuis les temps historiques à une certaine distance dans les terres : mais ce résultat peut servir lui-même à exalter, en la préci-

¹ L'idée théorique qui plaçait invariablement les grès à la base des formations et dans ceux-ci les plus gros fragments à la partie inférieure, comme cela pourrait avoir lieu pour le dépôt formé au fond d'un crible, cette idée est absolument incompatible avec la grandeur des durées et les modes de dépôt que nous avons admis; elle a conduit à quelques erreurs de classements.

L'abondance des grès dans une formation n'indique point non plus, comme on l'a dit quelquefois, une agitation des eaux marines, puis qu'ils sont généralement le produit des eaux courantes, et il n'est plus admissible d'avancer que la formation houillère par exemple a été déposée dans une mer turbulente à cause de la prédominance des grès. Toutefois cette prédominance lorsqu'elle s'observe avec constance sur des vastes étendues, doit rester comme un indice de grand développement des cours d'eau à l'époque où on l'observe, et aussi quelquefois d'une plus grande extension des terres émergées.

Sous le même point de vue et en considérant les grès et schistes comme une mesure de l'énergie torrentielle, il est une autre circonstance dont l'intérêt théorique n'est pas à négliger, c'est celle de la dimension des fragments roulés. Le charriage habituel des galets de forte dimension à part ceux qui sont formés par la mer même sur ses bords, ne peut convenir qu'à des rivières torrentielles, c'est-à-dire voisines des montagnes et même le plus souvent alimentées par la fonte des neiges. Si donc une formation géologique présente localement une accumulation puissante de galets d'une grosseur considérable, charriés de loin, on ne peut méconnaître pour ces localités le voisinage d'un relief montagneux; ou si les montagnes n'ont pu y être encore d'une élévation suffisante, ce n'est qu'à un abaissement climatique capable de donner des neiges ou des glaces que l'on peut attribuer pendant cette période l'intermittence torrentielle des eaux. Nous appliquerons plus tard ce double point de vue.

sant, la conception des durées sédimentaires. Si dans un millier d'années un fleuve comme le Nil a pu faire avancer d'une demi-lieue une petite portion de son rivage sur un fond déjà très exhaussé, quelle série de dizaines de siècles n'aura-t-il point fallu pour entasser sur trois mille pieds de hauteur chacune des formations alluviennes si étendues que nous présente l'étude des terrains ?

Cette lente progression des atterrissements à l'embouchure des fleuves pèse elle-même d'un certain poids dans la balance des durées : non-seulement elle soustrait incessamment de nouveaux espaces à l'entassement des dépôts et établit ainsi une intermittence locale dans l'action sédimentaire, mais elle prouve encore s'il en était besoin, qu'on ne saurait prendre pour mesure de l'exhaussement général des dépôts fluviatiles celui qui se forme à l'embouchure : les dépôts plus lointains, c'est-à-dire purement limoneux, doivent être incomparablement moins puissants dans un temps donné. D'après toutes ces considérations cherchons à poser quelques chiffres à travers ces immensités si incertaines.

Quelques observations exactes ont été faites sur l'exhaussement du lit des fleuves et sur l'élévation des atterrissements à leur embouchure, elles suffisent à donner une idée approximative du rapport de la puissance des terrains à la durée de leur entassement. D'après les mesures de M. Girard le lit du Nil ne s'élèverait que de 1^m, 26 en mille ans, c'est-à-dire seulement un peu plus d'un millimètre année moyenne; la petitesse extrême de ce nombre fourni par un si grand fleuve est remarquable. Sans doute au point précis de l'embouchure, où la vitesse diminue plus brusquement, l'exhaussement des dépôts fluviatiles doit être plus rapide, et d'autant plus qu'elle est plus rapprochée des montagnes; ainsi le Rhône et surtout le Pô forment à leurs bouches un ensablement que l'on peut évaluer à 6 ou 8 centimètres d'exhaussement par année, mais il y a tout lieu de croire que c'est un phénomène tout-à-fait local, qu'un peu plus avant dans la mer la puissance d'accumulation diminue rapidement, et que le dépôt purement limoneux des grandsfleuves ne s'accroît pas avec une vitesse plus grande

que celui du Nil dans ses inondations. En la supposant double, c'est-à-dire d'environ une ligne par an, et en donnant aux fleuves d'autrefois la même puissance d'entraînement qu'aujourd'hui, un de nos plus éminents géologues ¹ a calculé que l'ensemble des dépôts alluviens indiquerait par leur épaisseur le chiffre de 7.600.000 ans pour la durée de la terre depuis que les premiers sédiments fossilifères se sont formés à sa surface.

En partant des mêmes bases, je pense que l'on arriverait peut-être facilement à un chiffre supérieur, car il est peu de formations qui ne présentent dans quelque localité un entassement schisteux ou arénacé de 2000^m d'épaisseur, comme le Lias dans les Alpes et au Caucase, le terrain de transition sur les bords du Rhin, le vieux grès rouge en Angleterre, le grès crétacé en Morée, la Mollasse en Suisse, etc. Or on peut regarder le dépôt le plus long de chaque époque comme l'expression de sa durée ² : En admettant donc dans tout l'ensemble une hauteur d'entassement annuel double de celui du Nil, on arriverait encore, pour les douze ou quatorze formations, au chiffre de douze à quatorze millions d'années.

Cependant pour amoindrir cette immensité des âges, le savant que nous venons de citer énonçait l'opinion que les fleuves aux anciennes époques pouvaient rouler des eaux plus considérables qu'aujourd'hui, en raison de la température plus élevée, et qu'ils possédaient par conséquent une puissance d'entraînement plus grande; il se croyait ainsi fondé à réduire au sixième la valeur si considérable qu'il avait obtenue... Mais je ne sais en réalité sur quelles raisons plausibles une semblable concession serait appuyée : les débris organiques conservés dans les anciens dépôts ne nous accusent pas, aux lieux du

¹ M. Elie de Beaumont, cours du Collège de France.

² Quant aux autres dépôts moins puissants ils sont ordinairement associés à des formations calcaires dont on ne saurait les isoler dans la question de durée, d'après ce que nous avons dit sur les alternances; ou bien on peut supposer que ce sont des dépôts de comblement plus rapidement isolés par leur exhaussement au-dessus du niveau des eaux.

moins où ils se retrouvent, une chaleur climatérique plus grande que celle des bords du Nil, du Gange ou de l'Amazone, et l'on ne voit pas pourquoi la puissance torrentielle des eaux y aurait été plus considérable; il y a même lieu de penser, selon moi, qu'en raison de la moindre hauteur des montagnes et de la moindre extension des continents, les fleuves principaux devaient avoir une moins grande importance qu'ils n'en ont de nos jours. Avant d'admettre au reste la haute température climatérique comme un élément de l'augmentation des dépôts, il faudrait bien établir son influence réelle sur le régime des eaux: pour nous, il nous semblerait que les neiges et les glaces hivernales des hauts sommets de montagnes doivent avoir sur le brisement des roches et sur le volume et la rapidité des eaux courantes une influence bien plus énergique qu'une température constamment élevée. Nous reviendrons plus tard sur ces questions de climat: jusqu'ici on peut les regarder comme assez peu certaines pour ne pouvoir infirmer par leur seule valeur hypothétique le résultat positif de l'expérience actuelle, et dans tous les cas elles ne sauraient en influencer le résultat d'une manière exorbitante.

Nous n'hésiterons donc pas à admettre relativement aux durées des entassements alluviens de chaque époque géologique les données d'immensité que nous venons d'indiquer: quand bien même dans l'état d'isolement on les croirait sujettes à controverse, leur réunion à toutes les autres considérations semblables leur donne une force qui équivaut à l'évidence.

Parmi les circonstances concordantes dont nous parlons il en est une qui pourrait, si sa mesure était connue, servir de contrôle immédiat à l'entassement des débris fluviaux, et concourir ainsi solidairement à la conception des grandes durées géologiques: c'est le creusement des vallées. La solidarité des deux actions n'est pas douteuse: qui aurait fourni en effet ces masses de détritits si ce ne sont les vides et les dénudations formées à la surface des continents par l'érosion des eaux ou l'action atmosphérique? Or l'immensité des périodes de creusement est peut-être plus frappante encore pour l'imagination que celle de l'entasse-

ment, car le dépôt des eaux courantes, quelle que soit sa lenteur, répond pour nous à quelque chose de visible, tandis que l'érosion est absolument insaisissable; nous n'en apercevons que le résultat lointain, sa progression nous est insensible. Et cependant depuis des époques que, par une abstraction du langage, nous nommons récentes, de vastes sillons ont été creusés dans le sol et ont tranché tous les dépôts. Les deux flancs des larges et profondes vallées où coulent çà et là nos fleuves, sont souvent couronnés de terrains très modernes dont les lambeaux, en couches parfaitement horizontales, semblent demeurer comme des témoins ou des jalons pour indiquer, par la profondeur des escarpements qu'elles dominent, la date du long travail des eaux. On a douté souvent, il est vrai, que la plupart des vallées fussent dues à l'érosion; on en a cité qui traversent des chaînes de montagnes de part en part, ou qui abandonnent des roches tendres, comme des marnes, pour aller entailler les masses les plus dures, comme les porphyres, le granit, le basalte; et généralisant ces résultats on en a conclu que de violentes ruptures du sol avaient eu une part exclusive dans le percement des vallées. Ces phénomènes sont réels en effet et ne manquent pas d'importance; j'en ai été frappé, comme bien d'autres observateurs, dans le cours de mes voyages d'étude et j'avais entrepris même de tirer quelques conclusions de cette remarque, qu'en général c'est au voisinage de leurs coudes brusques que la direction des rivières est le plus exactement rectiligne. Je pense donc aussi, que les fractures ont joué un grand rôle dans la formation des vallées, et je n'attache pas un médiocre intérêt à ce fait, parcequ'il n'est simple qu'en apparence et parce que la manière ordinaire de considérer les fractures me semble incompatible avec son explication rationnelle. Par quel phénomène en effet ces fractures ne se seraient-elles ouvertes que par le haut? ou si elles se prolongeaient plus profondément qui aurait empêché les eaux de s'y engouffrer tout entières? Que l'on y réfléchisse, cette question posée ainsi dans sa rigueur géométrique n'est point facile; nous la réservons, et dans la suite de cet ouvrage nous pensons en pouvoir donner

une solution satisfaisante. Nous montrerons aussi par une nouvelle manière de concevoir et d'expliquer les fractures, comment la correspondance des couches d'un flanc à l'autre des vallées n'est pas toujours une preuve de leur creusement par les eaux. Mais en admettant ces faits de fracture, il ne faut pas s'en exagérer trop exclusivement l'importance : il y a une autre force qui a nivelé le lit de tous nos fleuves et qui en a peu à peu agrandi et quelquefois ouvert les vallées, c'est l'érosion. Que l'on remonte les vallées formées par nos rivières des plaines, on en verra la profondeur et l'étendue aller mourant jusqu'aux plateaux où elles prennent naissance, on les verra s'y ramifier pour recevoir les ruisseaux qui les alimentent, et témoigner par toutes ces allures de leur origine érosive. Dans les hautes montagnes les faits n'ont pas un caractère moins éloquent : bien que les massifs montagneux soient généralement coordonnés, comme les couches, à des directions linéaires, on voit cependant généralement les vallées principales diverger des sommets culminants, ainsi que par exemple le Rhin, le Rhône, l'Aar et le Tésin rayonnent circulairement autour des hautes crêtes du Saint-Gothard. Quand il n'y aurait enfin que l'immense entassement des dépôts arénacés ou limoneux pour attester l'érosion des eaux, ce témoin ne serait point récusable. Nous manquons il est vrai de données pour en apprécier les dates avec exactitude, mais ce défaut de données expérimentales est ce qui témoigne le mieux peut-être de l'incomparable lenteur du phénomène, et il est permis de penser que le chiffre des durées qui en serait déduit devrait égaler l'amplitude de celui que deux autres grands phénomènes géologiques nous ont indiqué déjà. ¹ Tout à l'heure

¹ Je rappellerai encore une autre évaluation des durées, et des durées modernes, basée sur un principe comparable à tous les précédents, l'altération des roches : évaluation si ingénieusement appliquée par M. Becquerel. En comparant la profondeur de l'altération du granit sur le parois d'une église du Limousin, bâtie depuis quatre cents ans, (profondeur qu'il trouva de 3 lignes $\frac{1}{2}$), avec celle du granit en place dans le fond des vallées voisines (6 pieds $\frac{1}{2}$), ce savant a conclu, que depuis le creusement *achevé* de ces vallées, il avait dû s'écouler une période de quatre-vingt deux mille ans.

nous retrouverons dans l'entassement des végétaux fossiles carbonisés une dernière preuve concordante de la longue et puissante action de cet élément qui échappe à l'homme, mais qui a inscrit son nom sur toutes les pages de l'histoire géologique, le Temps.

Après avoir exposé ces principes généraux sur la formation des sédiments, essayons de jeter un coup-d'œil sur les principaux traits qui différencient cette action sédimentaire aux diverses périodes, et parcourons rapidement la série des terrains, non pour les décrire, ce qui appartient aux traités de géologie, et demanderait un ouvrage de trop longue haleine, mais pour fixer les idées sur la manière dont nous concevons quelques-uns seulement de leurs caractères et quelques circonstances spéciales de leur dépôt.

La première question qui se présente dans l'étude philosophique des terrains, c'est celle de savoir quelle a été leur base, quelle a été l'enveloppe originaire du globe qui a servi d'élément aux premiers détritiques stratifiés par les eaux. En même temps que la vie apparaît dans les antiques ruines géologiques, nous y voyons formés des dépôts d'aggrégation qui nécessitent une destruction préalable, et par conséquent la préexistence de roches solides, peut-être émergées déjà du sein des eaux. Mais ce sujet des origines sera traité dans un chapitre spécial et sous un point de vue qui nous est propre : bornons-nous à rappeler ici que le granit semble partout avoir formé ce premier revêtement solide de la terre, et réservons-nous d'expliquer plus tard comment il passe par gradations insensibles à des roches stratifiées comme le gneiss et le micaschiste.

Le gneiss, cette roche si anormale, qu'on ne saurait mieux caractériser qu'en la comparant à un granit dont les éléments premiers auraient été stratifiés avant leur cristallisation, le gneiss est bien, ainsi que le micaschiste, une roche de sédiment, et les preuves n'en sont plus bornées à la stratification seule : on a trouvé dans le micaschiste des fossiles, et le gneiss renferme des couches de calcaires et des couches charbonneuses interposées parallèlement à ses

strates. ¹ Ces caractères témoignent incontestablement de l'action des eaux ; d'autre part l'influence ignée sur l'état actuel du gneiss et du micaschiste n'est pas non plus douteuse : l'origine de ces roches à double face demeure donc un des plus curieux problèmes posés aux investigations de la géologie chimique : puisse-t-on juger que dans la suite de cet ouvrage nous avons fait un pas vers sa solution.

Quoiqu'il en soit le gneiss et le micaschiste forment les anneaux intermédiaires qui relient le granit massif aux sédiments ordinaires, ce sont les roches qu'avec lui l'on nomme primitives ; mais ce nom ne me paraît leur appartenir qu'autant que l'on entend désigner par là les plus anciennes roches de sédimentation mécanique, et sous ce point de vue nous montrerons qu'elles se distinguent bien plus nettement du granit massif que des sédiments qui les ont suivies.

Ces premières roches mises à part, les terrains ont été partagés depuis Werner en trois grandes divisions dont l'habitude s'est conservée jusqu'à ce jour : terrains *de transition*, *secondaire* et *tertiaire*. Cette démarcation est d'autant plus remarquable dans sa persistance actuelle, qu'elle ne correspond en apparence à rien d'absolu, et qu'elle a été remplacée par une division toute différente, bien plus compliquée et fondée sur des principes de démarcation plus exacts. Sous le point de vue minéralogique le plus général, la première de ces trois périodes était caractérisée par des schistes d'abord, puis par des grès ; la seconde par l'abondance des calcaires ; la troisième enfin par celle des sables, des marnes et de ces grès à ciment calcaireux que l'on a nommés *mollasses* : or pour nous il est de toute évidence que de semblables caractères ne sauraient être des fonctions absolues du temps, il y a là des conditions locales et climatériques qu'il n'était point donné de traduire en une formule générale et exclusive, comme l'a fait l'ancienne géologie.

¹ Cette association du gneiss à des calcaires, relativement rare en Europe, et nous en dirons plus tard la raison, est signalée par M. de Humboldt comme très ordinaire dans l'Amérique équinoxiale.

Sous le rapport zoologique une gradation plus absolue toutefois semble signaler ces trois divisions : l'on ne rencontre dans la première que des mollusques, des rayonnés et dans sa partie supérieure quelques poissons ; dans la seconde apparaissent les sauriens, souvent gigantesques ; enfin ce n'est que dans la troisième que le sol terrestre paraît avoir été foulé par de nombreuses populations de mammifères.

Ces caractères, réels quant aux masses, n'ont peut-être pas toutefois sous le rapport des causes finales, toute l'importance que l'on a voulu leur attribuer, et ils nous semblent être seulement, pour la plupart, une conséquence naturelle de l'extension progressive des continents.

La nature paraît avoir suivi en effet, dans les créations des divers âges, le principe constant de la diffusion progressive des êtres de chaque race, et non celui de leur multiplication instantanée : peu prodigue de ses types originaires, elle semble avoir livré au tems et à l'espace le soin de leur foisonnement. D'après ce principe elle n'aurait point donné à chaque coin de terre sa création spéciale, et cela est visible au tems actuel, où les îles de médiocre étendue sont généralement dépourvues de la population terrestre des continents. Sous ce point de vue la venue des mammifères sur le globe ne pouvait guère concorder qu'avec le tems où ces continents avaient déjà pris une extension suffisamment grande, et il était difficile qu'elle convint à l'époque où toutes les terres du globe ne consistaient qu'en des archipels plus ou moins étendus. Démontrer que la formation des continents a été progressive, c'est donc faire préjuger rationnellement de l'exclusion des mammifères aux premières périodes géologiques. Il n'est nullement certain du reste que la classe des mammifères n'ait apparu qu'à la dernière des trois grandes divisions dont nous avons parlé, et la période secondaire en a déjà offert plusieurs exemples.

Bien que la trilogie de Werner ne semble plus guère être considérée maintenant que comme un groupement commode auquel il ne convient d'attacher aucune idée caractéristique trop absolue, dans notre opinion toutefois cette division,

établie comme instinctivement par les premiers géologues, ne repose point sur des bases tout à fait imaginaires. Tous ses caractères ne nous paraissent pas dériver de causes lentes et sans limites absolues comme l'extension progressive des continents : elle admettrait encore des causes instantanées et par conséquent susceptibles de faire époque. Nous trouverons ces causes dans des inversions extrêmes de climats qui auraient affecté la nature organique sur toute l'étendue de la terre ; mais cette considération n'est pas de nature à être exposée maintenant. Nous quitterons donc ce classement trop vague encore, pour jeter un rapide coup-d'œil sur quelques-unes des subdivisions plus précises que les observations modernes y ont substituées, d'après les principes incontestables des discordances de stratification et d'après des distinctions rigoureuses dans la nature des fossiles.

Ce qu'on appelait terrain de transition, et qui se rapporte aux plus anciennes formations exclusivement sédimentaires, a été borné dans l'acception moderne aux couches inférieures à la série carbonifère. Nous ne dirons rien de particulier sur cet ancien groupe, où les observations des derniers temps ont fait reconnaître, d'après les faits de stratification, deux étages ou périodes distinctes : le premier très schisteux dans nos contrées et passant fréquemment au gneiss et au micaschiste, le second plus abondant en grès et indiquant ainsi, par ces couches arénacées, une plus grande quantité de terres émergées et leur voisinage plus rapproché. Tous deux cependant renferment, et le second surtout, de grandes masses calcaires intercalées et des fossiles dont on retrouve quelques genres analogues dans les mers tropicales actuelles. La végétation apparaît principalement dans la seconde de ces périodes, où elle forme quelques couches charbonneuses : elle consiste principalement en tiges de roseaux des climats chauds.

L'époque carbonifère qui succède à ces deux terrains est une des plus intéressantes de la série géologique, non seulement par les couches de houille si nombreuses et souvent si puissantes qui s'y rencontrent en tant de lieux, mais encore par l'anomalie des circonstances climatiques qui ont pré-

sidé à sa formation. L'un des principaux caractères de cette époque est l'uniformité organique qu'elle présente en tous les points du globe où l'observation géologique a pu en retrouver la trace : partout elle se distingue par une végétation exceptionnelle qui se représente sous la même forme à toutes les latitudes actuelles, depuis les glaces du Spitzberg jusqu'à la terre de Van-Diemen et depuis l'extrémité orientale de la Sibérie et de la Chine jusqu'aux Etats-Unis d'Amérique. Dans tout cet espace, où la flore arborescente du terrain houiller indique si souvent une végétation terrestre, l'absence des animaux qui vivent sur la terre est encore un fait remarquable et caractéristique. Sous le rapport minéralogique on peut signaler aussi l'association constante des grès avec les dépôts houillers, et le développement considérable de ce produit des eaux courantes, qui atteste, non pas comme on l'a dit l'agitation des mers à l'époque carbonifère, mais peut-être une augmentation dans le volume et dans la force de transport des eaux torrentielles, et de plus fréquentes variations dans leurs vitesses. Toutefois dans ce terrain paradoxal l'intérêt se concentre presque entier sur la végétation. C'est elle qui a produit ces amas charbonneux devenus maintenant un élément important de la richesse et de la puissance des nations ; c'est elle qui par son enfouissement à des latitudes où toute végétation a cessé maintenant et par l'uniformité de ses caractères en tous lieux, nous donne de si utiles enseignements sur les transformations climatériques du globe terrestre. Il y a trois choses à considérer dans cette flore de l'époque houillère : Sa nature ou l'espèce de climat qu'elle indique, le développement considérable de ses formes, enfin son uniformité à toute latitude. En dernier lieu, et ce qui n'est pas la recherche la moins intéressante, resterait encore à savoir par quelles circonstances elle a pu entasser (exclusivement à ce point précis de la série géologique) des amas charbonneux aussi puissants et aussi étendus, et comment a pu s'effectuer leur alternance si fréquente avec des couches de grès et d'argile et même avec des calcaires marins. Les premières de ces questions, celles relatives aux climats, seront plus convenablement réunies à quel-

ques considérations du même ordre appliquées à l'ensemble des terrains. ¹ Nous nous bornerons ici à peu de mots sur la formation de la houille même, parce qu'elle se rattache à la considération dominante de ce chapitre, celle du tems.

L'origine végétale de la houille ne saurait offrir aucun doute : l'association constante de ses couches avec des schistes à impressions végétales, la pellicule de charbon indiquant le contour solide des tiges de roseaux creux qui y abondent, enfin les observations microscopiques qui ont reconnu dans la houille même l'organisation cellulaire, ne permettent pas à cet égard l'hésitation. Mais la question n'est point pour cela résolue : lorsque l'on saura même comment les plantes au sein de l'eau marécageuse peuvent se transformer en matière charbonneuse, il restera encore à expliquer par quels phénomènes ont pu s'entasser à une époque privilégiée de si énormes épaisseurs de charbon et sur des étendues si considérables ; il restera encore à expliquer comment ces grands dépôts se trouvent répétés à de si divers et de si fréquents intervalles de hauteur dans une même formation alluviennè. Ce sont là les deux circonstances capitales de la formation des houilles, et elles devaient paraître plus surprenantes encore lorsque l'énormité des tems n'était pas considérée comme un élément fondamental des questions géologiques.

Deux hypothèses principales ont été avancées pour leur explication : 1^o Le charriage de vastes radeaux naturels par les fleuves ou par la mer ; 2^o le développement des plantes sur la place même où elles sont enfouies, en y joignant un abaissement et un relèvement alternatifs du sol pour expliquer comment ces plantes ont pu se développer à des niveaux différents dans une même formation.

La première de ces hypothèses n'est réellement point soutenable lorsqu'on tient compte de l'état de conservation si parfait des feuilles délicates qui se rencontrent en abondance dans les gîtes houillers ; elle ne paraît pas non plus nullement compatible avec la régularité des couches de houille et la netteté des

¹ Chap. III.

plans qui les limitent. Enfin tout récemment M. E. de Beaumont dans une note ingénieuse dont nous parlerons ci-après, a écrasé cette hypothèse sous le calcul de l'épaisseur fabuleuse (300 mètres) qu'auraient dû atteindre ces radeaux flottants pour donner un dépôt charbonneux comparable à celui de certaines couches houillères.

L'hypothèse du développement en place est donc la seule qui soit compatible avec les faits ; mais dans les termes où je viens de l'énoncer, c'est-à-dire avec des enfouissements et élévations successives du sol, elle me paraît réunir aussi peu de probabilités que la précédente.

Sans parler même de la continuité dans le parallélisme des couches directement contraire à cette hypothèse, comment penser que ces battements alternatifs du sol aient existé sur toute la terre exclusivement à cette époque, qu'ils n'aient pas été sensibles aux autres périodes, du moins d'une manière comparable, et que dans celle-ci ils n'aient affecté d'ailleurs que les points épars où l'on retrouve les couches charbonneuses ? Le dépôt de ces couches est un phénomène si considérable, si fréquent dans ses alternances, si particulier à cette époque géologique, qu'il ne peut dépendre absolument que d'une cause toute spéciale, inhérente à l'époque même, et qui n'ait pu se répéter de la même manière à toute autre période. Or il est bien évident que les soulèvements et enfoncements du sol ne sont pas des phénomènes de cette espèce.

Pour moi je ne crois applicable aux alternances des couches de houille que la théorie du déplacement du lit des fleuves que j'ai exposé un peu plus haut : elle seule peut expliquer l'exhaussement successif des couches alluviennes sans que leur surface se trouve jamais notablement au-dessous du niveau des eaux courantes ; elle seule peut expliquer, par l'exhaussement successif de tout le fond d'une vallée ou d'un delta, où le fleuve promène ses divagations séculaires, comment une même étendue de terrain a pu être alternativement marécageuse ou couverte d'une eau assez profonde et assez rapide pour y entasser des alluvions puissantes de sable et de limon. Cette théorie si simple me semble répondre avec une grande

clarté à toutes les conditions mécaniques de la position des couches de houille, et elle ne demande que le *tems* comme élément indispensable. Mais cette considération ne nous effraiera pas, car nous pensons qu'elle doit entrer comme instrument nécessaire dans toutes les études d'une saine géologie, et le dépôt même des houilles va nous en donner une nouvelle preuve.

Le déplacement du lit des fleuves, n'explique en effet ici que l'alternance des dépôts et les circonstances par lesquelles une assez grande étendue de pays a pu rester à plusieurs reprises à l'état de marécage pendant une longue période de tems après avoir été recouverte par les eaux courantes ou avant d'en être de nouveau recouverte. Mais il n'explique nullement le fait même de la transformation des végétaux en houille, il n'explique nullement les circonstances climatiques qui ont favorisé le développement exclusif de certaines formes et qui ont rendu le dépôt végétal aussi abondant à cette époque; enfin aucune cause connue ne nous paraît indiquer encore pourquoi le volume des eaux courantes et surtout leurs variations paraissent y avoir été plus considérables qu'en d'autres tems. Nous réservons ces deux dernières questions.

Quant à la production même de la houille elle se réduit à un phénomène du même ordre que la carbonisation actuelle des végétaux dans les marécages, et il y a tout lieu de penser qu'elle s'est faite à la manière des tourbes, par la décomposition continue d'herbes vivaces. L'absence de racines vigoureuses dans les plantes de cette époque devait d'ailleurs les rendre propres à puiser principalement leur nourriture dans l'atmosphère, ce qui expliquerait la non-existence de l'humus dans les couches de la houille. La seule considération indispensable à cette hypothèse est encore celle du tems, et l'entassement des grandes masses de carbone par un tel procédé exige en réalité la conception d'étonnantes durées. Mais à nos yeux un pareil résultat n'infirmes point la probabilité rationnelle de cette explication, il la fortifie au contraire, car il achève de nous montrer toutes les considérations de la géologie gravitant pour ainsi dire vers ce principe fondamental des longues durées de la terre habitable.

M. Elie de Beaumont dont tous les travaux sont empreints de cette ingénieuse précision si utile dans les sciences, a fait le calcul du tems qu'aurait exigé la formation des houilles dans l'hypothèse d'une énergie de végétation égale seulement à celle de notre époque, et les résultats sont de nature à étonner, au-delà même de tous ceux que nous avons cités jusqu'ici. Le plus simple énoncé de ce résultat est qu'une végétation de 25 ans, dans nos climats, transformée en houille et répandue avec uniformité sur tout le sol, n'y formerait pas une couche de plus de 2 millimètres¹....

On connaît en France des couches de houille de plus de 60 mètres d'épaisseur, et il est peu de grands bassins carbonifères qui dans l'ensemble de leurs couches superposées à divers intervalles ne fournissent une puissance totale de 40 à 60 mètres. Leur formation aurait donc exigé plus de 600,000 ans, indépendamment du tems employé à l'entassement des vastes dépôts alluviens dont les houilles font partie.

Il est bien vrai que l'acide carbonique répandu à cette époque dans l'atmosphère et dont l'élément fondamental est actuellement enfoui dans le sol avec les houilles, a dû activer alors la végétation plus fortement qu'aujourd'hui; il est bien vrai surtout que des circonstances climatériques particulières, dont nous aurons à rechercher les causes par la suite, ont pu contribuer aussi à cette surexcitation; mais en faisant la part de toutes ces circonstances nous n'en trouverons pas moins à admirer encore l'énormité des durées dans une por-

¹ Ce calcul très simple est fondé sur les données suivantes : un hectare de taillis de vingt-cinq ans donne environ 180 stères de bois ou 39400 kilogr. La quantité de carbone du bois ne forme que les 0,42 de celle que renferme la houille sous même poids et celle-ci est environ moitié plus dense. Or 39400 kil. de bois répandus sur un hectare y formeraient une épaisseur de 0^m, 0084; l'épaisseur de houille correspondante sera donc 0^m, 0019.

En supposant les houilles formées par des radeaux flottants, une couche de 30^m. exigerait, selon M. de Beaumont, un radeau de 263^m, sans tenir compte même du vide des tiges creuses; cette considération exclut complètement l'hypothèse des radeaux.

tion relativement si petite de la puissance des terrains carbonifères ; et nous retrouvons ainsi dans chacune des assises de l'architecture souterraine les composantes de cette somme énorme de 1 à 2 millions d'années qui forme, selon notre évaluation, l'intervalle entre chaque cataclysme géologique.

Nous ne pouvons quitter ce sujet du terrain houiller sans indiquer quelques réflexions qu'il suggère. La masse des végétaux enfouis à l'état de houille indique qu'il a dû exister dans les premiers âges une quantité d'acide carbonique beaucoup plus grande qu'aujourd'hui ; or comme la végétation dépouille incessamment l'atmosphère d'une partie de son carbone, son enfouissement finirait par appauvrir outre mesure la quantité de cette substance répandue à la surface du globe, au détriment de toute organisation végétale et animée. Il semble donc que dans l'hypothèse d'une vaste durée de la terre, il doive entrer dans les desseins de la Providence de rendre tôt ou tard à l'activité organique cet élément nécessaire, et de pourvoir par là au renouvellement de la matière organisée qui s'épuise. C'est donc pour ainsi dire un acte providentiel qui est accompli par la main de l'homme, lorsque pénétrant dans les entrailles de la terre il en extrait, pour les livrer à la combustion, les restes charbonneux des végétaux entassés pendant l'immense durée des âges ; et la conservation de l'activité organique sur le globe semble intéressée à ce que d'époque en époque y apparaisse une race intelligente et sociable, que ses besoins portent à retirer des profondeurs les matériaux enfouis, pour les rendre à l'alimentation des races futures. Ainsi dans ce cercle infini de la rénovation des êtres, non seulement leur instinct matériel mais leur intelligence même semble dirigée par la main de Dieu vers ce but d'harmonie et de pondération qui assure la longévité des masses.

Mais redescendons à l'étude des terrains. La formation carbonifère est surmontée, au voisinage des montagnes anciennes, par des couches concordantes d'agglomérats souvent à énormes fragments, que nous rapporterons à une époque spéciale, d'une essence climatérique remarquable aussi ; mais il n'est pas tems d'en parler encore, il vaut mieux nous arrêter

plutôt sur la formation suivante, celle du *grès bigarré* ou du *trias*, ainsi nommée d'après une division particulière de ses couches en Allemagne, division sans intérêt au point de vue général. Cette époque, dont les traces sont peu étendues dans nos contrées, a toutefois une grande importance en ce qu'elle y indique un changement complet dans l'organisation vivante ou végétale, et c'est à elle que doit commencer en réalité ce que l'on a nommé la période *secondaire*. Nous dirons plus tard à quelle cause attribuer ce changement organique, mais au point de vue minéralogique seul le même terrain présente encore un phénomène nouveau, qui le caractérise en quelquesorte, je veux parler des nombreuses couches de *sel gemme* qu'il renferme, souvent associé au gypse et à la dolomie. La formation de ces dépôts se rattachant suivant nous à des principes que l'on n'avait pas encore signalés, et aussi à la considération du tems, nous croyons devoir indiquer nos idées à cet égard.

L'origine sédimentaire du sel gemme et du gypse ne saurait être révoquée en doute, aucune raison puissante n'a encore été donnée de leur provenance souterraine, et il est facile de prouver par la considération des alternances, ainsi que nous l'avons fait pour les calcaires, que ce mode de provenance est inadmissible. Mais comment concevra-t-on le *dépôt* intermittent de couches salifères au milieu d'une formation alluvienne, qui semble indiquer la présence continue des eaux? D'aucune autre manière, je pense, que par l'évaporation accidentelle ou périodique de lacs salés tels que ceux que l'on trouve actuellement autour de la mer Caspienne, en Sibérie, en Tartarie, dans l'Amérique du sud, etc. L'origine de ces lacs est déjà elle-même une question controversée; ce qui me paraît le plus probable c'est que leur salure provient du lavage des terrains environnants, antérieurement baignés par la mer, et encore imprégnés des sels qu'elle dissolvait. Les eaux pluviales passant sur ces terrains et se réunissant ensuite dans des réservoirs sans issue, s'y concentrent par l'évaporation; de là leur salure si considérable, et pour qu'une couche de sel ait pu se former sur leur fond, il suffirait de concevoir une évaporation accidentelle poussée jusqu'à

la limite convenable, soit par une sécheresse ou des chaleurs inusitées, soit surtout par le détournement d'un affluent.

L'explication n'est pas aussi facile pour les gypses, car le sulfate de chaux n'existe pas tout formé dans les eaux de la mer ou dans celles des lacs; la chaux même ne s'y rencontre pas en quantité notable et de manière à satisfaire à la conception du dépôt instantané des masses du gypse si souvent supérieures en quantité à celles du sel gemme. Aussi ne sommes-nous point porté à admettre l'instantanéité, nous pensons que le dépôt des gypses a le plus souvent dû être progressif et c'est pour cela qu'il n'existerait pas aussi souvent que le sel gemme en couches tout-à-fait pures et régulières. Ce qui est certain c'est que le sulfate de chaux a été produit de toutes pièces et chimiquement dans les lacs salés: or il est nécessaire pour expliquer la formation chimique de ce composé, de recourir à des considérations toutes nouvelles, car la théorie est encore muette sur ce point. Ces considérations nous les puiserons dans les principes que nous avons avancés en parlant de la lente influence que doit exercer le développement de la végétation marine sur l'état chimique des eaux salées et sur les dépôts qui peuvent s'y former. Nous avons fait voir que le résultat premier de ce développement végétal était la production du chlorure de calcium et de magnésium, par suite de la décomposition du sel marin: d'une autre part la dissolution marine concentrée dans les lacs doit être riche en sulfates alcalins, et l'on sait par le travail des salines qu'un mélange de sulfate de soude avec du chlorure de calcium donne lieu à du sel marin et à du sulfate de chaux, qui doit se précipiter lorsque la dissolution est suffisamment concentrée: Telle serait selon nous l'origine des gypses sédimentaires, opinion sans doute bien éloignée de celles que l'on avait données jusqu'ici, mais fondée, je crois, sur des considérations rationnelles; et bien qu'elle mette en jeu un ordre d'influence que l'on avait considéré jusqu'ici comme trop faible pour être étudiée je ne connais qu'elle encore qui applique à la formation des gypses une cause réelle et des réactions chimiques régulières. Elle tire d'ailleurs de la considération des longues durées une vraisemblance satisfaisante.

La formation des dolomies est, ainsi que nous l'avons déjà dit, un corollaire de cette même action végétale dans les dissolutions salines concentrées, et ce serait pour cette raison qu'elle accompagne si normalement les gypses sédimentaires : le chlorure de calcium fourni par les plantes étant en grande partie décomposé immédiatement par les sulfates alcalins, le chlorure de magnésium qui lui est associé doit réagir en bien plus grande proportion relative sur le carbonate de soude, et de là ce carbonate double de chaux et de magnésie, produit essentiel des eaux, mais que l'on devait regarder comme inexplicable jusqu'aujourd'hui.

Il est inutile de nous arrêter davantage sur ces considérations chimiques, qui ne sauraient être ici qu'accessoires. Un peu plus tard, en parlant des phénomènes ignés, nous aurons occasion de revenir encore sur un autre point de vue de la question des gypses, car nous pensons qu'il peut exister des gypses de transformation, ce que nous ne saurions que difficilement admettre pour la dolomie.

Ce que nous venons de dire de l'existence d'un grand lac au centre de l'Europe lors de la formation salifère, fait penser qu'une assez grande partie de notre continent était alors à découvert au-dessus des eaux : et cependant l'époque suivante, l'époque jurassique, nous montre par la puissance de ses calcaires le retour d'une grande profondeur d'eau marine sur une partie de ces mêmes terrains, et ce phénomène s'observe en différents points sur presque toute l'étendue reconnue de l'Europe. C'est là un fait d'une grande importance et qui se représente encore à diverses reprises dans la série géologique. Au-dessus des calcaires jurassiques nous voyons en effet, dans le comté de Sussex en Angleterre et dans le pays de Bray en France, un vaste dépôt arénacé des eaux douces ¹ surmonter à son tour les calcaires marins de l'oolite ; puis voici que la for-

¹ C'est le terrain des Wealds d'Angleterre, si remarquable par ses fossiles d'eau douce ou mêmes terrestres d'une nature quelquefois si singulière, parmi lesquels cet énorme reptile herbivore à dents d'iguane, qui atteignait la longueur de 70 pieds.

maison marine de la craie vient de nouveau s'étendre sur ces produits de la terre ferme. Ainsi dans la succession de quatre terrains nous trouvons deux retours et deux retraits alternatifs de l'eau des mers aux mêmes lieux : en vain pour expliquer ce problème a-t-on imaginé des abaissements et des élévations successives du sol, la concordance des stratifications repousse complètement cette explication : car l'énorme épaisseur de^s dépôts indique que les mouvements auraient dû être brusques et considérables, et il n'y a pas de semblables révolutions sans un dérangement très notable dans l'horizontalité des couches, par conséquent sans discordance avec les terrains déposés ultérieurement. Or c'est ce qui n'a point lieu dans les alternances si connues dont nous venons de parler, où tous les terrains conservent dans leur stratification un parallélisme exact. Ce n'est donc pas le sol qui a été le siège de ces mouvements, *c'est la mer elle-même qui s'est déplacée*, et quoique l'échelle de ces phénomènes ne soit pas telle qu'ils puissent à eux seuls former la base d'une grande théorie, nous enregistrons néanmoins cette conclusion comme devant être rappelée lorsqu'il en sera tems et comme devant former l'utile accessoire d'un système qui paraît embrasser les plus petits comme les plus grands phénomènes de la géologie.

En indiquant ces remarquables mouvements de la mer, rendus évidents par les grandes et brusques alternances des sédiments marins et lacustres, qui signalent certains changements d'époque, j'ai tracé du même trait toutes les divisions importantes de la période secondaire, qui ne renferme en effet, outre le trias, que la formation jurassique si abondante en calcaires, et cette masse de terrains disparates que l'on a groupés sous le nom de *formation crétacée*. La dernière se subdivise depuis assez longtems en étage inférieur ou *grès vert*, et en étage supérieur ou *craie* proprement dite ; cette distinction, bien tranchée en Angleterre par la différence de nature minéralogique, était admise surtout par les géologues anglais, mais classée seulement par eux comme un phénomène du même ordre que les nombreuses divisions qu'ils avaient introduites aussi dans la formation oolitique : M. E. de Beaumont a été

conduit, le premier je crois, par des discordances de stratification, à considérer cette division comme caractérisant deux *époques* distinctes, séparées par un cataclysme. Une distinction assez tranchée dans les fossiles, telle que l'absence des ammonites et autres céphalopodes cloisonnés dans l'étage supérieur, celle des bélemnites dans l'étage inférieur, vient donner à cette division toute la confirmation qui puisse appartenir à un pareil ordre de caractères. ¹

Dans ces dernières années une troisième subdivision, inférieure aux précédentes, a été proposée sous le nom de *terrain néocomien*, mais elle ne paraît basée encore que sur cette particularité de présenter localement un calcaire inférieur au grès vert, que l'on était accoutumé à prendre pour base de la période crétacée tout entière. Or ce caractère est bien loin d'être suffisant pour autoriser encore une distinction d'époque, et il y a lieu de penser que le calcaire néocomien, aussi bien que les sables à fossiles d'eau douce d'Angleterre, ne forment qu'une partie composante de la période crétacée la plus ancienne, avec les grès verts qui leur sont liés.

Nous ne pouvons nous refuser à revenir ici, sur une erreur particulière des anciennes classifications géologiques : dans les anciennes idées, qui se sont même conservées en partie jusqu'à ce jour, les calcaires aussi bien que les limons les plus fins de chaque époque étaient considérés comme le dépôt mécanique le plus tardif d'une même masse d'eau qui aurait commencé

¹ Il est probable pour nous que cette distinction de fossiles n'indique pas autre chose ici que la transformation subite et permanente d'une plage ou d'une eau basse en mer profonde; mais cela suffit bien pour caractériser un changement d'époque. J'ai déjà indiqué les conclusions qui me semblent pouvoir être tirées en général de l'abondance des coquilles légères comme les ammonites ou les nautes, ou bien des coquilles pesantes, comme les bélemnites, (provenant de mollusques voyageurs ou pélagiques), pour en déduire la moindre ou plus grande profondeur des eaux: c'est une considération qui n'avait pas encore été produite, et qui me paraît susceptible, si elle était appliquée par des zoologistes, d'apporter quelques enseignements nouveaux sur les principales circonstances de la distribution des fossiles soit aux divers âges, soit dans une même formation.

par précipiter, à l'origine de la formation, son dépôt le plus grossier, les grès. Par une singulière abstraction on semblait faire de ces énormes masses de sédiments une sorte d'amas dont toutes les parties étaient solidaires; on en faisait pour ainsi dire le résultat d'une action d'un moment, sans s'inquiéter du tems nécessaire à la formation même de ces débris par le brisement ou l'usure si lente des terrains en place, et de l'impossibilité qu'ils pussent se tenir aussi longtems en suspension dans les eaux. C'est d'après cette idée irrationnelle que l'on cherchait toujours à placer des grès à la base des formations; plus tard la croyance à de grands cataclysmes a contribué à maintenir cette dernière idée, en faisant commencer toutes les époques par une débâcle, et c'est ce penchant qui a porté par exemple à associer le grès vert à la craie, à séparer le calcaire carbonifère des grès houillers qui lui sont supérieurs; et sans des distinctions assez prononcées dans les stratifications et dans les fossiles, elle aurait porté bien souvent à associer le grès bigarré aux calcaires jurassiques.

Lorsque l'on réfléchit au mode de formation des grès par l'ensablement fluvial, et au tems énorme qu'a nécessité chacun de leurs entassements, on ne peut assez s'étonner que cette erreur de théorie ait aussi généralement régné. Pour nous les grès non seulement peuvent, mais doivent exister à tous les points d'une formation, selon les localités, et si dans nos contrées certains terrains d'époques spéciales sont plus que des terrains qui les enclavent abondants en ce produit sableux, cela prouve, toute circonstance climatérique à part, que des terres plus étendues étaient, à ces époques, soumises dans nos régions à l'action des eaux courantes: le retour général des grandes masses de calcaire au-dessus de ces formations arénacées indiquera donc, non pas un dépôt plus tranquille, plus lent ou plus tardif, mais un nouvel envahissement des eaux marines; et de là cette grande conséquence déjà énoncée par nous, que des oscillations importantes dans le niveau des mers ont signalé les diverses périodes géologiques.

Il ne faudrait pas néanmoins donner aux considérations précédentes un sens trop absolu; les grands mouvements de la

mer dont nous parlons ici ont dû produire périodiquement soit des entassements arénacés soit des érosions considérables, et l'on doit retrouver les traces de l'un et de l'autre phénomène à la base des formations. Le grès du lias par exemple et les érosions de la craie sous le bassin tertiaire de Paris me semblent pouvoir être regardés comme des effets de ce genre. Mais revenons à la succession générale des terrains.

À la craie, formation de mers profondes, succède le terrain tertiaire, pendant toute la durée duquel nos contrées n'ont plus été couvertes d'une épaisseur d'eau aussi considérable; sa partie inférieure, par la présence des mammifères, par ses produits des eaux douces et sa végétation terrestre, indique en effet un exhaussement relatif des continents, et les mêmes circonstances se reproduisent pour ainsi dire pendant toute cette longue série, qui comprend plus de trois époques distinctes. La surface de l'Europe a été pendant presque tout cet intervalle couverte de grands lacs¹, de mers intérieures, ou sillonnée de larges fleuves. La plupart de nos montagnes étaient alors en grande partie élevées et les torrents descendus de leurs neiges ont entassé à leurs pieds ces puissants dépôts de cailloux roulés ou triturés, que l'on a nommé mollasses: produit éminemment torrentiel près de nos grandes montagnes, et formé d'éléments tels que le Rhône par exemple peut en déverser dans le lac de Genève à sa sortie des hautes régions.

Sous le rapport climatérique cette grande période peut se

¹ Il n'est peut-être pas difficile de prouver, et c'est une observation qui nous sera précieuse par la suite, qu'à ce commencement de la période tertiaire le continent européen était même plus développé qu'aujourd'hui. Le grand lac d'eau douce qui à cette époque s'étendait sur le midi de la France, prolonge ses puissants dépôts de l'Océan à la Méditerranée, sans que l'on puisse reconnaître aujourd'hui quels étaient les terrains qui à ces deux limites en formaient les rivages: sans nul doute ces deux extrémités sont actuellement sous les eaux de la mer, et comme on ne peut guère supposer un lac aussi considérable qu'au milieu d'une étendue de terre ferme considérable aussi, ce fait seul vient témoigner avec une grande force d'un empiètement notable de la mer depuis cette époque, considération qui n'est entrée encore dans aucune théorie; car on a souvent parlé de l'abaissement des eaux, pas encore de leur envahissement.

diviser en deux parties bien distinctes : l'inférieure, qui comprend l'intervalle de deux époques géologiques, est caractérisée par une végétation des climats chauds et en particulier par des palmiers ; la seconde se distingue par une circonstance bien digne d'étude, par l'apparition brusque et la longue persistance d'une végétation des climats tempérés. Elle nous montre dans ses dépôts, déjà bien antiques relativement à nous, les espèces d'arbres communes dans l'Europe méridionale (chêne, peuplier, frêne, aulne, saule, etc.), avec les restes d'animaux de notre époque. Dans les calcaires qui paraissent lui correspondre (Sud de l'Italie) on trouve aussi les coquilles de la Méditerranée, quoique d'une dimension plus considérable qu'au tems actuel. Ces terrains, séparés de nous par de grands cataclysmes, puisqu'en Sicile par exemple on trouve leurs couches infléchies portées à plus de 3000 pieds au-dessus du niveau de la mer, ces terrains, dis-je, sont donc une sorte de reproduction lointaine de notre époque. Et ce résultat devient bien surprenant, lorsque l'on considère que le dépôt d'une époque suivante, de la dernière de celles qui ont précédé la nôtre, montre le retour des mammifères et des végétaux des contrées équatoriales (éléphants, grands carnassiers, etc.).

Cette dernière période tropicale n'est point signalée par ce seul contraste, elle est caractérisée encore par des entassements fragmentaires plus monstrueux, si je puis ainsi parler, que n'en présente aucune époque antérieure; ses sédiments, connus en grande partie sous le nom de diluvium, sont au plus haut point remarquables par la grosseur des fragments roulés dont ils entourent nos principaux massifs montagneux et par l'énorme distance d'où ces fragments ont été charriés. Entre cette époque tropicale si excentrique et celle où nos contrées présentaient un climat tempéré, une révolution d'une grandeur inusitée et d'une nature exceptionnelle, inconnue encore, paraît donc s'être étendue sur l'Europe. Elle deviendra bientôt pour nous le sujet d'une discussion toute spéciale, et plus tard encore nous rechercherons les relations de cette dernière période avec l'époque actuelle, qui en diffère à tant d'égards.

Dans cette course si rapide que nous venons de fournir à travers les anciennes époques nous n'avons fait que recueillir çà et là quelques traits généraux qui signalent les grandes variations dans l'équilibre des périodes de repos ou de sédimentation ; ces considérations ne sont pas même une grossière ébauche de l'histoire et de la description des terrains : elles suffiront toutefois, je l'espère, pour porter dans les esprits déjà initiés aux faits principaux de cette histoire la conviction qu'à part les grands cataclysmes qui ont produit l'inflexion des couches et la brusque séparation des périodes, il existe encore dans la disposition des sédiments eux-mêmes, produit lent et paisible, quelque chose de spécial à chacune d'elles, que la théorie n'a pas encore dévoilé. Contentons-nous ici de ce simple aperçu et avant de revenir au développement de ces idées par l'étude des causes, entrons dès maintenant dans un plus vaste champ, et portons nos regards sur les grandes modifications physiques, témoins permanents des cataclysmes qui ont amené la fin de chaque époque.



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 imaginatif de sa pensée, semblait avoir pris à tâche d'invertir partout 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 bannisait 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 atômes 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 boursoufflement 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. Admiration 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. Quoiqu'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 délaissier 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 bélier 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 rideaux 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 trappeux 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 plissements 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 plissements 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 mollasse, 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'ai ajouté 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 bouiller 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 concavités.

vités qui les relieut 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 refolements 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 Nautilés.

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 ploiements 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 ploiements 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 je dois citer ses paroles qui sont remarquables : « Mais aux approches des pics, dit-il, la position change tout à coup; dans les bases (méri-dionales) de celui du Mont-Perdu je trouvai les bancs coquillers 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 ploiement 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 repliement, car le granit a dû être originellement 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 reliait 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 temps 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 terre¹ : 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 relier 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

X | 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.

X | C'est dans le refroidissement du globe que M. Elie de Beau-
mont a cherché la cause des grands phénomènes de soulève-
ment. La contraction de l'enveloppe terrestre avait été consi-
dérée 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'ex-
cès 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 ratta-
chés. 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 par-
ler 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 exacte-
ment leurs masses internes dont la température décroît sensi-
blement. 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'élévation 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.

nement et le parallélisme. Une comparaison, triviale peut-être, mais que je crois exacte, rendra plus complètement ma pensée. Lorsque le dessèchement 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'emmagine 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 reposer 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'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 siècles ¹.

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.

CHAPITRE III.

DES CLIMATS AUX ANCIENS AGES ET DE LEURS MUTATIONS.

Les contrées boréales présentent, dans leurs débris fossiles, des particularités étranges, dont la géologie systématique ne s'est pas encore assez sérieusement préoccupée. Sous les glaces du Spitzberg, dans cette terre aujourd'hui désolée et inhospitalière, on retrouve les antiques vestiges d'un terrain houiller, où sont accumulés les débris de cette végétation gigantesque qui distingue le même terrain dans nos contrées, et dont quelques îles tropicales seulement nous reproduisent aujourd'hui les formes, mais les formes singulièrement amoindries. Au Groënland et dans l'Amérique russe, par 70° de latitude, mêmes faits et même contraste avec la température présente. Enfin si l'on achève le contour du cercle polaire, ces contrastes vont se trouver encore au nord de la Sibérie, mais avec des caractères plus surprenants, puisqu'ils appartiennent à une époque bien plus récente et qu'ils touchent pour ainsi dire au tems actuel. Qui ne sait en effet que les glaces de la Sibérie retiennent ensevelis des cadavres d'éléphants énormes et de rhinocéros, conservés dans leur entier, avec leur peau et leurs chairs, et comme s'ils venaient seulement de périr ? Ce qui témoigne incontestablement qu'aussitôt après leur mort ils ont été brusquement saisis par l'étreinte glacée qui les a préservés jusqu'à ce jour de toute désorganisation.

De quelque manière que l'on envisage ce dernier fait, on ne saurait se refuser à l'évidence d'un changement subit de température. Et d'abord les éléphants ont vécu sur le sol même

où on les rencontre : comment les supposer charriés de contrées éloignées sans se briser ou se décomposer ? Et puis leurs ossements ne se trouvent pas seulement à la surface du sol, ils sont enfouis aussi dans les terrains récents de la Sibérie et en particulier dans le sable aurifère, qui est sans aucun doute le produit d'une longue action et d'une action locale. Or maintenant comment admettre qu'ils eussent pu vivre dans ces mêmes lieux, si le climat eût été aussi contraire qu'aujourd'hui au développement d'une végétation capable de nourrir ces énormes pachydermes et leurs troupes ordinairement nombreuses ?

C'est surtout pour l'habitation des herbivores, comme le remarque Cuvier, que l'influence de la latitude se fait sentir, parce que le mode de nourriture se joint au climat pour en restreindre la dispersion. Les carnassiers peuvent trouver presque partout une proie, aussi leur cercle de dispersion est-il beaucoup plus vaste que celui des herbivores, qui se trouvent naturellement fixés dans les lieux où abonde la nourriture la plus convenable à l'organisation spéciale de chacun d'eux. Aussi n'est-ce pas chose très étonnante que le tigre de Bengale ait été vu s'avancer jusqu'à 50° de latitude ; mais l'habitation de l'éléphant sur le sol improductif de la Sibérie, tel qu'il est aujourd'hui, serait une sorte de monstruosité que l'imagination repousse. Le changement de température est d'ailleurs prouvé matériellement par ce fait, que les terrains récents où l'on trouve enfouis les ossements des pachydermes renferment les débris d'une végétation inconnue au climat actuel de la Sibérie.

Voilà donc un changement climatérique non seulement complet, mais brusque, instantané, qui exige certainement une cause spéciale et puissante. Cette cause a-t-elle été progressive, embrasse-t-elle dans une action continue toutes les formations géologiques, n'est-elle enfin que la suite de celle qui dans un tems beaucoup plus reculé a laissé croître les végétaux houillers sous le cercle polaire, dans les îles du nord de l'Europe ? C'est la première question que les analogies commandent d'éclaircir.

Le principe, qui semble aujourd'hui consacré, d'une persistance indéfinie dans les conditions astronomiques du globe

terrestre, a conduit à d'étranges résultats en géologie. C'est lui qui a porté à faire reposer pour ainsi dire toutes les causes générales dans le décroissement de la chaleur propre du globe ; et cette supposition dont nous avons déjà mesuré la portée dans la théorie des montagnes, nous la retrouvons encore dans les explications que l'on a voulu donner des grandes mutations climatériques. C'est surtout dans l'examen des changements progressifs de la végétation que l'on a été conduit à formuler plus nettement ces idées, et ce n'est que plus récemment que l'on a fait quelques tentatives pour y rattacher aussi les variations des espèces animales aux différentes époques géologiques.

Mais les faits ne viennent s'harmoniser ni avec la continuité, ni avec la généralité d'une pareille cause. Au lieu d'une température régulièrement décroissante, ils indiquent tantôt une longue persistance du même climat, tantôt des transformations brusques ou des récurrences plus singulières encore. D'autre part si l'on considère l'antique distribution des végétaux ou des faunes à chaque époque, on ne leur trouve plus avec la latitude cette relation qui existe d'une manière si tranchée au tems actuel. Les phénomènes présentés par la végétation houillère, dont l'uniformité se reproduit à toutes nos latitudes, sont l'expression la plus tranchée de cette anomalie, qui est loin de se borner d'ailleurs au terrain houiller seul.

Ce que l'on a trouvé de mieux à dire pour expliquer un pareil phénomène, c'est que jusqu'à l'époque houillère inclusivement, la chaleur intérieure avait été suffisante pour égaliser les températures solaires sur la surface du globe, et *uniformiser* les climats... Mais voici que cette opinion, poussée jusqu'à ses limites, va conduire à des conséquences singulières, fort éloignées sans doute des premières idées de ses auteurs. Dernièrement un paléontologue examinant les coquilles fossiles recueillies dans l'Amérique équinoxiale, en a trouvé un grand nombre d'espèces absolument identiques avec celles de notre terrain crétacé inférieur : comme rien d'ailleurs dans la position du calcaire où on les rencontre ne paraît mettre obstacle à cette assimilation, on est conduit à admettre qu'il appartient en

réalité à la période pendant laquelle s'est déposé le grès vert et le calcaire néocomien dans nos contrées. Mais il s'ensuit évidemment qu'il existait à cette époque une égalité de température entre l'Europe par 50° de latitude et la partie équatoriale de l'Amérique : appliquant donc à cette formation l'hypothèse qui est consacrée pour le terrain houiller, le même savant en a conclu que l'uniformité de température sur toute la terre avait été maintenue jusqu'à la période crétacée par l'influence de la chaleur intérieure, et dans cette conclusion il a été conséquent, rationnel, l'hypothèse une fois admise. Il a eu raison encore, lorsque l'observation de faits semblables dans les formations postérieures à la craie l'a porté à avancer que la même uniformité, et par une cause semblable, s'est prolongée jusqu'à nos jours, jusqu'à la catastrophe enfin qui a enveloppé d'un manteau de glace les éléphants de Sibérie. De sorte qu'à notre époque seule aurait été réservée cette distinction des climats et des latitudes, bien que son principe réside dans la forme même de la terre et qu'il ait toujours subsisté. Il n'y a qu'une seule chose à dire à de semblables conclusions, c'est qu'elles condamnent invinciblement l'hypothèse elle-même.

Examinons donc de plus près cette supposition de l'uniformité de température et jugeons si elle est possible; examinons surtout si la cause que l'on en donne est acceptable comme théorie.

Les plantes dont on rencontre les vestiges dans le terrain houiller du Spitzberg et du Groënland ne peuvent, comme l'on sait, supporter les faibles hivers de nos climats : pour qu'elles aient pu se développer dans ces hautes latitudes, où le froid descend jusqu'à la congélation du mercure, on accordera bien qu'une compensation de 40 à 50° de chaleur était nécessaire à ces variations extrêmes. C'est, suivant l'hypothèse, dans la chaleur propre du globe que cette compensation devait avoir sa source. Or je ne rechercherai pas si dans le tems écoulé depuis la période houillère la température propre de la surface terrestre a pu baisser de 50° à $\frac{1}{30}$, je ne rechercherai pas s'il y a proportion à cet égard dans la marche prétendue des dé-

croissances aux âges intermédiaires ; je me contenterai d'une seule observation : c'est que cette chaleur propre de la surface devait s'étendre sur tout le globe à la fois, et par conséquent s'ajouter aussi aux températures équatoriales, dans les contrées où le thermomètre s'élève maintenant à plus de 40° à l'ombre. Ainsi pendant que croissaient les végétaux du Spitzberg, les régions tropicales devaient éprouver d'une manière presque continue des températures de 90 à 100°. Pensera-t-on qu'aucune végétation semblable à ce que nous connaissons puisse supporter cette chaleur extrême, au degré de laquelle l'eau entre en pleine vapeur ?

Or que trouve-t-on dans les terrains houillers des Antilles, dans ceux de l'Amérique équinoxiale ? On y trouve des fougères en arbre, des équisétacées, des lycopodes... identiquement comme dans le Nord. Et si l'on vient à prétendre que leur époque d'existence n'est pas absolument la même, je dirai que cela importe peu, il suffit (ce qui est prouvé) qu'elles appartiennent à des périodes géologiquement voisines, pour que l'on puisse considérer ces deux végétations comme contemporaines, car dans une question semblable un million d'années de plus ou de moins ne fait absolument rien.

Supposer qu'à une époque quelconque, et dans les conditions astronomiques du globe, une végétation uniforme a pu se répandre de l'équateur aux pôles, c'est pendant cette période anéantir le soleil même, car à lui seul il produit une différence de 80° qu'aucune végétation connue ne saurait supporter. L'addition d'une chaleur uniforme sur toute la surface de la terre augmentera bien celle des rayons solaires, mais elle n'en peut effacer les inégalités, et pour supporter à la fois l'augmentation et la différence il faudrait non plus les genres connus, mais des êtres organisés d'un tout autre ordre. Or il est fort remarquable que parmi les espèces fossiles de tous les tems, végétales ou animales, on n'ait encore trouvé en aucun point de la terre quelque genre qui s'éloigne assez de ceux d'aujourd'hui pour que l'on puisse rationnellement lui supposer une organisation capable de supporter de plus hautes températures que les plus

hautes de nos jours. On n'a cité encore que la végétation houillère qui par ses formes colossales relativement à ce que présentent aujourd'hui les mêmes genres, puisse porter vers cette supposition : et cependant est-ce une chose bien démontrée que la flore arborescente de cette époque, dont on voit encore revivre quelques vestiges, corresponde même à ce qu'il y a de plus brûlant dans nos climats actuels ? Il y a lieu de croire qu'il n'en est pas ainsi.

La végétation houillère se distingue par le développement presque exclusif d'une classe particulière de végétaux, les cryptogames vasculaires ; les fougères y occupent la plus grande place, et les fougères arborescentes, si rares aujourd'hui, y atteignent de très grandes dimensions. Mais est-ce donc là la végétation des tropiques ? Est-ce là même sa tendance ? non, les dicotylédones au contraire y dominant, et sont relativement beaucoup plus abondantes que dans la flore boréale. Aussi l'illustre voyageur qui a si bien étudié ces contrées sous tous les points de vue scientifiques, M. de Humboldt, remarquant en quelle faible proportion se trouvent les fougères dans les forêts équinoxiales, s'écrie-t-il : « La végétation houillère n'est donc pas tropicale ! » Cette exclamation inspirée par la vue des lieux à un pareil observateur équivalait à tous les commentaires.

Les fougères arborescentes font il est vrai leur habitation ordinaire dans quelques îles des tropiques ; on les rencontre toutefois encore à la Nouvelle-Zélande, par 45° de latitude, et il paraît que la circonstance la plus influente sur leur développement est surtout l'humidité et l'égalité générale de température que donne l'entourage de la mer. Mais il est dans l'habitation de cette famille végétale une circonstance de la plus grande signification climatérique, qui a été trop peu remarquée encore : c'est que dans les contrées tropicales les fougères en arbre n'habitent point les plaines, elles se tiennent sur des plateaux d'une hauteur de 2.500 à 3.000 pieds et il ne paraît pas qu'on les ait observées au-dessus de 1.200 pieds ; or on sait que dans la distribution générale des végétaux l'influence des hauteurs joue un rôle principal, et qu'elle équivalait en

quelque sorte à une différence de latitude, puisqu'elle entre aussi bien qu'elle dans la détermination des climats. Un savant botaniste et géologue allemand, le Dr Link, a signalé cette circonstance remarquable de l'habitation des fougères arborescentes, avec les réflexions qu'elle est de nature à suggérer.

« L'habitation des plantes, dit-il à ce sujet, ¹ paraît dépendre exclusivement du climat. C'est une chose bien connue, que les plantes qui dans les contrées chaudes habitent les montagnes végètent très bien dans les plaines des contrées froides... ce phénomène est encore plus frappant à l'égard des arbres. Le bouleau commun décore les plaines de la Prusse et des pays du Nord, tandis qu'en Portugal on ne voit qu'une petite forêt de bouleaux sur le sommet de la Serra Maraño et en Italie sur celui de l'Aspromonte. Les hêtres les plus beaux croissent dans l'île de Séelande, le Holstein, le Meklembourg, mais l'espèce manque en Portugal; en Italie on ne la trouve que sur les montagnes élevées, etc... » C'est ainsi que dans son voyage de l'Inde, Victor Jacquemont était frappé de retrouver dans la haute vallée de Cachemire et sur les pentes de l'Himalaya une végétation si analogue à la nôtre. Et dira-t-on par exemple que l'arbre à thé est caractéristique des chaleurs tropicales, parce qu'il croît naturellement sur les pentes moyennement élevées des montagnes qui séparent l'Inde de la Chine par 23° de latitude? Il en doit être semblablement des fougères en arbre. « Nous possédons en Allemagne, dit encore le Dr Link, une fougère arborescente, *le struthiopteris germanica*, dont la tige reste naine, mais qui pour cela n'en est pas moins arborescente. C'est un phénomène remarquable que cette fougère, presque la seule qui soit arborescente dans les régions du Nord, n'habite que les marais froids de la Suède ou nos montagnes d'Allemagne, par exemple le Harz près d'Andreasberg, les Alpes de la Styrie, de la Carniole et de la Hongrie. »

Pensera-t-on après ces réflexions que la végétation houil-

¹ Dr Link, Le monde primitif. Traduction française, tome II, p. 99.

lière caractérise un climat beaucoup plus chaud que nos températures tropicales actuelles? Concluera-t-on qu'elle annonce un développement beaucoup plus grand de la température propre du globe? Je ne le pense point, puisqu'elle n'indique même pas quelque chose de comparable au climat de nos plaines des tropiques. Néanmoins ce n'est pas à dire pour cela que l'époque houillère ne soit caractérisée par une distribution toute particulière de la chaleur sur la surface de la terre, et qu'elle ne forme une grande anomalie climatérique, si on la compare à notre état présent; mais dans quel sens est cette anomalie, quelle est sa nature et sa cause, tout cela est encore une question, et l'on peut affirmer que les théories géologiques n'ont encore rien fait pour la résoudre.

Si les débris fossiles n'annoncent pas une décroissance considérable dans la température générale du globe, annoncent-ils au moins une continuité dans la marche des températures aux mêmes lieux? Pas davantage; ils signalent au contraire des passages brusques, des persistances et des mutations bien tranchées, et des récurrences même dans des sens opposés, phénomènes aussi contraires que possible à une marche progressive. Ce n'est point par une transition graduelle que l'on passe des cryptogames du terrain houiller à la stérilité du grès des Vosges, aux cycadées du terrain jurassique, aux conifères éminemment tropicaux des Wealds et du grès vert, aux fucoïdes des profondes mers de la craie, aux palmiers de la première époque tertiaire, aux chênes et aux peupliers de la seconde, aux éléphants et aux cocotiers de la dernière? Est-ce par une transition graduelle que l'on voit le terrain à lignites de Toscane, avec ses feuilles de saule et ses végétaux de nos climats, surmonté par le terrain du Val-d'Arno, avec ses mammifères tropicaux et ses noix de conifères des Antilles?

Un des traits les plus remarquables de ces transformations climatériques, c'est de persister pendant toute la durée de chaque époque, et cependant ces époques sont immenses; après chacune d'elles au contraire le changement est presque toujours brusque, quelquefois complet, et souvent signalé par des modifications inverses.

Quant à l'espace, la discordance par localités, c'est-à-dire la loi des climats à chaque époque, n'est pas encore entrée aussi bien dans le domaine de l'observation : c'est que dans l'étude de deux contrées éloignées la géognosie procède par analogies, par la comparaison des semblables ; l'étude des dissemblances ne vient que la dernière. L'assimilation de deux terrains éloignés dont les fossiles ne se ressemblent point ne saurait provenir que d'un classement négatif, d'un classement par exclusion, et c'est ce que les géologues n'ont pas encore osé faire, c'est ce qu'ils ne peuvent même faire avant que la généralité des formations ne soit imposée par la science comme nécessité théorique. Il n'est pas difficile de déduire cependant que cette dissemblance locale, que cette loi de distribution climatérique a dû exister à chaque époque, mais qu'elle a dû exister fort différente de ce qu'elle est aujourd'hui. Si par exemple il a été reconnu que sensiblement au même tems des mammifères tropicaux et même des quadrumanes ont vécu d'une part au pied des Pyrénées de l'autre au pied de l'Himâlaya, et ont réalisé ainsi la similitude de température à des latitudes si différentes, que se sera-t-il passé en d'autres points du globe ? la même chaleur y aura-t-elle existé ? Mais alors nous retombons dans cette loi de l'uniformité climatérique prolongée jusqu'à nos jours, que nous avons proclamée impossible. Une différence existe donc quelque part, mais les lacunes de la géologie pratique, mais le voile des mers étendu sur une grande partie des latitudes empêchent de les constater avec précision, et l'on n'a fait encore à ce sujet d'observations suivies que sur de petits espaces.

En comparant par exemple les fossiles des dépôts tertiaires de Paris et de Londres avec ceux de Bordeaux et de la Sicile ¹, on a remarqué une décroissance calorifique en raison inverse de la latitude, de telle sorte que les fossiles de Bordeaux indiquent une mer moins chaude que ceux de Paris, et ceux de Sicile une mer moins chaude que les fossiles de Bordeaux. Ma's

¹ Lyell, principles of Geology, tom. 1, p. 143.

nous ne tirerons pas avantage de cette comparaison, car il nous paraît évident qu'elles embrassent des terrains d'âges divers; elles prouvent seulement une différence assez tranchée entre les températures de latitudes voisines dans un intervalle géologique restreint, et à cet égard les faits étaient déjà nombreux. De ceux-ci M. Lyell croit pouvoir tirer cette conclusion, que la température générale a baissé graduellement depuis le commencement de la période tertiaire; mais le raisonnement se détruit de lui-même si l'on trouve au-dessus des terrains tempérés de Bordeaux et de la Sicile des terrains indiquant un climat beaucoup plus chaud, et si d'autre part on rencontre avant notre époque des preuves d'un climat beaucoup plus froid que le nôtre: or les fossiles tropicaux du val d'Arno et du diluvium prouvent le premier phénomène; le second est prouvé par les coquilles arctiques que l'on rencontre sur quelques plateaux des côtes de l'Angleterre et de l'Ecosse, peut-être aussi par l'ours des cavernes si semblable à celui des mers glaciales, et le chapitre suivant montrera ce fait d'un refroidissement excessif constaté par des caractères d'une bien autre portée.

Il y a donc eu en réalité dans la distribution climatérique sur le globe aux anciens âges quelque chose de spécial à chaque époque, un ordre différent de la distribution actuelle, et qui a pu être inverse. L'étude de la végétation houillère et même celle d'époques plus récentes prouve de plus que l'essence même, si l'on peut le dire, des lois climatériques a pu être complètement changée.

Toutes ces choses étaient bien connues par les faits, et cependant on les tient pour simples et naturelles. Elles ne sont ni simples ni naturelles, elles indiquent au contraire la subversion de toutes nos idées climatériques et elles réduisent toutes les théories géologiques à l'impuissance tant qu'une cause réelle de ces faits n'y sera pas indiquée. Le refroidissement du globe, cause continue et éminemment faible, ne saurait, nous l'avons vu, s'y adapter; quant au fracassement du sol et au soulèvement des chaînes de montagnes, c'est un effet et non pas une cause, et son influence sur les climats ne peut être ni effective ni persistante. Il est donc vrai qu'aucune des

causes physiques jusqu'aujourd'hui signalées n'a de valeur relativement aux faits dont nous parlons ; c'est ce qu'il était essentiel de reconnaître, et nous ne pensons pas énoncer un résultat d'une médiocre importance en concluant ici :

Que ni la température propre du globe ni les mouvements partiels de sa surface n'ont pu avoir une grande influence sur les modifications de climats dans les âges géologiques ;

Que chacune de ces modifications dérive d'une cause plus énergique, d'une cause *instantanée et persistante*, qu'il y a lieu de croire universelle, et qui dans sa puissante action a non seulement interverti le cours local des climats, mais en a changé même et la distribution générale et les lois essentielles.

Cette cause, d'autres phénomènes viendront nous l'indiquer, et nous en marqueront des effets plus saisissables. Avançons d'un pas de plus dans sa recherche en suivant la trace récente d'une des plus puissantes modifications climatiques qu'ait éprouvé le sol de l'Europe, et dont l'étude nous fournira non pas seulement une des limites extrêmes de ces grandes mutations, mais une première et précieuse indication sur leur origine.

CHAPITRE IV.

DES BLOCS ERRATIQUES

ET DE L'ÉPOQUE DES GRANDES GLACES EUROPÉENNES.

Des blocs de roches énormes, principalement granitiques, partis des hauts sommets des Alpes, ont été, traversant tous les lacs de la Suisse, se poser sur les flancs calcaires du Jura jusqu'à des hauteurs de 1.200 mètres.

Ces blocs de dimensions colossales et embrassant quelquefois plus de 10.000 mètres cubes¹, se trouvent portés à des distances de 20 ou 30 lieues de leur origine sans que souvent leurs angles se trouvent émoussés, sans qu'ils aient perdu dans ce transport la saillie et je dirais presque la fraîcheur de leurs arêtes. Ils reposent sur des roches en place d'une faible dureté sans les avoir ni fracassées ni entamées, sans y montrer enfin la trace de leur chute ou celle d'un choc impétueux.

Non seulement ils ont traversé des lacs et des vallées profondes pour remonter sur les pentes opposées, mais ils ont franchi encore des montagnes élevées, et l'on trouve dans les vallées de l'Isère, par exemple, des fragments granitiques de la haute chaîne des Alpes qui ont passé par-dessus des cimes calcaires de 3.000 mètres de hauteur.

De tous côtés ces blocs rayonnent autour de la masse alpestre, tantôt s'alignant de niveau sur les versants des grandes vallées, tantôt s'échelonnant sur les pentes qui leur sont opposées, tantôt s'amoncelant dans les plaines en amas inco-

¹ Il y a de blocs de plus de 20 mètres sur chacune des trois dimensions.

hérents. Ils y sont groupés comme par familles, chaque vallée apportant le tribut des hauts sommets dont elle descend, charrié à d'énormes distances et souvent à de grandes hauteurs.

Le nord de l'Europe présente des phénomènes du même genre plus surprenants peut-être. Des blocs de dimensions considérables, dont les roches en place ne se trouvent qu'en Finlande se sont répandus sur les plaines de la Russie et de la Pologne, jusqu'aux environs de Moscou, en parcourant jusqu'à l'incroyable distance de 250 lieues; d'autres dérivant de Suède et Norwège se trouvent jetés sur les plaines de la Prusse, de Meklembourg, du Danemarck, et même sur les côtes orientales de l'Angleterre. Pour parvenir à de telles distances ils ont dû franchir le golfe de Finlande, la Baltique, la mer du Nord, comme les blocs de la Suisse ont franchi le lac de Genève. Enfin après d'aussi monstrueux parcours les angles de ces blocs, et surtout des plus gros, sont souvent aussi vifs que s'ils venaient de se détacher de leur place, et on les trouve souvent enfouis dans un sable coquiller ou dans une argile présentant toutes les apparences d'un dépôt paisible.

Dans les contrées d'où sont partis ces blocs si bien nommés erratiques, des traces d'érosion bien remarquables viennent cependant attester le passage d'agents puissants. Une partie des rochers de la Scandinavie et de la Finlande est non seulement usée mais polie par le frottement; des cannelures rectilignes et parallèles les sillonnent, tantôt sous forme de larges entailles demi-cylindriques, au canal arrondi, tantôt sous celle d'une multitude de stries fines et déliées, qu'on dirait taillées au diamant. Les Alpes présentent aussi fréquemment ces roches polies, ainsi que ces cannelures, et les vastes croupes granitiques du Grimsel offrent un des beaux exemples de l'un et l'autre phénomène.

Mais comment associer ces marques d'érosion avec la non-oblitération des angles dans les grands blocs erratiques? Quelle est donc la force qui a dispersé au loin ces vastes débris, en traçant de si puissants sillons, et en même tems quels sont les rouages qui ont pu en amortir la violence dans le transport de pareilles masses?

Les faits que je viens de rappeler constituent donc un des plus étranges problèmes qui soient fournis par les faits modernes de la géologie ; aussi ont-ils depuis plus d'un demi-siècle excité de diverses manières l'imagination des observateurs et donné lieu à un grand nombre d'hypothèses ; mais toutes, jusqu'à ces derniers tems, étaient venues échouer contre de grandes improbabilités physiques. Je ne citerai que pour mémoire les jets volcaniques de Deluc, le plan incliné de Dolomieu, les courants de MM. de Buch, Escher, et même les radeaux de glace de Venturi ; ces hypothèses n'ont qu'un médiocre rapport à mon sujet et il ne m'appartient point de les discuter ; d'autres auteurs se sont chargés de ce soin à plus juste titre. Ils ont montré comment des torrents boueux ne sauraient avoir assez de vitesse ni des torrents rapides assez de consistance pour produire même une faible partie de ces effets ; qu'un plan incliné partant du sommet des Alpes jusqu'au Jura n'aurait que 2° de pente... Ils ont indiqué en un mot tout ce que les anciennes hypothèses ayaient d'insuffisant dans leurs moyens. Je ne veux point reproduire ces détails.

Mais ces dernières années ont vu éclore et se développer une théorie, née de l'observation des montagnes, qui par la précision de son analyse et par l'importance de ses résultats relativement à l'état climatérique du globe pendant une période récente, me paraît devoir jouer un grand rôle dans les théories géologiques. Je veux parler de l'hypothèse qui attribue ce phénomène si longtemps inexplicable des blocs erratiques à une vaste extension des glaciers sur divers massifs montagneux, et qui envisageant ces blocs comme leurs moraines, considère par suite les grandes alluvions connues sous le nom de diluvium comme le produit de la fusion progressive de ces glaces.

Cette hypothèse qui vivait déjà, comme il le paraît, dans l'imagination naïve des montagnards de la Suisse, a été scientifiquement énoncée pour la première fois par M. Venetz, mais mise au jour il y a quelques années par M. de Charpentier et développée récemment par lui dans son remarquable ouvrage : « Essai sur les glaciers et sur le terrain erratique du bassin du

Rhône. » Indépendamment de la netteté avec laquelle elle rend compte des phénomènes dans les Alpes, et qui la rend précieuse à tous les esprits soucieux de la vérité, elle a en outre pour le sujet général qui nous occupe une importance très grande. En accusant un long et considérable abaissement de température sur la surface de l'Europe et en signalant de puissants effets de l'influence climaterique, *qui seule agit dans le mouvement des glaciers*, elle doit contribuer encore à faire récuser ces idées plus ingénieuses que réelles qui font reposer tous les phénomènes géologiques sur le refroidissement progressif de la terre. Mais elle aura pour nous une portée plus grande et plus précise, qu'il n'est pas tems d'indiquer encore.

La théorie des glaciers appliquée à la dispersion des blocs erratiques est passée dans le domaine de la science, elle est bien connue par les discussions récentes auxquelles elle a donné lieu, et surtout par l'exposition si claire et si complète qui en a été faite dans le livre de M. de Charpentier; je n'en ferai donc que l'énoncé le plus rapide, me bornant à exposer les principes strictement nécessaires pour assurer les conséquences que nous voulons tirer de cette étude.

C'est un fait depuis longtemps connu des montagnards, que les glaciers cheminent avec les blocs souvent gigantesques qu'y jettent les avalanches ou la chute des aiguilles culminantes, et que peu à peu ces blocs sont apportés sur le dos du glacier jusqu'à ses accotements et jusqu'à sa partie terminale où ils entassent les amas informes connus sous le nom de *moraines*. Le mécanisme de ce mouvement ainsi que de l'émersion constante des blocs à la surface des glaciers est encore une des conquêtes de la théorie moderne. Les glaciers, produit de l'endurcissement des neiges sur les hautes montagnes, par l'infiltration et la congélation des eaux, ne sont plus seulement, comme le pensait Saussure, une longue traînée déclive que son poids pousse et entraîne sans cesse vers la partie inférieure, et à la surface de laquelle le froid des nuits et la chaleur des jours exercent leur influence alternative.

Ce sont les alternances de la chaleur d'été et du froid hivernal bien plutôt que la pesanteur qui produisent la marche des

glaciers. ¹ En été la chaleur solaire et peut-être plus encore l'évaporation (c'est-à-dire le renouvellement d'un air chaud et sec) fondent les glaciers à leur surface, et l'eau, résultat de cette fusion, va s'infiltrer dans les fissures et dans les tuyaux capillaires des parties inférieures. Dans l'hiver suivant, la dilatation qu'éprouve cette eau pour passer de nouveau à l'état de glace produit une expansion du glacier dans les deux sens où il est libre (en longueur et en hauteur, l'encaissement ne permettant point la dilatation latérale), et le ramène ainsi plus ou moins exactement à son ancien niveau. Ainsi quoique la figure générale du glacier ne varie que dans d'étroites limites, l'ablation annuelle de la couche supérieure et l'émersion des autres par accroissement interne produit un déplacement général de la masse et son renouvellement complet au bout d'une période suffisamment longue. Si maintenant un bloc de rocher vient à se trouver jeté et enfoui au fond d'une des vastes crevasse qui s'ouvrent sans cesse à la surface du glacier, il va suivre, sans quitter cette place, le mouvement de transport de la glace elle-même, et décrivant la diagonale des deux mouvements longitudinal et vertical, il parvient ainsi obliquement à la surface au bout d'un tems plus ou moins long, et il continue à y cheminer. C'est donc la rénovation interne du glacier qui produit le rejet apparent des blocs, et comme ils suivent le mouvement de la glace elle-même, ils arrivent ainsi intacts à la moraine, sans avoir subi ni frottement ni brisure.

Il n'en est pas ainsi du fond sur lequel marche le glacier, il éprouve par ce mouvement incessant un frottement continu qui l'use et le polit, et lorsque des fragments de roches se trouvent encastrés dans le fond mobile de la glace, ils tracent sur les rochers en place, que le glacier recouvre ou cotoie, les sillons ou cannelures parallèles au mouvement, c'est-à-dire à la direction de la vallée où il est encaissé.

Ce polissage des roches et ces sillons parallèles tracés sur

¹ L'alternance diurne de température ne pouvant pénétrer qu'à une très mince profondeur n'a qu'une influence insensible sur le mouvement des glaces. Il n'y a point de glaciers sous l'équateur.

leur surface sont pour ainsi dire une marque caractéristique des glaciers, et aucun autre agent d'érosion connu ne saurait reproduire ces effets. Les eaux torrentielles en corrodant les roches ne leur donnent point ce poli parfait et uniforme, car elles en usent inégalement les diverses parties selon leur dureté; les galets qu'elles entraînent avec elles n'y font que des cannelures tortueuses, et sur le lit des cascades ce ne sont le plus souvent que des trous verticaux produits par le tourbillonnement des pierres mobiles : bien différentes par ces caractères des sillons tracés par les glaciers, sillons toujours ouverts ou hémicylindriques, toujours rectilignes, et groupés par lignes parallèles. L'eau non plus, avec les agents qu'elle entraîne, ne peut rayer ou polir que le fond de son lit, et non point tracer sur des faces verticales, ou même inclinées, des sillons horizontaux. Il n'y a qu'un solide fortement encastré qui puisse produire tous ces effets; or c'est là le cas des glaciers, qui à leur jonction avec les roches en place enclavent nécessairement des fragments détachés, anguleux ou arrondis, et qui dans leur mouvement de progression et d'expansion les appuient incessamment contre la surface irrégulière du sol, où ils tracent ainsi comme en traits de burin leur marche rectiligne. Ces phénomènes ne sont point d'ailleurs des conséquences seulement possibles, mais des conséquences nécessaires du mouvement annuel des glaces, et on les a retrouvés en effet sous les glaciers de la Suisse partout où, par leur retraite, ils ont laissé momentanément à nu la surface des terrains qu'ils recouvraient : mais la description de ces faits et le développement de ces idées appartient aux observateurs et aux savants qui dans ces dernières années ont fait faire de si grands pas à la théorie des glaciers, et parmi lesquels M. Agassiz doit occuper par ses travaux une place toute spéciale.

C'est la considération des blocs erratiques qui paraît avoir porté plus fortement l'attention sur le mouvement et les effets des glaciers. Déjà pour expliquer la dispersion de ces grandes masses anguleuses à de si lointaines distances sur les plaines du nord de l'Europe, on les avait fait charrier par des glaces flottantes; mais cette hypothèse ne pouvait s'appliquer aux blocs

des Alpes, jetés qu'ils étaient au sommet des montagnes. M. Elie de Beaumont avait toutefois réuni cette idée à celle des courants, en supposant que lors du dernier soulèvement des Alpes un fracassement des glaciers et une fusion subite des neiges avaient pu les entraîner avec une rapidité extrême jusqu'aux points élevés où ils se trouvent placés, ou en encombrer les plaines au débouché des grandes vallées : mais cette conjecture, qui rendait plus probable en effet l'ancienne hypothèse des courants en lui donnant une cause et un instrument de plus, présentait, outre les difficultés de détail, ce grand inconvénient de l'instantanéité, si difficilement compatible avec l'immense quantité des blocs, celle des galets diluviens, et avec la masse des eaux qui eût dû remplir subitement et à une si grande hauteur toutes les vallées des Alpes; ce n'était donc qu'un acheminement à introduire la considération des glaciers dans le transport erratique. L'étude locale seule, l'habitation journalière au milieu de ces accidents, l'observation fréquente et habituelle de la disposition des blocs et pour ainsi dire de leur physionomie distinctive, pouvaient conduire à la véritable théorie : c'est cette étude en effet qui a porté à l'évidence l'analogie complète qui existe entre la position, soit générale soit individuelle, des blocs erratiques sur les pentes ou dans le fond des vallées de la Suisse, et celle qu'ils occupent dans les *moraines*, c'est-à-dire dans les entassements qui bordent actuellement de toutes parts les glaciers à leur portion décline.

Cette idée avait pu, avait dû venir déjà à l'esprit des montagnards, qui jugeant par analogie dans leur sphère restreinte, sont enclins à étendre outre mesure l'effet des causes visibles : mais pour qu'elle s'établît dans l'esprit d'un savant, qui d'une vue générale pouvait embrasser l'énormité de la portée climatérique d'une pareille hypothèse, il fallait un grand travail de l'observation et de la pensée, il fallait que la conviction y eût jeté de bien profondes racines.

Car il ne s'agissait de rien moins que d'étendre sur toute la surface des Alpes les embranchements d'un vaste glacier, qui au-dessus du niveau des lacs serait monté en masse continue sur les pentes du Jura jusqu'à 1.200 mètres de hauteur.

Cette idée s'est cependant établie, et depuis que la masse des observateurs a tourné ses études vers ce point de vue, il est bien difficile de résister à son évidence. Il ne m'appartient pas d'entrer dans les détails de cette théorie des glaciers appliquée au transport des blocs erratiques; elle est trop bien décrite et trop fortement appuyée de preuves dans l'ouvrage de M. de Charpentier, et les observations qui s'y rapportent sont déjà trop générales pour que je puisse essayer de les grouper. Disons seulement qu'elle s'harmonise avec une netteté remarquable à toute la série des faits que les autres théories n'approchaient pas de faire concevoir, qu'elle les embrasse dans leur ensemble et dans leurs détails les plus spéciaux; qu'en un mot elle seule est à la mesure de ce grand phénomène, qui dans son excentricité avait défié jusqu'ici tous les efforts de l'imagination.

Le dépôt d'immenses blocs de roches lointaines à de grandes hauteurs, et leur dépôt sans secousse et sans frottement; l'entassement irrégulier de ces blocs sous forme de remparts au débouché des vallées principales; leur classement par groupes similaires et pour ainsi dire par provenances locales; enfin leur nature même, qui est celle des hauts sommets, seuls en saillie au-dessus des glaciers.... Tout se coordonne merveilleusement à cette supposition et ne concorde avec aucun des autres. Seule elle explique le transport des blocs par-dessus des vallées, des lacs et même de hautes montagnes.

La considération des roches polies et sillonnées, que l'on retrouve à de grandes distances des glaciers modernes, vient encore concourir avec celle des blocs pour constater leur ancienne extension et en fournir la trace. Le polissage des faces verticales ou même en surplomb, et le creusement de sillons parallèles, exactement rectilignes, qui ne saurait convenir à l'action des eaux, est au contraire un effet évident du mouvement des glaces; et ce qu'il y a de bien remarquable c'est qu'on ne retrouve ces roches polies qu'au dessous du plan qui joindrait les plus hauts blocs erratiques aux plus hauts sommets de montagnes dont ils proviennent.

Enfin l'hypothèse des grandes glaces une fois admise, il n'y a

plus de difficulté à concevoir, par leur fusion progressive, résultat d'un climat plus tempéré, l'étendue et la puissance de ces nappes alluviennes à gros fragments qui se prolongent à de grandes distances des montagnes, jusqu'aux plaines de la Crau par exemple; on pourra expliquer ainsi la grosseur décroissante des galets proportionnelle à l'éloignement, et enfin ces vastes dénudations qui dans une période récente ont creusé nos formations les plus modernes sans laisser trace de leurs débris. Ces faits s'expliquent en effet beaucoup mieux par une action lente et progressive, par une longue intumescence des cours d'eau, que par la violence instantanée d'une débâcle.

Mais l'hypothèse étant accordée pour les Alpes, il y a lieu de se demander si elle est applicable au déplacement des blocs scandinaves, et si l'on devra couvrir tout le nord de l'Europe d'un vaste manteau de glaces depuis le pôle jusqu'au parallèle de 50°. Cette immense étendue des glaces du nord n'est pas d'une nécessité absolue; la position de certains blocs au milieu d'un sable coquiller s'oppose d'ailleurs évidemment à cette hypothèse dans toute sa rigueur. On peut y échapper en ajoutant celle du transport par les glaces flottantes.

Le resserrement récent de la mer Baltique et son extension autrefois plus considérable sur les côtes qui la bordent aujourd'hui, ne saurait en effet demeurer douteuse. La présence des serpules encore fixées à de grandes hauteurs sur les rochers des rivages, les hautes plages coquillères que l'on rencontre dans tout le nord de l'Europe, et enfin l'enfouissement des blocs eux-mêmes et des roches polies sous le sable marin, en sont des preuves assez positives. Ce n'est pas le lieu de rechercher les causes de ce retrait de la mer ni peut-être de l'envahissement qui l'a précédé, cette considération trouvera sa place par la suite, mais il faut accepter le fait. Or on sait, par l'étude des contrées boréales, que toutes les fois qu'un glacier est en contact avec la mer, il est démantelé par elle; il se brise à la surface des eaux et ne pénètre pas dans la profondeur. Soit donc que cette récente extension des eaux de la Baltique et de la mer du Nord ait été contemporaine des glaciers qui auraient couvert les montagnes de la Finlande et de la Nor-

wège, soit surtout qu'elle leur ait été postérieure, comme nous l'indiquerons par la suite, on conçoit que son action sur eux ait pu en détacher de grands radeaux flottants avec les blocs qu'ils supportaient, et les faire échouer sur les plaines de la Prusse, de la Pologne, du Danemark ou même de l'Angleterre.

Il n'en faut pas moins admettre toutefois une vaste extension des glaces sur les montagnes de la Scandinavie et de la Finlande, d'où les blocs sont émanés; et les sillons tracés sur les rochers dans toute l'étendue de ces contrées en sont d'ailleurs une marque incontestable. En vain a-t-on fait intervenir des courants violents partis du nord, en vain s'est-on appuyé sur une certaine constance de direction dans les cannelures: cette constance ne paraît pas exister en réalité, et d'après les plus récentes observations, les sillons de Norwège suivraient, comme ceux des Alpes, la direction des vallées en divergeant des crêtes de toutes parts. Ce n'est point l'eau d'ailleurs qui aurait pu polir et strier les faces opposées et quelquefois toutes les faces d'un rocher en saillie, sillonner des plans verticaux de cannelures horizontales, et en couvrir même des surfaces concavés en surplomb au-dessus de la mer.¹

Il est toujours fâcheux dans les sciences d'avoir recours pour expliquer les faits à une cause dont l'action n'est pas bien connue, seulement parce que cette cause est plus simple, plus commode ou plus facile à concevoir. Lorsqu'un autre principe d'action dont nous connaissons bien les effets s'adapte avec exactitude à la loi des phénomènes, fût-il beaucoup moins vraisemblable on ne saurait hésiter à l'admettre de préférence: car toute la question scientifique réside dans le rapport exact de la cause à l'effet, et quant à la plus ou moins grande vraisemblance des causes ce ne saurait être qu'une considération relative à l'état actuel des idées, par conséquent susceptible de se modifier avec elles. Ainsi donc une vaste extension des glaciers

¹ Voir pour tous ces faits le rapport de M. Elie de Beaumont sur un mémoire de M. Durocher. Institut, 1842. Et une note de M. Daubrée à la société géologique, Bulletin, tome 14.

rendant compte de toutes les circonstances du phénomène erratique, nous sommes philosophiquement contraints d'en admettre la réalité, le champ restant d'ailleurs ouvert pour la recherche des causes climatériques qui ont pu amener ce résultat et pour celle de leur liaison avec les faits connus de la géologie.

Cette tâche reste en effet tout entière, et quoique ce soit déjà un pas immense pour la théorie que d'avoir reconnu dans l'extension des glaces l'agent immédiat du phénomène erratique, la question se trouve seulement déplacée et le problème qui semblait porter auparavant sur le déploiement de forces naturelles immenses en intensité, vient porter maintenant sur les causes inconnues d'un grand abaissement de température, immense en durée.

Je dis immense en durée, et je le dis à dessein, parce que loin d'être une objection à craindre, c'est là selon nous le principal et peut-être le plus utile caractère de la théorie des glaciers appliquée au phénomène qui nous occupe; et il est essentiel de se faire à cet égard des idées exactes sur les conséquences nécessaires de cette théorie.

Le sillonnement des roches et le transport des blocs à de grandes distances ne saurait résulter d'un froid subit et passager étendant momentanément son action sur une chaîne de montagnes comme les Alpes. En premier lieu cette influence passagère ne pourrait couvrir d'un puissant manteau de glace une telle masse montagneuse et ses vallées profondes; mais le pourrait-elle encore, l'entassement des moraines et le creusement des rochers exigent impérieusement des conditions qui ne sauraient être remplies ni par un froid excessif et continu, ni par un froid de médiocre durée. C'est l'alternance des saisons, c'est leur intermittence régulière qui joue le plus grand rôle dans le mouvement des glaciers, il ne faut point l'oublier; ainsi toute cause d'abord qui tendrait à effacer cette intermittence, toute idée systématique qui s'attaquerait à son principe même, je veux dire à la chaleur solaire dans son intensité, ne nous paraît pas mériter une attention sérieuse; et l'hypothèse d'un froid excessif étendu à la fois sur tout le

globe se trouve exclue par la nature même des faits, comme elle l'est, nous le verrons, par leur disposition sur la surface des continents. La modification qui a donné lieu aux glaces des Alpes et de la Scandinavie se trouve donc renfermée dans la limite des faits actuels du globe : ce n'est pas un changement inusité de température, c'est un changement de *climat*, et un changement permanent dont l'intensité s'efface même, pour ainsi dire, devant l'énormité de la durée, prolongée infiniment au-delà de ce qui peut appartenir à un fait local ou accidentel. Quelques considérations nécessaires vont éclaircir cette idée.

Le glacier qui recouvrait à l'époque erratique la grande vallée du Rhône devait avoir 60 lieues de long, plus de 200 lieues carrées de surface, et 3000 pieds d'épaisseur. Un pareil amas de glace ne se forme pas en un instant et n'est pas le produit de quelques hivers. Indépendamment de sa durée ultérieure, il y a déjà une longue succession de tems indiquée par sa formation même, et à laquelle on ne saurait échapper : un glacier est un terrain qui s'accroît avec la lenteur des alluvions, et dont l'âge séculaire est marqué à la fois par son étendue et par sa puissance ; il peut même jusqu'à un certain point être soumis au calcul, et nous essaierons de poser quelques approximations à cet égard.

Les glaciers ne s'accroissent en épaisseur réelle que par la chute des neiges sur les sommités, ou au moins par la portion persistante qu'elles y laissent ; en d'autres termes, ils ne s'accroissent que par la différence entre l'eau congelée qui tombe et l'eau fondue qui s'écoule. Or il est facile de voir que cette quantité de l'accroissement a toujours dû être excessivement faible. On a évalué en effet qu'il pouvait descendre des Alpes une quantité d'eau annuelle correspondant à une hauteur de 2 mètres à 2 mètres 50 sur la surface de la haute chaîne. Si l'on observe maintenant qu'il ne tombe pas à Paris plus de 60 centimètres d'eau par an et si l'on joint encore les effets de l'évaporation sur les neiges et les glaces, on reconnaîtra que quelque puisse être l'excès de neige tombée dans la région élevée des Alpes sur l'eau pluviale qui tombe à Paris, la diffé-

rence avec l'eau écoulee ou évaporée dans ces montagnes doit être extrêmement petite, lorsqu'elle existe; elle n'existe maintenant que par intervalle. Par un froid beaucoup plus considérable qu'à présent, nul doute que cette quantité de neige persistante ne fût fortement augmentée; mais la proportion n'en saurait être telle, qu'en lui donnant un quart de mètre de hauteur annuelle on ne doive être toujours fort au-dessus de la vérité. Or à ce taux il aurait fallu 4000 ans pour amener le glacier de la vallée du Rhône à l'épaisseur de 1000 mètres qu'il devait avoir. Et cette durée est indépendante encore du nombre d'années nécessaires pour le conduire progressivement jusqu'à la base du Jura, jusqu'au point où l'équilibre a pu exister entre sa fusion et son accroissement.

On pourrait contester peut-être ce résultat en disant qu'il n'y avait qu'une augmentation du glacier et non sa formation de toutes pièces; mais en supposant qu'une partie de la hauteur de ces glaces fût formée déjà, en partant de l'état actuel par exemple, il n'en faudrait pas une période beaucoup moins longue pour l'avancement seul et l'augmentation du glacier, car l'avancement dérive aussi bien de la chaleur des étés que du froid des hivers, et il n'est pas certain qu'un grand abaissement climatérique seul augmente beaucoup la puissance d'extension. Or au taux actuel il faudrait 800 ans pour que les glaces parvinssent seulement du Mont-Blanc au Jura; et combien faudra-t-il ajouter pour qu'elles s'y élèvent à 1200 mètres? Car les glaciers des sommités sont loin de cette épaisseur.

Or s'il y a en réalité un événement local qui puisse devenir une cause de froid, en saurait-on imaginer un qui prolonge une telle influence pendant plus de 40 siècles? Est-il soulèvement de montagnes, crevasses, évaporations, mouvement des eaux, qui puisse donner idée d'un pareil effet? Mais que sera-ce lorsque l'on viendra à considérer la durée du glacier, une fois son point d'équilibre dépassé? Soumis alors à une rénovation indéfinie sans que varie sa forme, rien ne limite la période de tems pendant laquelle il a pu entasser tous ces blocs qui ont formé ses moraines, rien, si ce n'est leur nombre même. Mais ce nombre c'est une immensité.

Lorsque l'on considère la petite quantité de blocs jetés actuellement sur le dos des glaciers et que l'on arrête sa vue sur la faible étendue de leurs moraines, où ces blocs s'entassent cependant depuis l'origine de la période actuelle ou même peut-être depuis bien au-delà des cinq à six mille ans que l'histoire de l'homme peut embrasser; lorsqu'ensuite on compare cette quantité avec la masse énorme soit des blocs erratiques soit des galets diluviens qui en proviennent, l'imagination demeure confondue. Les nappes diluviennes des plaines de la Suisse et de l'Italie relevées en amas au-dessus du niveau des lacs et entassées avec les blocs erratiques qui s'échelonnent sur les pentes des Alpes et du Jura, feraient surgir sans doute une cime rivale des plus hauts sommets de ces montagnes; et le tems employé soit à la destruction de toutes ces roches, soit à leur transport successif jusqu'aux extrémités des glaciers, comparé à ce que nous voyons, exalte si fortement l'idée de la durée, que l'on n'ose pas en supposer une limite même approximative. L'évaluation de cette durée est en un mot du même ordre que celle de ces immenses masses de temps dont nous avons vu que se compose l'ensemble d'une formation géologique.

Le phénomène erratique des Alpes est donc bien autre chose qu'un accident, bien autre chose qu'un fait climaterique isolé: c'est une *époque* tout entière qui vient prendre sa place dans le grand classement des formations.

Maintenant si le dépôt erratique des Alpes a exigé une durée équivalente à une période géologique, que dira-t-on du même phénomène dans le nord de l'Europe? Sa durée ne sera-t-elle point la même? Et si elle est la même, n'y a-t-il pas lieu d'identifier ces deux époques? Il serait bien difficile d'imaginer que des phénomènes *climateriques* si voisins par l'espace et si longs en durée puissent être sans liaison l'un avec l'autre; et il n'y aurait guère place ni sur le globe ni dans l'ordre des tems pour leur séparation. Or si une même époque embrasse en effet ces deux longues débâcles climateriques, si je puis m'exprimer ainsi, il en résulte cette conséquence, que la surface de l'Europe

tout au moins a été pendant cette fraction des divisions géologiques dans un état d'équilibre tout différent du nôtre, et poussé jusqu'aux limites extrêmes des climats actuellement connus. C'est un résultat précisément inverse de celui qui à des époques antérieures et subséquente a fait habiter nos contrées par une végétation et des animaux des climats chauds, dont les espèces ont persisté aussi pendant toute la durée d'une période : mais quoiqu'inverse c'est un phénomène du même ordre, ce n'est qu'un fait de plus à ajouter à ces mutations brusques et persistantes que nous signalions précédemment, c'est l'exemple le plus tranché de ces récurrences étonnantes dans les climats qui ont signalé plusieurs des grandes révolutions du globe.

L'introduction de cette époque des glaces au milieu des formations géologiques fournit toutefois un élément de plus dans la question de leur origine et un élément précieux par les traces si distinctes qu'il nous a laissées. Leur distribution géographique a été étudiée dans ces derniers tems et un grand ensemble de faits a été constaté ; mais on n'en a pas tiré encore toutes les conséquences qui en dérivent ; et si l'on a été conduit à des hypothèses impossibles ou qui par leurs résultats ont pu servir à décrier la théorie des glaciers, cela tient en partie à une analyse incomplète des faits d'observation. On s'était égaré lorsque l'on avait voulu faire du phénomène erratique un fait purement local, ou considérer séparément son action dans deux contrées qui ne sont point suffisamment éloignées ; on s'est égaré aussi lorsque voulant l'étendre à tout le globe on n'a pas tenu compte des discordances géographiques.

Nous avons vu en effet que ce phénomène dépendait d'un certain équilibre climatique longuement persistant, et ce n'est pas là une influence que l'on puisse isoler quant à l'espace. On a beau nommer prudence cette allure commode de la théorie qui divise au lieu de grouper et qui fait restreindre une explication à un fait local, sans l'engager pour tous les autres faits semblables. Dans une étude comme celle de l'histoire du globe il n'est pas permis d'isoler l'un de l'autre deux faits qui ont pu avoir entr'eux une relation de simultanéité ou

de similitude; et se borner à une explication qui ne peut convenir qu'à l'un d'eux c'est se réduire de plein gré à toute l'inutilité d'une théorie insuffisante. D'autre part si l'on veut grouper tous les faits pour les faire concourir à une idée d'ensemble, il faut bien prendre garde d'étendre l'action d'une même cause plus loin que l'observation ne le permet. C'est l'écueil que n'ont pu éviter les géologues qui ont attribué le phénomène erratique à un refroidissement général étendu sur toute la surface du globe terrestre. Un rapide examen local fera ressortir notre pensée et nous amènera sur la voie d'une hypothèse nouvelle, plus en harmonie avec les faits.

Les traces d'anciens glaciers ont été retrouvées sur presque toute la surface de l'Europe, mais non point partout avec une égale intensité. Nous avons cité déjà la Scandinavie, la Finlande et les Alpes; mais il est essentiel de remarquer une disparité dans l'intensité du froid qui a dû régner dans ces localités diverses. Le peu de hauteur relative des montagnes du nord relativement aux Alpes et la grandeur des effets que les glaces y ont toutefois produits témoignent d'abord d'un froid plus considérable dans les régions boréales que dans le sud de l'Europe, ce qui semble au premier aspect assez conforme à l'idée d'un abaissement général de température qui aurait suivi la loi des latitudes. Mais ce qui vient s'y opposer, c'est que les sillons et les blocs erratiques sont plus fréquents dans le sud de la presqu'île Scandinave que dans le nord des mêmes contrées.

A une latitude un peu moins élevée, sur le sol de l'Ecosse les traces d'anciens glaciers sont fréquentes, les moraines y abondent; et en Angleterre, quoique l'on ne trouve les blocs de provenance lointaine que sur les côtes orientales, le phénomène erratique a aussi son action indigène: le Rév. Docteur Buckland cite en effet les traces du séjour des glaces dans les montagnes du nord du pays de Galles

En France, elles se retrouvent dans le massif si peu élevé des Vosges, autour duquel les blocs, partis des sommets culminants, s'étendent en éventail comme autour des Alpes. Dans les Pyrénées les phénomènes du même genre sont assez forte-

ment accusés pour que l'on ait lieu de s'étonner qu'ils n'aient excité que médiocrement l'attention jusqu'à ces derniers tems. Ils y sont cependant extrêmement marqués et l'empreinte de l'action des glaciers s'y montre de toutes parts : j'en ai pu suivre les traces dans toute la longueur des Hautes-Pyrénées, de la vallée de l'Ariège au méridien de Pau, et les glaciers qui couvraient ces montagnes devaient s'étendre transversalement jusqu'à plus de 40.000 mètres de leur crête. Sur les flancs de toutes les grandes vallées qui en descendent, et surtout à leur issue vers les premières plaines, sont répandus des blocs provenant des plus hauts sommets, et de nature granitique partout où le granit y occupe le faite¹. Les alluvions à énormes

¹ M. de Charpentier, qui a tout vu dans les Pyrénées, cite de mémoire dans son *Essai sur le terrain erratique*, les principales localités où l'on rencontre dans ces montagnes des amas de blocs transportés; quoiqu'il n'en eût pas fait mention dans son ouvrage sur la géologie des Pyrénées, il les avait remarqués bien avant que la théorie des glaces ne pût leur être appliquée, et d'autant plus qu'il n'y a point pour ainsi dire de véritables glaciers dans ces montagnes. Ce qu'il n'avait pu y observer, parce que ce phénomène n'était point connu alors, ce sont les sillons parallèles sur la surface des rochers en place : ils y existent également. J'en ai remarqué des traces fréquentes sur les flancs de la vallée qui descend des lacs d'Oo, près Bagnères-de-Luchon, et quelques-uns y offrent même cette particularité très intéressante, d'être inclinés en contrepente de la vallée, comme je l'ai reproduit dans la fig. 4, pl. II : on ne saurait rien voir qui soit plus opposé que cette disposition à l'idée d'un courant descendu des sommets de ces montagnes, tandis qu'elle n'a rien de contraire au mouvement des glaces sur un sol accidenté. J'ai trouvé aussi près de Rimont (Ariège), à plus de 40.000 mètres du faite de la chaîne, des calcaires nouvellement mis à nu qui étaient couverts de ces stries fines, parallèles par groupes, mais formant quelquefois deux systèmes entrecroisés, traces qui appartiennent d'une manière si caractéristique au burin des glaciers.

Quant aux amas de blocs, j'ai signalé dans ma coupe (pl. 1^{re}) au débouché de la vallée de Luchon, une de ces anciennes moraines granitiques où l'on reconnaît avec évidence la nature des granits des hauts sommets. A l'autre extrémité des Hautes-Pyrénées les villages de Cauterets et d'Argelez, si bien connus des touristes pyrénéens, sont assis sur deux moraines, granitiques aussi, et de ce côté les glaciers devaient descendre fort bas, puisqu'on rencontre des amas de vastes blocs sur la route de Bigorre à Pau, non loin de

fragments roulés qui couvrent toutes les plaines au pied de la chaîne, offrent encore d'ailleurs cette particularité caractéristique, que tous les galets y sont formés de roches anciennes venues uniquement des sommets, circonstance dont la déduction est évidente.

Dans un voyage récent fait à travers la Turquie d'Europe par des géologues peu partisans de la théorie des glaciers et qui par conséquent n'en recherchaient point les vestiges, on a retrouvé cependant dans les montagnes de l'Albanie des roches polies et striées et même des amas de blocs interceptant les vallées, où l'on ne saurait méconnaître d'anciennes moraines. Cette observation pour ainsi dire involontaire porte, aux yeux des observateurs accoutumés à cet ordre de faits, un caractère assez significatif; et elle achève d'enfermer la surface de l'Europe dans un réseau d'anciens glaciers. Si nous poursuivions plus loin encore, nous pourrions rappeler que l'on a dit avoir rencontré aussi des traces du phénomène erratique au nord de l'Afrique, sur les pentes de l'Atlas; et l'on ne saurait guère douter en effet que les grandes alluvions récentes de la plaine de la Mitidja n'aient pour origine la fusion des grandes glaces.

Voilà donc pour ainsi dire toutes les parties de l'Europe et même quelques contrées environnantes, qui portent la trace d'un vaste développement des glaciers, et sur lesquelles s'est étendue l'influence d'une longue époque de refroidissement.

Lourdes. Les vallées de l'Ariège, au-dessus de Foix et du Salat, près Saint-Martory, sont bordées en plusieurs portions de leur cours par de hautes falaises de blocs entassés, souvent anguleux, que les glaces seules peuvent y avoir charriés. Mais la localité la plus remarquable que je connaisse, sous le rapport du volume des blocs et de leur position, est le débouché de la vallée d'Oo, dont j'ai déjà parlé, dans celle de Larboust: elle a jeté sur les pentes schisteuses opposées, et souvent à de grandes hauteurs, de vastes blocs du granit si reconnaissable du port d'Oo, à larges cristaux de Feldspath. J'en ai mesuré un, prismatique, à arêtes aigues, qui avait 7 mètres de long et un volume de plus de 100 mètres cubes, ce qui est peu par rapport aux dimensions des grands blocs dans les Alpes, mais ce qui est beaucoup relativement à ce qui peut être regardé comme transportable par les agents connus.

Cette époque est partout très récente, et les lois de l'analogie engagent à conclure que dans tout cet espace les phénomènes ont été simultanés.

Mais leur intensité n'a pas été partout égale, elle ne présente pas non plus la loi de régularité que la distribution actuelle des climats pouvait faire soupçonner, et dans leur répartition d'ensemble on ne saurait trouver un rapport absolu soit avec la hauteur des montagnes, soit avec la latitude, soit même avec la combinaison de ces deux éléments. Or la recherche de ce rapport est d'un grand intérêt, car c'est de lui que doit dépendre la loi des climats pendant cette époque singulière et la question de son identité avec leur distribution actuelle. Il importe donc à cet égard d'interroger consciencieusement les faits.

On a vu que l'intensité du froid dans la Scandinavie avait été plus considérable que dans le sud de l'Europe : le même rapport se continue-t-il dans toute l'étendue des parallèles à l'équateur, et d'un parallèle à l'autre suit-il la loi de nos latitudes? Telle est la première circonstance à éclaircir. La distribution des blocs sur le sol de la Russie va nous donner à cet égard un utile enseignement, car leur dispersion est circonscrite dans de remarquables limites.

Les blocs erratiques qui recouvrent les plaines septentrionales de l'Allemagne et de la Russie s'étendent avec continuité au-dessus du 51^e parallèle, depuis les Pays-Bas jusqu'à la longitude de Moscou : mais près de cette dernière ville leur limite tourne brusquement vers le nord, et suit jusqu'à 60^o de latitude une ligne à peu près droite dirigée au N. N. E. ; de sorte que du côté de l'E. on ne trouve plus guère aucun bloc au-delà du 45^e degré de longitude.

Or comment se fait-il que sur les pentes de l'Oural, qui étend ses ramifications bien avant vers le Nord, les glaces aient fait sentir incomparablement moins leur influence que sur les parties basses de la Suède, de la Prusse et de la Russie occidentale? Pourquoi la dispersion des blocs et la trace des glaciers sont-elles moindres aussi sur le sol montueux de l'Écosse que dans le midi de la Suède, où la latitude est égale et le sol

plus déprimé? Mais ce n'est pas tout, passons en Asie, et sur cette terre de Sibérie si froide actuellement, au pied de l'Oural et de l'Altaï, les blocs ne se montrent plus et l'on ne voit plus rien de semblable ¹ aux phénomènes qui accidentent si remarquablement les contrées septentrionales de l'Europe. Dans ces dernières contrées elles-mêmes la loi des intensités ne se continue plus aux latitudes supérieures à celle de Stockholm et la trace des glaciers est beaucoup moindre en Laponie qu'en Finlande. Pour tout résumer en un mot, le phénomène des glaces semble tracer un cercle autour des rives de la Baltique et son intensité s'éteindre progressivement à mesure qu'on s'éloigne de cette contrée centrale.²

C'est là un ensemble de faits de la plus haute importance, non-seulement parce qu'il démontre que la distribution des climats était toute autre à l'époque des froids qu'elle ne l'est actuellement, mais parce qu'il va plus loin encore et qu'il tend à en établir la loi. L'anomalie de cette disposition est en effet si caractéristique, et ses indications sont si précises, qu'elles semblent prescrire à la théorie d'oser plus qu'on ne l'a fait encore : Si après avoir épuisé toutes les combinaisons hypothétiques compatibles avec l'état d'équilibre astronomique au tems présent nous ne pouvons encore satisfaire à l'impérieuse exigence des faits, n'y a-t-il pas lieu d'en chercher la dernière raison dans une modification de cet équilibre? Si la répartition du froid pendant l'époque glaciale ne saurait aucunement s'adapter aux relations climatériques déterminées par nos latitudes, à la position du pôle en un mot... N'osera-t-on rechercher si une autre répartition des latitudes, si *une autre*

¹ Je ne citerai point à l'appui de cette discordance le contraste des éléphants enfouis dans les glaces actuelles de la Sibérie; l'époque de ces mammouths doit être postérieure à celle des glaces européennes, et dans nos contrées aussi des ossements d'éléphants se retrouvent dans les dépôts qui ont suivi la période glaciale.

² M. Durocher à la suite d'un voyage dans le nord de l'Europe, a remarqué déjà mais sans lier cette considération de l'hypothèse des glaces, que les blocs erratiques semblent disposés sur une aire circulaire dont Stockholm occuperait le centre.

position polaire ne satisfèrait pas mieux que toute autre hypothèse à l'ensemble des faits d'observation ?

Ne prenons encore cette idée que pour un jeu fantastique de l'imagination, et cependant recherchons conditionnellement si l'on ne pourrait trouver une position du pôle capable de donner une solution à la question des glaces européennes... N'est-il pas vrai qu'en le supposant placé en quelque point de la Baltique, au nord de la Prusse ou de la Pologne, les faits y trouveraient une merveilleuse coordination d'ensemble ? Les montagnes de la Finlande et de la Norvège placées en latitude plus haut que n'est actuellement le Spitzberg ; la Laponie plus loin que la Finlande ; les Alpes et l'Écosse à 75°, les Pyrénées à 70 ; et les glaces s'étendant sur ces contrées en proportion de leur latitude et de la hauteur des montagnes ; la Sibérie au contraire se reculant vers l'équateur, et la partie septentrionale de l'Oural s'écartant peu de sa latitude actuelle. A quelle circonstance des faits européens une pareille combinaison ne satisfait-elle point ? ¹

Cette position de l'axe terrestre ne saurait embrasser il est vrai toutes les circonstances du phénomène erratique sur le globe : il est une contrée qui se trouverait ainsi rapprochée de l'équateur et qui cependant présente, au dire des géologues qui l'ont examinée, le phénomène erratique aussi fortement développé que dans plusieurs contrées de l'Europe : c'est la partie septentrionale des États-Unis d'Amérique, entre 35 et 50°, entre la latitude de l'Atlas et celle de Berlin. Si le froid était descendu du pôle jusqu'à ces régions, peu élevées d'ailleurs, on voit que son action aurait dû être bien plus énergique qu'en Europe ; mais rien n'indique qu'il en soit ainsi et que le phénomène erratique s'y continue fort avant au nord du Canada. Le froid étendu sur l'Amérique du nord ne paraît donc avoir

¹ Il n'est pas jusqu'à cette circonstance, jugée si favorable à l'hypothèse des courants, que les roches scandinaves ne sont pas polies du côté S.-S.-E., qui ne trouve ainsi son explication : ce côté, en effet, c'est le côté du pôle, où le soleil ne frappait point, et où le mouvement des glaces devait être bien moins considérable que du côté qui forme actuellement le nord.

aucun rapport ni avec la position actuelle de notre pôle, ni avec celle que nous avons imaginée pour l'époque des froids européens. Est-ce donc une circonstance invinciblement contraire à cette dernière hypothèse? Elle ne le sera point si l'on sépare les deux phénomènes par l'époque; elle ne le sera point si l'on vient à trouver par des considérations d'un ordre différent une autre position polaire qui satisfasse aux glaces américaines comme celle de la Baltique aux glaces européennes. Et cette position nous serons amenés plus tard à l'établir. Mais alors l'imagination n'ira-t-elle pas plus loin? Ne va-t-elle pas concevoir un changement de même espèce correspondant à chacune des époques qui se distinguent par une mutation bien tranchée dans toutes les conditions du développement organique? N'attribuera-t-elle pas à des causes semblables et l'apparition des végétaux des tropiques dans la zone glaciale, et la subite extinction des mammouths de la Sibérie, et toutes ces brusques variations de climat qui sont venues signaler les grandes révolutions géologiques?

Je n'irai pas plus loin dans la voie de ces conjectures : à l'analyse d'autres phénomènes il sera réservé de leur donner une forme et une consistance.

CHAPITRE V.

DU PHÉNOMÈNE DES FAILLES, DE SES LOIS ET DE LEUR CONSÉQUENCE.

« Toute la surface des continents, dit un savant géologue moderne¹, a été disloquée et brisée en fragments, et l'on rencontre difficilement une étendue de quelques milles carrés qui ne porte aucune empreinte de ces fractures. »

Rien de plus universel en effet, rien de si multiplié que ce phénomène de brisements alignés : dans l'étude ou le percement du sol, le géologue et le mineur le rencontrent pour ainsi dire à chaque pas ; et toutefois, quant à la portée théorique, ce n'est point encore par ce caractère de généralité qu'il mérite d'exciter le plus fortement l'attention. Son indépendance de tous les autres mouvements qui ont accidenté la surface de la terre et surtout les lois régulières auxquelles il se coordonne l'élèvent, au point de vue philosophique, à une place bien plus importante ; et il y a lieu sans doute de s'étonner que sous le rapport des causes on ait fait faire encore si peu de progrès à son étude. Il semble que toutes les recherches systématiques aient oublié jusqu'à ce jour, il semble que depuis Werner il n'ait guère dépassé le point où ce grand observateur l'avait laissé ; et cela est d'autant plus remarquable que de tous les faits de la géologie physique il est le premier dans lequel on ait reconnu des lois de régularité et de symétrie, indice certain d'une cause générale.

¹ M. de la Bèche, *Recherches sur la partie théorique de la géologie.*

Cependant l'étude des lois constantes auxquelles le phénomène des fractures du sol est assujéti peut et doit devenir féconde ; à elle appartient de fournir pour l'histoire de la terre d'indispensables enseignements, puisque ce phénomène entre comme partie essentielle et indépendante dans tous les bouleversements généraux qu'a pu éprouver sa surface. C'est en effet sous ce point de vue d'ensemble qu'il convient de le considérer ici, c'est par l'étude de ses relations générales qu'il peut venir concourir puissamment à la recherche des causes qui ont amené les révolutions du globe et servir à en préciser la nature.

Ce qu'en géologie l'on nomme *faille* est, comme l'on sait, une fracture ordinairement plane, diversement inclinée à l'horizon quoique approchant cependant de la position verticale, et de part et d'autre de laquelle les deux parties du terrain désuni ont changé de niveau respectif, sans que le plus souvent l'inclinaison générale des couches en ait été notablement affectée. (Pl. II, fig. 5.)

Les filons métallifères n'étant, suivant la judicieuse théorie de Werner, que des fentes remplies après coup, peuvent être considérés comme des modifications du même phénomène et sont soumis aux mêmes lois.

Parmi les caractères communs à ces deux ordres d'accidents il en est trois qui méritent une attention particulière : la constance de leur direction rectiligne, le parallélisme de cette direction dans les fractures contemporaines, enfin le fait si remarquable de leur inclinaison sur la verticale.

Il y a longtemps que les mineurs ont reconnu que les filons et les failles, s'étendant toujours horizontalement en ligne droite, sont généralement réunis par groupes d'orientations parallèles, et qu'une fracture qui traverse et rejette un filon, traverse sous un angle constant et rejette également dans le même sens tous les filons ou failles du même système de direction. C'est un des principaux titres scientifiques de Werner d'avoir le premier systématisé ce résultat d'expérience, et d'en avoir déduit l'idée d'une succession chronologique dans les filons métallifères : idée qui promettait d'être si

féconde si on la met en parallèle avec celle de la succession des terrains, mais qui cependant n'est pas encore sortie des applications pratiques, et n'a reçu jusqu'aujourd'hui aucune portée remarquable vers l'avancement de la science générale. Dans les idées de Werner cette succession chronologique était la partie saillante du phénomène, et dans sa théorie des filons il ne cherche pas à faire ressortir d'autre caractère général des fractures : mais comme il avait trouvé que partout où deux filons se rencontrent il arrive toujours que l'un traverse l'autre et lui est par conséquent postérieur pour l'époque, il en déduisait nécessairement que les fractures de même âge ne se rencontraient point, qu'elles étaient *parallèles*¹. Ce corollaire était rigoureux, mais aux yeux de Werner il n'avait que la valeur d'un corollaire, il n'était que la réalisation d'un principe que l'on aurait pu rationnellement supposer à l'avance. Nous n'en jugerons pas ainsi, et nous penserons que pour la valeur théorique l'importance du corollaire s'élève bien au-dessus du théorème principal.

La constance de l'alignement et le parallélisme des directions contemporaines forment en effet théoriquement le premier et le plus largement significatif de tous les caractères que présente dans ses relations générales le phénomène des fractures ; il forme un lien évident entre ce phénomène et celui de l'inflexion des couches et de l'élévation des montagnes, assujéti aux mêmes lois de direction rectiligne et de parallélisme. Considéré philosophiquement et en faisant acception de sa généralité, ce caractère ne saurait appartenir qu'au résultat de forces qui auraient affecté d'un même coup une grande portion si ce n'est la totalité du globe ; car tous les phénomènes locaux qui se dessinent et se délimitent sur une portion restreinte de la sphère y doivent marquer une courbe plus ou moins prononcée, et le parallélisme ne saurait exister dans de semblables conditions. Il n'y a que les grands cercles de la sphère et leurs parallèles géométriques auxquels puisse appartenir cette double propriété d'une direction constamment rec-

¹ *Nouvelle théorie des filons*, § 61, page 116.

tiligne et d'un parallélisme indéfini¹. Ce trait caractéristique, qui s'applique à la fois aux fractures et aux ridements montagneux, dessine nettement ces deux ordres de faits comme appartenant à des modifications générales du globe terrestre.

En admettant donc l'unité de cataclysme pour chaque changement d'époque, il y aurait lieu de conclure déjà que le phénomène des failles et celui des chaînes de montagnes ont été périodiquement simultanés. Si l'on y joint l'identité possible dans la direction de leurs alignements successifs, la réalisation de cette conjecture établirait une solidarité presque complète entre les deux phénomènes. Cette solidarité a cependant des limites, elle n'embrasse pas tous leurs caractères, et nous avons vu déjà que la différence absolue qui existe dans le sens des forces qui les ont respectivement produits, je veux dire dans l'inclinaison de ces forces par rapport à la verticale, établit entr'eux une véritable indépendance : indépendance mieux établie encore par ce fait bien connu, que les failles accidentent aussi bien les terrains demeurés horizontaux, que les couches dérangées et infléchies ; leur action est beaucoup plus générale en un mot que celle des ridements. Or il ne peut être sans importance de soumettre à un examen particulier les caractères spéciaux qui différencient ce mode remarquable de perturbation et lui assignent un rôle propre dans la distribution des forces qui à diverses périodes ont démantelé la surface de la terre.

Les deux principaux caractères qui appartiennent spécialement aux failles sont d'une part la différence brusque de niveau qu'elles déterminent entre les deux portions, aupara-

¹ On a reconnu des lignes de fracture s'étendant avec continuité sur des longueurs de 20 ou 30 lieues, notamment en Angleterre et en Irlande, et le parallélisme se soutenant dans toute cette étendue. Lorsque nous aurons essayé de démontrer plus tard que le cours *rectiligne* des grandes vallées est dû en général à des fractures, nous fournirons par là-même des applications plus larges encore et plus facilement saisissables de ce principe des longs alignements. Quant aux filons métallifères, on sait que le Mordlauer en Franconie a 18.000 mètres de longueur reconnue, le filon de Guanaxuato au Mexique 12.700 m.

vant contigues, du terrain qu'elles traversent; de l'autre le phénomène de l'inclinaison dans les plans de fracture. Le premier de ces effets, la différence de niveau, est le plus saisissable et le plus intéressant dans la pratique de la géologie, parce qu'il amène à des hauteurs identiques deux étages distincts par leur époque de formation et souvent par leur nature minéralogique¹. Ce caractère est aussi le plus important dans l'exploitation souterraine. Aussi en absorbant presque exclusivement l'attention l'a-t-il trop détournée d'une propriété plus remarquable peut-être dans sa généralité, je veux parler de l'inclinaison.

On sait que le plan des failles, quoique plus rapproché en général d'être perpendiculaire que parallèle à l'horizon, est toutefois assez rarement d'une verticalité complète, les grandes failles surtout, celles qui déterminent l'abaissement de niveau le plus considérable, sont presque toujours inclinées. L'angle de ces plans avec la verticale oscille ordinairement entre 0 et 45°, il atteint même assez fréquemment cette dernière limite, mais il ne la dépasse guère. Or maintenant de quelque manière que l'on cherche à expliquer les fractures, il faudra que ce phénomène de l'inclinaison vienne entrer dans leur explication pour une part indispensable, principale peut-être, car c'est selon nous celui qui s'écarte le plus fortement de toutes les idées admises sur la nature des forces qui ont pu jouer un rôle dans les mouvements de la surface du globe. On se forme facilement une idée de forces verticales, dues à la pesanteur; de forces sensiblement horizontales, qui peuvent être dues à la contraction; de forces enfin divergeant simultanément dans tous les sens, qui appartiennent à l'éruption: mais de forces inclinées agissant avec *régularité* sur de longs espaces et soumises à des lois d'alignement et de parallélisme, nous ne nous

¹ Nous devons rappeler ici que cette différence de niveau varie en général entre 0 et 300 mètres. On a cité des failles de 500 mètres, celles par exemple que M. Elie de Beaumont a signalées comme formant la délimitation des Vosges; mais ce sont des cas isolés et qui sortent tout-à-fait des valeurs ordinaires. Les grandes failles ne varient habituellement qu'entre 50 et 200 mètres. Ces résultats seront utiles par la suite.

en formons nulle idée. Cette considération ressortira bien plus fortement lorsque nous viendrons à examiner dans ses conséquences la relation qui unit cette propriété de l'inclinaison avec celle du changement de niveau, constant résultat des forces de fracture.

La relation dont nous parlons peut se résumer en grande partie dans un principe général, dont la portée a toujours été méconnue ou même tournée, comme nous le montrerons, vers de fausses conséquences. L'expérience a démontré cette loi pour ainsi dire universelle, que dans une faille inclinée c'est toujours le plan supérieur de fracture qui est descendu par rapport au plan inférieur, comme si l'une des portions du terrain formant un plan incliné immobile, l'autre portion non soutenue était venue à glisser sur lui par sa pesanteur¹. Ce principe souffre peu d'exceptions, et elles paraissent se borner d'ailleurs à des différences de niveau peu considérables : il est pour ainsi dire absolu pour les grandes failles et pour toutes les failles fortement inclinées.

La règle que nous venons de citer est déjà anciennement connue, puisque Werner la cite à l'appui de sa théorie des filons²; depuis lors l'observation, agrandie sans cesse par le travail si étendu des mines de houille, lui a donné la force d'une loi. Considérant cette loi dans ses apparences les plus circonscrites, Werner et bien des géologues après lui en ont déduit cette conséquence erronée, que les failles étaient dues à des mouvements du sol où la pesanteur avait dû jouer le principal et pour ainsi dire l'unique rôle. Nous montrerons bientôt l'insuffisance de cette supposition, qui a le grand tort d'envisager isolément des faits identiques et simultanés qu'il est essentiel de grouper au contraire si l'on veut parvenir à des conséquences générales irréprochables.

Si l'on considère la relation des failles contemporaines l'une

¹ C'est ce qui est indiqué par cet adage des mineurs, « que dans toute faille c'est le toit qui a glissé sur le mur. »

² Werner, *Nouvelle théorie des filons*, traduction de M. d'Aubuisson, page 99.

avec l'autre, soit dans leur rapport d'inclinaison, soit à l'égard des variations qu'elles déterminent dans le niveau général d'une contrée, on verra que l'observation théorique a encore négligé à ce sujet une particularité précieuse et tout-à-fait caractéristique. Il est extrêmement remarquable que tout en occasionnant dans les terrains des abaissements locaux souvent considérables, les failles dans leur ensemble ne paraissent jamais abaisser ou élever définitivement, sur de grandes étendues transversales, tout un niveau géologique. En voyant une dépression brusque et puissante signaler le voisinage immédiat d'une fracture, on pourrait croire qu'il va en résulter l'effondrement lointain de toute une formation; mais le plus souvent il n'en est rien, et l'on voit peu à peu le niveau des couches revenir à son ancien horizon : ce mécanisme s'opère de deux manières qui sont indiquées par les fig. 13 et 14, (Pl. II), tantôt par une série de petites failles relevant le terrain en sens contraire de la première, tantôt par l'inclinaison même des couches qui suit aussi le sens inverse du glissement dû à la fracture. Cette dernière disposition, résultant d'une série de failles qui abaissent toutes un terrain dans le même sens, sans changer son niveau général, donne quelquefois à la structure extérieure du sol une physionomie particulière, qui avait fait dire à Pallas par exemple que les collines de la Crimée imitaient les dents d'une scie.

On voit par ces deux exemples que les inclinaisons des failles semblablement orientées, c'est-à-dire contemporaines, penchent tantôt dans le même sens et sont alors sensiblement parallèles, tantôt penchent en sens contraire, tout en conservant la loi de glissement que nous avons indiquée. Les observations géologiques montrent au reste que le parallélisme absolu existe le plus ordinairement pour les grandes failles lorsque l'on fait abstraction des petites fractures interposées qui viennent contrarier leurs effets; mais ce qu'il est essentiel et suffisant pour le moment de constater, c'est qu'il n'est nullement rare de rencontrer une suite continue de fractures contemporaines parallèles en inclinaison comme en direction, et par conséquent échelonnant dans un même sens les

relevements du niveau des couches. Cette circonstance exclut évidemment l'action générale de toute force uniquement verticale dans le phénomène des failles ; exclusion qui sera bientôt plus rigoureusement établie. Mais elle indique de plus que sous le point de vue théorique les failles ne sauraient être considérées seule à seule, elles forment nécessairement des groupements d'ensemble, dont on ne peut séparer les diverses parties.

Quoiqu'il en soit de l'inclinaison des failles, on ne saurait cependant y méconnaître une tendance prononcée vers la verticale, et par conséquent une disparité bien tranchée avec le soulèvement des rides montagneuses, où les forces agissantes ont dû partout s'écarter peu de l'horizon. Est-ce à dire pour cela que le phénomène des fractures planes soit complètement affranchi de l'action de ces dernières forces, qui ont exercé simultanément une si grande influence sur la structure des terrains ? Nous allons voir qu'il n'en est pas ainsi. Il est en effet une circonstance très remarquable dont nous n'avons pas encore tenu compte et qui mérite cependant d'être spécialement signalée : les parois des failles présentent fréquemment des surfaces polies, striées même et sillonnées de cannelures dans le sens où a dû avoir lieu le mouvement. Ces faces polies, assez fréquentes pour avoir reçu des mineurs anglais un nom particulier, se montrent sur les roches même les plus dures ; elles ne peuvent s'expliquer que par une pression extrêmement énergique des faces de joint l'une contre l'autre pendant le glissement, pression à peu près normale au plan des failles : or comme les failles approchent généralement d'être verticales, la force de pression doit approcher de l'horizontalité.

On a toujours considéré ces surfaces polies comme dépendant du glissement même, et de la pesanteur imprimée par la masse des terrains en mouvement. Cette explication suppose d'abord que la pesanteur soit l'agent principal dans les fractures, ce qui n'est nullement prouvé et ce que nous contredirons formellement ; mais elle est repoussée d'ailleurs par deux faits dont la conséquence est évidente : c'est que les sur-

faces polies s'observent aussi bien dans les failles verticales que dans les failles inclinées, et qu'on les trouve dans celles qui n'ont produit qu'un glissement de quelques mètres comme dans celles dont la différence de niveau est la plus considérable. Il n'est point admissible, je pense, que la pesanteur puisse avoir une composante horizontale; il ne l'est guère davantage qu'un glissement de quelques mètres puisse polir des faces en contact par le poids seul du terrain en mouvement. Une force spéciale, une force puissante est donc ici une supposition nécessaire: elle répond à ces efforts immenses qui pendant que les fragments disloqués du sol variaient de niveau dans le sens vertical, ont comprimé, refoulé horizontalement les terrains et soulevé les longues lignes montagneuses.

La considération des forces normales au plan des failles implique encore une autre conséquence, elle nécessite l'action d'un autre genre de forces, celles d'expansion. Nous voyons en effet que les deux parois de ces fentes sont assez rarement juxtaposées l'une contre l'autre, comme elles devaient l'être dans leur état primitif: tantôt l'on y voit interposée une épaisseur régulière d'argile ou de dépôt limoneux évidemment postérieur à la formation de la fissure, tantôt ce sont des matières quartzeuses, spathiques ou métallifères et c'est dans cet état qu'elles constituent les filons. Or si les parois des fractures ont été, lors du glissement, fortement comprimées l'une contre l'autre, par quel phénomène ces parois se sont-elles donc écartées pour le remplissage? En vain a-t-on voulu expliquer les vides quelquefois peu réguliers des filons métallifères par le défaut de correspondance que le glissement amène entre les parties saillantes et rentrantes des faces ondulées de fracture: cette idée ingénieuse, émise déjà par Werner, ne saurait embrasser qu'une très petite portion des cas qui s'offrent dans la nature, tous les filons d'une puissance quelque peu notable lui échappent. L'irrégularité de puissance est d'ailleurs le cas exceptionnel dans les filons, leur épaisseur se continue le plus souvent sans de considérables variations sur de longues étendues; et cette circonstance établit non-seulement la nécessité d'une force d'expansion distincte, mais encore celle d'une force d'ex-

pansion *générale*. Car il est pour ainsi dire évident qu'aucun autre effet que celui d'une force de ce genre ne saurait produire cette identité d'écartement sur de longs espaces. Après celui de la généralité, le caractère le plus remarquable de cette expansion des fractures est d'être distincte du phénomène de glissement non-seulement par la direction dynamique, mais encore par le tems : car elle ne peut être simultanée de la compression normale que nous avons signalée, et rien n'empêche d'ailleurs de penser que l'intervalle entre l'action de ces deux forces ait pu être fort étendu, qu'il ait pu être équivalent à plusieurs périodes géologiques.

En résumé les trois forces distinctes de glissement, de compression, et d'expansion ultérieure se réunissent pour faire du phénomène des failles et des filons, sous le simple point de vue physique, un des plus compliqués et des plus intéressants que l'étude de la terre nous présente; dans la recherche des causes aucune de ces forces ne saurait être négligeable. Et cependant cette division nécessaire a toujours été oubliée : la géologie systématique n'a considéré jusqu'ici le phénomène que d'une manière beaucoup trop concise, et en traitant comme simple une action éminemment complexe on a été jeté dans de graves erreurs.

Werner qui a fait faire un si grand pas à la théorie des filons métallifères en démontrant qu'ils étaient dus au remplissage de fentes déjà formées et en marquant dans leur production une succession d'âge, Werner avait attribué la formation de ces fentes à des causes qui maintenant nous paraissent aussi singulières que lui semblaient à lui-même les hypothèses plus ou moins bizarres émises antérieurement à son époque, et qu'il énumère avec détail dans son ouvrage.

« Les montagnes ont été formées, dit Werner ¹, par l'accumulation de plusieurs couches ou assises placées et amoncelées les unes sur les autres. La masse de ces couches était au commencement humide et peu solide; de sorte que lorsque l'accu-

¹ *Nouvelle théorie des filons*, page 64.

mulation est parvenue à une certaine hauteur, la masse des montagnes a dû céder à l'action de son poids et par conséquent s'affaisser et se fendre.

» 2. Les eaux qui prêtaient un appui à des masses considérables de montagnes ont baissé de niveau : alors ces masses ayant perdu leur appui, ont également cédé à l'action de leur poids, se sont détachées et séparées du reste de la montagne et se jetant du côté qui se trouvait libre, c'est-à-dire du côté le moins soutenu.

» 3. Le retrait de la masse des montagnes opéré par le dessèchement et plus encore les tremblements de terre et autres causes semblables *peuvent aussi* avoir contribué à la formation des fentes. »

On voit par ce passage quelles idées étranges avait alors l'école de Werner sur le tems des dépôts de sédiment, sur le mode de formation des montagnes, et sur l'action des eaux de la mer, dont elle faisait un agent universel. Il semble en lisant ces lignes que l'accumulation séculaire des dépôts de l'écorce terrestre soit pour ainsi dire l'effet d'une précipitation instantanée, et que les montagnes se soient taillées dans le sein des eaux telles que nous les voyons actuellement, pendant le tems même de leur dépôt. On ne verrait pas sans surprise ces aberrations d'un aussi grand esprit que Werner, si l'on ne considérait quel était l'état de la géologie à son époque : on réfléchit alors combien la marche simultanée des sciences et le concours de tous peut aider aux conceptions de l'esprit et au développement même des plus hautes intelligences. Aussi de pareilles citations ne sont-elles pas sans intérêt pour l'étude historique de la géologie et même pour celle de l'esprit humain.

Mais l'observation a fait justice de ces erreurs, et à l'égard des filons spécialement les lois régulières qu'elle a mises en évidence n'ont plus permis de les considérer comme de simples affaissements produits par le caprice des terrains qui se tassent ou se dessèchent. En effet ce qui frappe en premier lieu dans les filons, comme dans les failles qui en sont le rudiment, c'est, comme je l'ai dit, leur constante direction rectiligne et

la régularité de leur parallélisme : s'ils étaient dus à des affaissements, ne serait-il pas bien extraordinaire qu'on n'en rencontrât pas un seul qui fût circulaire ou sinueux, tandis que nous voyons tous les effondrements, sur le flanc des volcans par exemple, présenter éminemment cette disposition arrondie ou cratérique. Mais le plus important et le plus significatif de leurs caractères en géologie, c'est de traverser constamment des formations tout entières : je ne sache pas une faille bien caractérisée qui s'arrête, par exemple, à la moitié du terrain houiller. Ce seul fait relie invinciblement les failles aux grands et universels cataclysmes qui à des époques déterminées ont brusquement rompu l'équilibre terrestre et renouvelé les formations géologiques ¹.

Ce qui achève d'établir cette relation, c'est l'étude des directions de fractures comparées avec l'âge des terrains qu'elles affectent exclusivement, et avec les directions des rideaux qui caractérisent ces époques. Ce rapprochement serait bien difficile, peut-être impossible pratiquement, à établir d'une manière complète, vu la multiplicité de ces accidents; cependant il existe beaucoup de faits qui peuvent servir à l'établir dans les cas particuliers et qui suffisent à constater la possibilité théorique d'une pareille coordination des fractures. Nous aurons occasion d'en rappeler un certain nombre lorsque nous en serons venus aux applications : ainsi M. Elie de Beaumont, dans son étude du massif des Vosges, trouvait que toutes les failles orientées au N.-N.-E. qui avaient accidenté le grès houiller et le grès des Vosges étaient antérieures au grès bigarré; ainsi dans tous les terrains anciens qui s'étendent des Pyrénées à l'Auvergne on trouve pour ainsi dire à chaque pas des filons orientés avec une constance remarquable de l'O 20° N. à l'E. 20° S., qui s'arrêtent au terrain houiller sans y pénétrer, ou qui viennent s'y ramifier et s'y perdre.

Ce résultat est aussi ce que les faits peuvent dire de plus éloquent contre la théorie qui attribue les failles à des mouvements progressifs du sol et non à des dislocations brusques et subites.

Mais des citations plus nombreuses seraient ici superflues parce qu'elles ne pourraient être suffisantes pour constater l'universalité du fait; j'aime mieux en appeler à l'expérience générale qui a constaté et fait admettre la liaison entre les grands systèmes de fractures et les époques géologiques, de telle sorte que cette proposition est pour ainsi dire passée en axiôme soit dans les applications à l'art des mines soit dans la pratique même de la géologie.

Mais cette proposition, une fois admise, donne à la recherche des causes qui ont pu produire les fractures un intérêt puissant. S'il est bien reconnu que la force qui à différentes époques a brisé l'écorce du globe en fragments parallèles par des fissures sans épaisseur et celle aussi qui a sur de longs espaces élargi ces fractures, soient liées aux forces d'un autre genre qui d'une part ont élevé les montagnes, de l'autre ont anéanti les races vivantes, quelle importance ne s'attache pas à leur étude? Et de l'appréciation de leurs effets ne doit-il pas ressortir un utile enseignement sur la nature des causes?

C'est dans cette voie que sont entrés les géologues qui abandonnant les idées de Werner sur la cause immédiate des fractures, ont cherché leur origine dans les forces soulevantes des montagnes, et admis en principe leur coordination avec les grandes lignes de soulèvement. Mais dans cette recherche l'analyse n'a pas été portée assez loin encore, ni pour les détails ni pour l'ensemble du phénomène. Quant aux détails je l'ai déjà montré; mais quant à l'ensemble il me reste à exposer des considérations nouvelles dont la portée est plus grande et les indications plus précises: elles tendent à exclure également les deux hypothèses émises jusqu'aujourd'hui sur la cause des fractures, celle du glissement par pesanteur ainsi que celle du soulèvement, et à introduire un point de vue tout spécial dans leur étude d'ensemble et dans la recherche de leur origine. C'est dans le phénomène si connu, mais si peu étudié encore, de leur inclinaison et dans ses rapports avec la loi de glissement déjà signalée que nous trouverons le principe de cette étude.

Le fait si général de l'inclinaison est par lui-même aussi sur-

prenant, qu'on l'envisage comme un effet de rupture par pesanteur ou comme un effet de soulèvement : car il semble évident que ces deux genres de forces devraient amener toujours des fractures presque verticales. Pour une force d'expansion intérieure, qui doit agir également dans tous les sens, ou pour la force de pesanteur qui n'agit que dans un sens unique, il semble que le plan vertical doive présenter la moindre résistance au mouvement. Tous les effondrements formés sous nos yeux présentent en effet, lorsque la roche est dure et qu'il n'existe aucune fracture déjà formée, des escarpements verticaux. Et lorsque le frottement seul peut retenir un corps pesant sur un plan incliné, comment imaginer que l'immense cohésion de la masse des terrains ait pu permettre si souvent la rupture sous l'angle de 45°? Car il ne s'agit pas ici de savoir si une masse de terrain non soutenue a pu glisser sur une pente déjà établie : il s'agit de savoir quelle est la force qui a déterminé l'angle de cette pente en rompant la continuité des couches. Quelle est d'ailleurs la force d'éruption ou d'affaissement qui pourrait produire une série de fractures consécutives parallèles et semblablement inclinées? Cette disposition ne saurait résulter que d'une direction particulière et constante dans la force qui l'a produite, elle indique invinciblement que cette force est soumise à une loi sinon étrangère à la pesanteur, du moins où la pesanteur serait modifiée d'une manière spéciale.

Mais il est une relation plus propre encore à prouver l'existence de cette loi et à éclairer dans sa recherche : c'est celle qui lie l'inclinaison avec la différence de niveau dans les failles, et qui se traduit, ainsi que je l'ai dit, par un glissement constant suivant la pente des plans de fracture. Cette loi, si simple en apparence, non-seulement exclut toutes les explications connues, mais nous verrons qu'elle porte la conception vers les plus vastes hypothèses.

L'idée de soulèvement ou d'affaissement implique toujours en effet celle d'un mouvement limité en étendue; et sous l'un ou l'autre de ces points de vue, plusieurs fractures parallèles, bien qu'elles puissent être indéfinies en direction, doivent né-

cessairement représenter le dérangement de niveau d'une certaine portion limitée du sol, ou en d'autres termes le déplacement d'une ou plusieurs zones de terrain, devenues mobiles, entre deux portions du sol demeurées fixes. Or je dis que de semblables conditions ne sauraient s'harmoniser avec la règle de glissement fournie par l'expérience universelle. Les failles parallèles admettent en effet, comme je l'ai indiqué, deux sortes de dispositions : ou elles sont semblablement inclinées et relèvent toutes le terrain dans un même sens, ou leurs inclinaisons et par conséquent leurs relèvements se contrarient. Examinons la première disposition, et prenons d'abord le cas le plus simple, celui d'une seule zone ABCD (pl. II, fig. 8) se mouvant par soulèvement ou affaissement entre deux fractures parallèles AB, CD. Il est de toute évidence que si dans la faille CD le plan supérieur a paru descendre relativement à celui qui le supporte, le contraire a nécessairement lieu pour la faille AB, et la règle de glissement s'y trouve ainsi en défaut. Si l'on voulait multiplier les zones mobiles, de quelque manière qu'on les dispose en conservant le parallélisme, et dans le cas même le plus favorable (fig. 9), il faudra toujours en venir à une dernière fracture où la règle dont nous parlons ne trouve plus son application et reçoit un contredit formel; il est à remarquer même que cette faille à glissement ascensionnel serait la plus grande de toutes, tandis que l'expérience fait voir au contraire que pour les grandes différences de niveau le glissement suivant la pente est d'une constance qui ne présente pour ainsi dire pas d'exception.

En combinant, dans les zones mobiles, des inclinaisons contraires, la réalisation théorique du principe de glissement ne sera pas plus heureuse. La seule disposition qui puisse en présenter les apparences est celle qui est donnée par les fig. 10 et 11 dans le double cas de l'effondrement et du soulèvement. Mais qui ne voit que ces deux dispositions, comme résultat local de l'une ou l'autre de ces forces, sont complètement imaginaires? Qui ne voit ce qu'elles ont d'éminemment contraire aux lois de la mécanique et à la répartition des résistances dans un mouvement de ce genre? Aux points en effet

où se manifeste le changement d'inclinaison, l'arrangement des plans de glissement se trouverait tel, qu'il devrait empêcher le mouvement loin de le faciliter. Il est de toute évidence, qu'en suivant la direction des forces telle qu'elle est indiquée, les deux massifs A, placés au point de changement d'inclinaison, feraient chacun l'effet d'une clef de voûte et rendraient toute progression impossible. Pour obéir aux exigences dynamiques, les rôles devraient être intervertis et la disposition des plans dans le cas de l'effondrement et dans celui du soulèvement devrait être bien plutôt représentée par celle des fig. 12 et 13, où le glissement apparent est partout en sens contraire de la pente.

Ainsi lorsque l'on considère un ensemble de fractures destinées à élever ou abaisser une portion limitée de terrain, toutes les combinaisons théoriques conduisent à des résultats incompatibles avec les données expérimentales.

Qu'il me soit permis d'arrêter l'attention sur cette conclusion, que jeregarde comme l'une des plus importantes que puisse fournir l'étude des mouvements du sol, et à laquelle un intérêt d'autant plus grand me paraît s'attacher, qu'elle porte sur des faits qui ont jusqu'ici passé comme inaperçus. Quand les réflexions que cette étude me suggère n'auraient point d'autre résultat que de signaler à l'attention des savants cette matière intéressante, je ne croirais pas avoir produit un travail tout-à-fait infructueux.

L'erreur où l'on me paraît avoir été jusqu'ici au sujet des filons et des failles est celle du point de vue où l'on s'est constamment placé. On a considéré chacune de ces fractures isolément et sans faire attention qu'elles délimitaient des masses de terrain élevées ou abaissées par rapport au niveau général de la surface du globe; que par conséquent dans l'analyse mécanique on ne pouvait les considérer seule à seule, mais toujours au moins deux par deux. En ayant égard à ces nouvelles données du problème on arrive à conclure, comme je viens de le montrer, que ni l'hypothèse d'un soulèvement ni celle d'un affaissement *limités* ne peuvent s'accommoder aux résultats de l'observation. Cette conclusion est indépendante de l'hypothèse

elle-même, elle est fournie par la nature des choses, et elle indique invinciblement que le phénomène des fractures ne saurait être restreint à une action locale. Il faut donc chercher ailleurs que dans le déplacement de massifs bornés la cause de ce phénomène : cette cause est non-seulement générale, elle est continue quant à l'espace, et un déplacement illimité, indéfini à un moment donné, est le seul résultat qui puisse lui demeurer applicable.

Or si faisant abstraction pour un instant de ce qu'il peut y avoir d'insolite et d'exorbitant dans une semblable idée, l'on vient à la combiner avec celle du parallélisme des failles, il va en résulter une conséquence d'une opportunité et d'une harmonie extrême relativement au plus anomal, au plus mystérieux encore de leurs caractères. Si nous imaginons en effet une dislocation universelle et instantanée assujettie à cette loi, que les principaux plans de fracture aient entr'eux un parallélisme absolu, ou en d'autres termes qu'ils soient tous parallèles au plan d'un même grand cercle, nous les verrons s'incliner progressivement (fig. 14) sur le rayon de la sphère, c'est-à-dire sur la verticale, à mesure qu'ils s'éloignent de cet équateur, sans que toutefois cet angle puisse dépasser facilement 45° : en un mot le phénomène de l'inclinaison des fractures se présente ici avec toute sa netteté et même avec les limites que les faits lui assignent.

Cette rupture de l'enveloppe du globe par zones annulaires parallèlement à un même plan semble il est vrai, au premier abord, une idée bizarre, fantastique, impossible; et son étrangeté s'accroît encore si l'on y joint cette circonstance, que la direction uniforme de ces plans a dû changer d'un même coup à chaque période géologique et se transformer brusquement en une direction presque toujours fortement inclinée sur la précédente. Mais quelque effrayante qu'elle fût pour l'imagination par sa grandeur et son anomalie, cette idée était toutefois si fortement indiquée par la discussion des faits, qu'elle dominait mon esprit par une invincible obsession : je cherchai donc à l'approfondir, et là fut le premier élément sérieux des recherches systématiques qui seront bientôt exposées.

En cherchant à rattacher ce phénomène général des ruptures suivant des plans parallèles, à quelqu'une des forces qui peuvent agir régulièrement sur tout le pourtour d'un corps sphérique, on s'aperçoit facilement que la condition spéciale qu'il exige dans ces forces, c'est d'être toutes coordonnées par rapport à un même axe, qui serait perpendiculaire aux plans de fracture. Or cette considération relie d'une manière presque invincible le phénomène dont il s'agit à celui de la rotation.

Portant alors mon attention sur le changement dans la direction des fractures à chaque époque géologique, et tout-à-coup trouvant associés aux mêmes idées et le parallélisme et le changement de direction des ondulations montagneuses, et la mutation des climats, et la disparition des races vivantes, et le déplacement des glaces polaires... La grande image d'un changement de rotation dans le globe terrestre à chaque période géologique apparut à mon esprit, pour la première fois, avec les caractères d'une loi géométrique.

Cette rupture de l'enveloppe du globe par zones successives, parallèlement à un grand axe, semble le résultat d'un phénomène, non de dilatation, mais de contraction, et de contraction dans une direction fixe, et non dans une direction variable. Cette contraction, qui se fait dans une direction fixe, est la cause de la rupture du globe par zones successives, et de la formation des failles. Cette contraction, qui se fait dans une direction fixe, est la cause de la rupture du globe par zones successives, et de la formation des failles. Cette contraction, qui se fait dans une direction fixe, est la cause de la rupture du globe par zones successives, et de la formation des failles.

CHAPITRE VI.

DU CHOC DE LA TERRE PAR UNE COMÈTE ET DES MODIFICATIONS QUI EN
RÉSULTERAIENT DANS LA FORME DE SON ENVELOPPE SOLIDE EXTÉRIEURE.

Amenés par deux voies différentes à l'hypothèse des déplacements de l'axe terrestre, c'était peu que l'éveil d'une idée aussi étrangère aux idées reçues, si nous ne parvenions à y rattacher par des considérations rigoureuses la loi de toutes les grandes perturbations auxquelles la surface de la terre a été périodiquement soumise. Tel sera l'objet de ce chapitre, et j'ai cru qu'il était convenable d'exposer les résultats du phénomène avant d'entrer dans la discussion de ses probabilités rationnelles : l'exactitude avec laquelle ces résultats pourront embrasser les grands faits physiques des révolutions du globe devra être considérée en effet comme le premier élément de cette probabilité même. Mais il est essentiel d'abord de nettement poser la question. Le déplacement dont il s'agit ici ne saurait se traduire en une simple variation dans l'angle que forme le plan de l'équateur terrestre avec celui de l'écliptique, variation d'où pourrait naître en effet une altération dans les climats, mais non pas un changement de pôles ni une transmutation dans la forme de la terre : il faut nécessairement un déplacement des pôles sur la surface du globe, il faut que pour tous les points de la terre le sens de la rotation se trouve à la fois changé, il s'agit donc d'un choc.

L'hypothèse d'un choc éprouvé par la terre et d'un brusque changement dans le sens de sa rotation a été prise en considération par divers géomètres, en particulier par Laplace : mais l'oubli d'une des données essentielles de la question leur a fait méconnaître les résultats les plus remarquables de

cette rencontre, les seuls importants même quant aux modifications définitives et permanentes dans la configuration extérieure du globe. Cette condition oubliée est celle de l'existence d'une zone de fluidité placée au-dessous de l'enveloppe solide extérieure. Tous les savants qui se sont occupés de la question ont en effet considéré implicitement la terre comme une masse homogène dont toutes les parties étaient solidaires : ils n'ont donné une mobilité indépendante qu'au liquide extérieur et ils n'ont vu d'autre résultat physique sensible à la surface, qu'une irruption des mers sur les continents en vertu de la vitesse acquise ou de l'afflux des eaux vers le nouvel équateur. Or ce n'est là qu'un des plus médiocres résultats d'un pareil événement, et encore même ses proportions ont-elles dû être exagérées, d'après les bases physiques que l'on avait admises.

Mais la question va prendre une face toute nouvelle si l'on tient compte de la condition de fluidité que nous avons indiquée : ce ne sont plus alors des débâcles passagères, ce sont des modifications permanentes et caractéristiques qui vont laisser une empreinte ineffaçable sur l'enveloppe solide de la terre. Le fluide intérieur pouvant livrer en effet ses libres molécules à l'influence de la nouvelle force centrifuge, modifier ainsi sa forme superficielle et changer le sens de son aplatissement, doit tendre à asservir à ce mouvement son enveloppe solide, qui ne saurait à cause de sa cohésion affecter par elle-même une forme d'équilibre indépendante et qui, trop faible pour résister à l'entraînement de la masse fluide qui se déplace, est néanmoins trop rigide pour s'y prêter avec la souplesse nécessaire. De cet antagonisme entre les déformations de deux enveloppes inégalement mobiles, inégalement résistantes de la sphère, il devra résulter pour la surface solide extérieure des modifications définitives que tout conduit à croire régulières comme les forces qui en ont été le principe. Nous y retrouverons en effet les caractères propres et les lois régulières de toutes les dislocations de la surface du globe : ses fractures planes et ses ridements montagneux.

Cette supposition d'une zone de fluidité entre le noyau central du globe et l'enveloppe solide extérieure semble donc por-

ter en elle tous les grands résultats de la question. Aussi ai-je cru devoir avant tout placer ici quelques considérations propres à établir la réalité de cette donnée importante.

Il n'est pas permis de mettre en doute que la terre ait été à l'origine dans un état de fluidité ignée, sinon complet et répandu dans toute sa masse, du moins l'enveloppant tout entière à l'extérieur : c'est là le principe non-seulement de son aplatissement, mais de sa forme, et ce fait est indépendant de toute théorie. Il y a deux suppositions à faire à ce sujet : l'une attribue cette fluidité primitive à une haute température répandue dans toute la masse du sphéroïde; l'autre n'y voit que le résultat d'un échauffement extérieur, qui n'aurait pénétré que par la surface. Dans la première de ces hypothèses, que nous considérerons d'abord, et qui est la plus généralement adoptée, le calcul démontre, ainsi que nous l'avons déjà rappelé, que le refroidissement de cette masse fluide, bien que partout infiniment lent, a dû être toutefois incomparablement plus rapide à la surface que dans son intérieur, et nous avons cité les calculs de M. Poisson qui donnent à cette disproportion une mesure bien supérieure encore à tout ce que l'on pouvait imaginer à cet égard. Un des résultats les plus importants à en déduire, c'est qu'alors que la surface du globe déjà entourée d'une enveloppe solide a pu permettre la condensation des eaux, la fluidité devait persister encore à une très petite profondeur : si en effet, d'après les calculs de M. Poisson, un point situé à la profondeur du 20^e du rayon terrestre n'a point perdu actuellement $\frac{3}{1000}$ de degré de sa température originaire supposée à 3000°, qu'était-ce donc à l'époque de cette première solidification? Or maintenant il y a lieu de penser que dès le moment où les eaux ont pu couvrir quelque portion du globe, dès le moment où les mers ont pu battre les rochers et les torrents sillonner la terre ferme, aussitôt les dépôts géologiques ont dû commencer à se former; et comme d'ailleurs les traces de la vie se rencontrent jusqu'aux plus anciens dépôts d'aggrégation, il faut de toute nécessité placer l'origine des terrains ou formations à l'époque même où les eaux ont pu commencer à séjourner à la surface de la terre : mais de-

puis cette époque nous pouvons soumettre les tems à une sorte d'évaluation expérimentale, et quelle que soit la haute antiquité que l'étude des terrains assigne à cette partie de l'histoire du globe, antiquité que nous avons pris à tâche de faire ressortir, il est toutefois une limite posée par les faits même, et sa durée ne saurait avoir été prolongée jusqu'à exercer une influence notable sur le refroidissement dans la profondeur, pour lequel on ne compte que par milliers de siècles.

Ainsi nul doute que dans cette première hypothèse d'une chaleur générale, la fluidité intérieure n'ait dû persister jusqu'à nos jours. Or cette hypothèse s'applique non-seulement au cas où la terre serait entrée dans la sphère d'attraction solaire à l'état d'un globule liquide, mais encore au cas où, suivant les idées de Laplace et d'Ampère, elle aurait été formée par la condensation d'une vapeur. Il est facile de voir en effet d'après le principe des chaleurs latentes que tant que les vapeurs ont été se liquéfiant à la surface, le fluide déjà formé a dû garder, quant à son ensemble, un état stationnaire de température, de même qu'après la liquéfaction complète la chaleur doit persister à l'intérieur tant que la solidification marche à la surface ¹.

Mais, je dois le dire, ces hypothèses si favorables à notre point de vue n'embrassent pas toute la série des possibles. Nous exposerons nous-mêmes par la suite comment l'étude chimique peut conduire à penser que la température propre de la surface terrestre peut provenir, en partie du moins, d'une déflagration extérieure, et M. Poisson avait déjà indiqué une autre cause de provenance par la surface, mais que nous ne saurions admettre vu sa contradiction avec les faits de la géologie ². La conception dont je parle ne met du reste aucun obstacle à ce que le globe ait été originellement animé dans toute sa masse d'une température assez

¹ Il est bien clair qu'il est fait abstraction ici de la solidification qui peut et doit être produite dans la masse centrale par l'énorme pression due à la gravité.

² Voir la note de la page 94.

élevée, elle ajoute même une circonstance très favorable à la fluidité, savoir que la portion au moins qui est voisine de l'extérieur serait composée, suivant toute probabilité, de matières beaucoup plus plastiques et plus facilement fusibles que le revêtement solide actuellement observable. Cette circonstance permettrait de concevoir la liquidité sans l'influence d'une très haute température, et contribuerait à affranchir de la nécessité d'une chaleur centrale excessive; quoi qu'il en soit cependant cette considération ne saurait avoir la force d'une loi physique, et la persistance d'une liquidité intérieure ne saurait y trouver qu'un appui conditionnel, si l'on y joint la possibilité d'une pénétration de la chaleur par la surface. Il faut donc chercher à appuyer la probabilité de ce fait important par des arguments généraux indépendants de toute hypothèse.

La sphéricité, dirons-nous, paraît être la forme caractéristique de tous les grands corps de la nature: tous les corps célestes qui se trouvent à la portée de nos observations précises sont arrondis, et nous sommes portés à généraliser cette forme, qui paraît en effet à nos connaissances bornées la plus harmonieuse relativement aux mouvements des corps. Or il n'y a aucun doute qu'elle n'ait dans la liquidité son principe originaire, et l'on est amené philosophiquement à penser que cet état moléculaire particulier a dû jouer un rôle important dans les conditions astronomiques des corps célestes. Est-il possible, d'après cela, de réduire la liquidité originaire pour le globe à la simple pellicule d'une vingtaine de lieues peut-être, rigoureusement nécessaire pour imprimer à son contour extérieur la forme ellipsoïdale? Or si l'on vient à supposer liquide, par l'action de la chaleur, seulement $\frac{1}{20}$ du rayon terrestre, cela suffit, vu la lenteur extrême du refroidissement et la lenteur additionnelle que lui imprime la solidification même, cela suffit pour que cette mince enveloppe n'ait pu être solidifiée tout entière depuis un tems qui dépasse sans aucun doute énormément toute l'étendue des durées dont nous pouvons retrouver la trace sur le globe.

On a dit à la vérité que de la liquidité intérieure résulteraient d'effroyables marées qui devraient périodiquement se-

couer et briser l'enveloppe solide de la terre. Mais l'on n'a point fait attention que la liquidité de tous les corps est loin d'être aussi absolue que celle de l'eau : la force de cohésion que l'on nomme viscosité existe dans la plupart des liquides métalliques à un degré assez élevé pour que l'on puisse supposer que les faibles différences d'attraction qui causent nos marées ne soient pas capables de la vaincre. Lorsque l'on voit que dans une mer comme la Méditerranée le simple frottement des bords et du fond est suffisant pour mettre obstacle au soulèvement périodique, que sera-ce pour une zone de fluide visqueux comprise entièrement entre deux masses solides? Car la pression qui s'exerce sur la partie centrale du globe ne permet pas de mettre en doute qu'elle ne soit solidifiée par écrasement.

Toutes ces considérations me paraissent appuyer avec une grande force l'existence d'une zone intérieure liquide. Ne serait-il pas possible d'ailleurs, toute autre cause à part, de lui voir un principe d'excitation dans le fait même qui va nous occuper? S'il est vrai que la terre ait été à plusieurs reprises dans l'immensité des âges dérangée brusquement de son équilibre par la violence d'un choc, n'est-il pas permis de supposer que l'énergique vibration imprimée alors à toutes ses parties ait été capable d'élever assez la température des couches voisines de la surface, pour donner à une matière très facilement fusible une mollesse capable de la livrer aux nouvelles formes d'équilibre? Quoi qu'il en soit d'ailleurs, si nous parvenons, par des considérations géométriques appliquées au phénomène des chocs, non seulement à y trouver la loi de toutes les perturbations générales de la surface du globe, mais à y trouver encore des moyens de recherche et de vérification propres à en assurer l'étude chronologique, ce sera là sans doute la preuve implicite la plus puissante pour la réalité d'une supposition qui réunit déjà par elle-même tant de chances de certitude : nous regarderons donc préalablement comme admise cette fluidité partielle dans le globe terrestre, et nous allons rechercher d'après cette donnée les modifications dynamiques qui peuvent résulter pour l'enveloppe solide de la terre d'un changement brusque de rotation.

Mais d'abord quelque mots sur la cause possible de ce changement et sur sa portée.

Notre système planétaire est traversé dans tous les sens par une infinité de corps errants, de corps du moins qui décrivent autour du soleil des courbes isolées, et qui par l'allongement et les variétés d'inclinaison de leurs orbites, par la petitesse de leur distance périhélie, enfin par les dérangements que l'attraction ou les résistances impriment sans cesse à leur course, se distinguent complètement des mouvements concordants et immuablement parallèles que décrivent les planètes dans leur ensemble. Leur rencontre avec l'un des corps de notre système n'est donc pas seulement un événement possible, c'est un événement que la suite indéfinie des tems doit nécessairement amener, et cela est incontestable en principe; il est donc naturel d'examiner quelles pourraient être les conséquences du fait relativement aux mouvements de la terre.

La masse des comètes reconnues est généralement fort médiocre, car leur attraction sur les corps planétaires dont elles s'approchent ne paraît avoir exercé sur le mouvement de ceux-ci que des perturbations presque insensibles, tandis qu'elles en sont elles-mêmes notablement dérangées. Mais relativement à l'énergie d'un choc cette petitesse des masses est jusqu'à un certain point compensée par leur extrême vitesse (qui à notre distance du soleil peut être plus que double de celle qui emporte la terre dans son orbite), et par le surcroît qu'y apporterait l'attraction accélératrice de la terre dans le cas d'un choc, augmentation qui peut égaler encore notre vitesse de translation. Toutes ces influences réunies n'auraient toutefois dans la plupart des cas qu'une très faible influence relative sur le mouvement général du globe, vu sa rapidité; mais il n'en sera point de même quant au mouvement de rotation, où la vitesse à modifier est incomparablement moins considérable; une circonstance particulière y donne d'ailleurs à l'impulsion toute l'énergie dont elle est susceptible, comme je vais essayer de le faire voir.

On sait qu'une force d'impulsion communiquée à un corps considéré comme libre se décompose pour chaque point en

deux forces différentes : l'une dont la résultante générale va passer au centre de gravité et tend à le faire mouvoir dans une direction parallèle à celle de la force d'impulsion elle-même et avec une intensité égale ; l'autre qui tend à produire le mouvement de rotation du corps autour de ce centre supposé fixe, c'est-à-dire autour d'un axe instantané qui ne demeurera constant qu'autant qu'il aura été à l'origine un des axes principaux de figure. La vitesse angulaire qui en résulte, pour un point situé à l'unité de distance de l'axe, a pour mesure la vitesse que prendrait le centre de gravité du mobile divisée par son moment d'inertie et multipliée à la fois par sa masse et par la plus courte distance du même centre à la direction de la force ; ce qu'on désigne ordinairement par la formule

$$\omega = \frac{Mvf}{\int r^2 dm}$$

Mais ici, où la force d'impulsion est communiquée à la terre par un choc, il se présente une considération essentielle.

Si les deux corps dont le choc mutuel produit cette impulsion étaient parfaitement durs, et que par conséquent leur contact ne fût que d'un instant, la seule partie agissante de la force d'impulsion serait sa composante suivant la normale à la surface choquée. Or la normale à la surface d'un ellipsoïde aussi peu déprimé que la terre passant toujours très près de son centre, ce qui atténue extrêmement le bras de levier f , il s'ensuivrait que le choc d'une petite masse n'aurait qu'une influence peu sensible sur le mouvement de rotation. Mais les choses doivent se passer autrement en réalité, si l'on admet surtout le principe de la fluidité intérieure, que nous avons déjà cherché à établir. Il est bien évident que vu le peu de résistance de la zone fluide, les deux corps se pénétreront, et que l'un demeurera au moins un instant fixé à l'autre, de manière à agir sur lui par toute son impulsion et non plus seulement par son choc. La direction de la force qui agira sur la rotation de la terre ne sera donc point celle de la normale, ce sera la direction même du mouvement de la comète dans l'espace, qui

peut être fort inclinée sur le rayon de la sphère terrestre qu'elle rencontrera. Le moment de cette force par rapport à l'axe de rotation s'en trouvera donc fortement augmenté, car le bras de levier désigné par f dans la formule pourrait passer ainsi du maximum de 100 kilomètres au maximum de 6000. D'après cette donnée, si nous appliquons la formule avec des conditions telles, que la vitesse du corps choquant soit égale à trois fois celle de la terre et que son mouvement soit dirigé de manière à donner au bras de levier f la valeur de 4000 kilomètres, ou moins des $\frac{2}{3}$ du rayon terrestre: on trouve qu'en supposant la terre primitivement au repos, la vitesse angulaire d'un point de son équateur, pour le tems d'un jour actuel, serait représentée en kilomètres par le nombre 11.292.300 multiplié par le rapport arbitraire de la masse du corps choquant à celle de la terre: ainsi pour le choc d'une comète qui comme celle de 1770 ne serait que la 5000^e partie de la masse du globe, la vitesse de rotation serait déjà de 2258 kilom., c'est-à-dire $\frac{1}{20}$ de ce qu'elle est aujourd'hui; pour une masse de $\frac{1}{1000}$ elle irait à plus du quart; et enfin pour que d'un seul coup la terre prit une vitesse de rotation égale à celle qu'elle possède, il suffirait qu'elle fût rencontrée, dans les mêmes conditions, par une masse égale à $\frac{1}{282}$ de la sienne ou qui, à égale densité, n'aurait guère plus du 7^e de son diamètre. Or comme on peut admettre qu'elle a emmagasiné sa vitesse par l'effet d'un certain nombre de chocs successifs, on voit que cela permettrait des variations très étendues relativement à la petitesse des masses et que leurs valeurs se trouveraient ainsi certainement renfermées dans les limites qu'assigne jusqu'ici l'observation astronomique. Je me réserve de traiter plus tard spécialement la question de la probabilité rationnelle des chocs, sous le rapport de leur possibilité comme événement et sous celui de leur nombre; je n'ai voulu ici qu'établir un point de vraisemblance relativement à leur énergie, afin que l'on ne puisse prendre dès l'abord notre supposition comme purement imaginaire; ce point éclairci, j'aborde l'étude des résultats géologiques qu'elle doit amener.

Si la terre était une masse entièrement solide, un pareil événement détruirait définitivement l'équilibre de sa rotation

et la constance dans la position relative de son axe: car celui-ci cessant d'être un des axes principaux de figure, son équilibre ne saurait plus être persistant. Mais il en sera tout autrement si au-dessous de l'enveloppe solidifiée il existe une zone de fluidité suffisamment profonde. En effet les molécules fluides cédant à la nouvelle force centrifuge et au principe de l'égalité de pression, changeront complètement la figure extérieure du corps; il va se renfler autour du nouvel équateur et une dépression polaire va se déterminer aux deux extrémités du nouvel axe, qui deviendra ainsi l'axe principal de figure. Il n'est pas nécessaire pour arriver à cette conséquence et en apprécier les résultats, d'établir la loi mathématique des mouvements que suivront les particules fluides soumises à l'action d'une nouvelle force; il suffit qu'il soit reconnu que la forme d'équilibre d'un liquide tournant, soumis à la gravité, est un ellipsoïde de révolution, pour qu'il demeure certain que dès le premier instant de la rotation nouvelle le fluide va tendre vers cette forme autour de l'axe instantané et le rendre par conséquent permanent ¹.

¹ Ainsi, soit représenté par l'ellipse ABCD (pl. II, fig. 21) un des méridiens de la terre dans sa rotation autour de l'axe CD: le choc venant à imprimer à cette ligne la direction instantanée *cd*, ce nouvel axe deviendra permanent par la tendance du liquide vers la forme d'un nouvel ellipsoïde de révolution, dont *abcd* est supposé le méridien. Si l'on imagine par le plan des deux axes une coupe qui sera ainsi doublement méridienne, la position mutuelle des deux ellipses ABCD, *abcd*, qu'elle interceptera, donne la représentation la plus complète du rapport des deux surfaces, primitive et transformée; c'est le plan où l'écart de leurs courbures est le plus considérable. L'ellipse que nous figurons est démesurément déprimée, afin de rendre les différences plus faciles à saisir, car l'aplatissement actuel de $\frac{1}{305}$ est presque insensible aux yeux. Ce rapport des axes étant d'ailleurs un élément variable avec la vitesse de rotation, sa valeur absolue n'a pas d'influence sur les résultats généraux qui nous occupent.

Quant à l'épaisseur de l'écorce solide, si on l'évalue à $\frac{1}{50}$ du rayon terrestre, elle pourra être supposée indiquée par le trait noir du contour de l'ellipse ABCD; mais j'espère montrer par la suite, en traitant de la nature chimique des matériaux de l'intérieur du globe, qu'elle doit être sans doute bien moins considérable qu'on ne pourrait le conjecturer en appliquant au revêtement observable la loi des accroissements de température.

Mais que deviendra par suite de cette transformation la pellicule solide en recouvrement sur cette matière fluide qui se déplace librement? Car c'est là le résultat important au point de vue géologique, c'est là qu'on peut chercher la cause de toutes les dislocations de la surface du globe.

Dépourvue de la mobilité qui permet aux particules liquides un dérangement spontané, l'enveloppe solide ne saurait prendre par elle-même une figure indépendante, et sa déformation sera subordonnée à celle de la zone fluide qui la supporte; ne pouvant tourner en masse sur elle-même pour embrasser toujours, sans déformation notable, la nouvelle courbure dans son déplacement, et trop rigide d'ailleurs pour se modeler exactement sur elle, elle sera nécessairement rompue, disloquée d'une part à cause de l'expansion du liquide, tandis qu'en d'autres points elle sera privée d'appui par sa retraite et par conséquent sollicitée à se rapprocher du centre. Mais avant de rechercher les lois géométriques de ces dérangements, quelques remarques sont nécessaires. On se tromperait beaucoup si l'on pensait que le manque d'appui qu'éprouvera en certains points l'enveloppe solide pourra déterminer des effondrements locaux: cette pellicule est trop mince par rapport au rayon de la sphère et au développement de sa surface pour que l'on suppose que nulle part elle puisse se soutenir au-dessus du liquide qui s'affaisse, ni qu'elle puisse vaincre l'adhérence qui l'unit à ce liquide, de manière à laisser un vide momentané entre elle et lui. Nulle part elle ne saurait le quitter sur une étendue notable, et par conséquent dans toute cette masse enveloppée et enveloppante les grands mouvements sont solidaires; c'est une considération indispensable et de la plus grande importance. La rigidité de l'enveloppe donne lieu à une conséquence non moins essentielle: c'est que partout où il faudra qu'elle s'adapte à un changement de courbure de la surface fluide, elle devra, dénuée qu'elle est du degré de souplesse nécessaire, se rompre et se briser en fragments élémentaires, par des cassures dont la direction doit être déterminée par la tendance même des forces qui président au changement de courbure. C'est de ces

deux principes, c'est de cette double sujétion de la pellicule solide et par son peu d'épaisseur et par sa rigidité, que vont dériver tous les résultats géométriques; le problème se réduit ainsi à rechercher quelles sont les tendances régulières qui peuvent animer la masse du fluide dans son mouvement d'impulsion vers le nouvel état d'équilibre et en combien d'efforts indépendants elles se divisent.

Les mouvements du liquide sensibles à l'extérieur ont deux tendances solidaires, mais bien distinctes par leur direction : l'une résulte de l'afflux des parties polaires vers le centre en vertu de leur excès de pesanteur sur celle des portions devenues équatoriales; l'autre consiste dans l'expansion qui, pour la région de l'équateur, est la conséquence de cette pression même des nouveaux pôles; expansion qui s'exerce de toutes parts en divergence de l'axe de rotation. Ces deux genres de forces si différents par leur mode d'action bien qu'ils soient la compensation l'un de l'autre, exercent chacun sur l'enveloppe solide une influence différente: examinons ces deux influences successivement, en commençant par celle de l'expansion parce qu'elle est la plus évidente dans ses effets.

Les forces d'expansion sont destinées à transmettre perpendiculairement à l'axe de rotation la poussée imprimée par l'excès de pesanteur dans la direction même de cet axe: leur principal caractère est de s'exercer uniquement *dans des plans parallèles à l'équateur*¹, car toute réaction tendant à faire effort en dehors de ces plans est dominée et détruite par les pressions générales dans le sens de l'axe. Uniformes sur tout le contour de ces sections, les forces centrifuges suivent de l'une à l'autre une loi d'intensité en relation avec la distance à l'équateur, elles sont une fonction de la latitude, et c'est ce qui détermine la courbure des méridiens, courbure uniforme comme ces forces sur tout le contour de chaque paral-

¹ Toutes les fois qu'il sera question d'équateur ou de méridiens, sans désignation spéciale, il faudra toujours entendre ceux de la nouvelle surface. Ce nouvel équateur devient en effet le véritable horizon pour tous les mouvements que la transformation amène, et c'est à lui pour ainsi dire que se rapportent toutes leurs lois.

lèle. Dans chacun de ces plans l'action expansive s'exercera du reste de deux manières : d'une part en faisant par une sorte de rayonnement diverger de l'axe les molécules fluides, de l'autre en les faisant réagir latéralement par des pressions normales à chacun de ces rayons et qui tendent par conséquent à agrandir les contours circulaires : le premier de ces mouvements, l'impulsion divergente, agit spécialement sur la courbure des méridiens puisque sa direction suit la trace de leurs plans; la réaction normale au contraire s'exerce seulement sur la courbure des parallèles. Ces deux effets seront donc bien distincts sur les dislocations du revêtement solide.

En considérant particulièrement les forces divergentes destinées à changer la courbure méridienne, il est facile de voir, qu'agissant seulement dans des plans parallèles à l'équateur et se coordonnant à la nouvelle loi des latitudes, elles devront diviser d'abord l'écorce du globe en zones pour ainsi dire annulaires par des ruptures planes, perpendiculaires à l'axe de rotation, et qui traceront ainsi sur la surface de la sphère des portions de lignes circulaires parallèles. Tel sera pour nous le principe de ce grand fait géologique du parallélisme des fractures; tel est aussi celui de l'inclinaison dans les grandes failles, puisque, par la convergence des rayons de la sphère, le parallélisme absolu de ces plans doit produire, comme je l'ai dit ailleurs, leur déviation progressive de la verticale en proportion de leur rapprochement des pôles (fig. 14).

Pour mettre plus d'ordre et de netteté dans les idées, nous avons pensé qu'il pouvait être bon de résumer sous forme de loi géométrique ou de théorème chacun des résultats principaux qui ressortiront successivement de notre étude; celui que nous venons d'indiquer peut se résumer ainsi.

1^{er} PRINCIPE. Dans le changement de rotation de la terre, le premier effet des forces d'expansion qui agissent dans les plans méridiens en divergence de l'axe, sera de rompre son enveloppe solide suivant des plans parallèles au nouvel équateur, brisement dont la disposition reproduit ainsi les trois principaux caractères des fractures géologiques: l'alignement, le parallélisme et l'inclinaison sur la verticale.

Mais ce n'est là qu'une portion des résultats dûs à l'expansion, il faut tenir compte aussi de la réaction moléculaire qui, dans chacune des zones parallèles, agissant perpendiculairement aux plans des méridiens, a pour effet de distendre les contours et de faire occuper aux anneaux solides, parallèlement à l'équateur, un développement circulaire plus considérable qu'ils n'en occupaient primitivement. Si l'écorce du globe n'eût jamais été auparavant fracturée, nul doute que cette extension ne dût y causer aussi des ruptures; mais il est très essentiel de remarquer qu'à la différence des fractures parallèles dont nous avons parlé en premier lieu, celles-ci ne devraient avoir rien de bien déterminé ni de bien régulier dans leur direction; elles s'en distinguent encore en ce que les ruptures transverses à la direction de l'équateur sont nécessairement des fentes avec écartement, puisqu'il faut que le contour des anneaux embrasse une étendue plus grande qu'auparavant; tandis que les fractures parallèles à l'équateur n'ont pas besoin de cet écart des parois, car elles ne sont destinées qu'à suivre un changement de courbure ¹ et non à racheter un défaut de surface: il n'y a en effet aucune extension du fluide dans le sens des méridiens, il y a contraction au contraire, et nous verrons même bientôt comment cette circonstance explique la grande pression qu'ont exercée l'une contre l'autre les parois de chaque fracture. De ces deux propriétés distinctives des ruptures transverses, savoir l'indifférence de direction et la nécessité de l'écartement, dérive un résultat capital: s'il existait déjà dans l'écorce du globe, avant le changement de rotation, des fractures d'une autre époque faisant en direction un angle notable avec les parallèles à l'équateur, l'unique effet de l'extension de surface doit être alors d'agrandir ces fissures, d'en écarter seulement les parois l'une de l'autre, sans déchirure nouvelle. Ainsi dans ce cas de préexistence, qui sera nécessairement réalisé à la suite de deux chocs, toutes les frac-

¹ Il n'est ici question que d'écartement permanent, on verra bientôt que le changement de la courbure méridienne produit un écartement instantané qui doit jouer un rôle important dans le phénomène des failles.

tures réellement produites par le changement de rotation vont se réduire aux premières que j'ai considérées, c'est-à-dire, à une série de plans parallèles, d'une direction caractéristique, identique avec celle du mouvement de la terre; l'expansion de la surface en étendue parallèle à l'équateur ne sera plus signalée que par l'élargissement des anciennes fentes, des anciennes lignes de clivage, et cela répond merveilleusement à cet écartement transversal des failles pour donner naissance aux filons et aux fentes remplies, écartement qui se soutenant sensiblement uniforme sur de longs espaces et ne dépassant pas habituellement certaines limites, ne semble pouvoir être, que le résultat de forces générales. En cherchant à appliquer le calcul à cette donnée théorique on peut se convaincre que la mesure de son influence concorde assez bien avec les résultats d'observation. Prenons le cas extrême où le méridien de l'ancien système de rotation deviendrait l'équateur du système nouveau, et admettons que le rapport des axes soit toujours le même qu'aujourd'hui; la différence de périmètre produite à l'équateur ne serait guère que de $\frac{1}{800}$; mais si l'on tient compte de cette circonstance, que l'agrandissement se concentre sur une portion seulement du contour, on peut sur cette portion élever en réalité l'augmentation à $\frac{1}{400}$. Or si l'on répartit cette augmentation sur toutes les fractures transversales qui peuvent être espacées sur ce contour, on voit que leur écartement devrait être de 2 mètres par 1000 m. de distance, ce qui ne semble pas éloigné de ce que les faits nous apprennent. Mais il y a une cause qui peut augmenter notablement l'influence locale de l'expansion, c'est celle qui résulte du changement de courbure dans l'enveloppe solide, changement¹ qui peut porter l'augmentation dans la grandeur de l'arc à $\frac{1}{300}$, pour un changement du méridien en équateur, avec la valeur actuelle des rayons de courbure, et qui a pu être beaucoup plus considérable selon les changements dans la vitesse de rotation; cette cause d'écartement dans les fractures a donc pu non-seulement doubler mais tripler l'effet de l'agrandissement

¹ Nous indiquerons plus loin le calcul relatif à cette transformation.

local du périmètre. Nous verrons toutefois par la suite que tous ces effets sont fort amoindris, souvent annihilés, par un groupement particulier des failles d'où résulte que des prismes de terrain sont disposés en forme de *coins*, de manière à s'enfoncer par leur poids au moindre écartement général et à transformer ainsi un effort horizontal en un effet de glissement vertical et de resserrement. D'autre part les soulèvements granitiques nous fournissent encore une cause d'expansion. Néanmoins, la cause générale que nous avons admise doit demeurer en certains cas efficace, et nous pouvons encore poser cette conclusion:

II^e PRINCIPE. *Le second effet des forces d'expansion, celui qui résulte des réactions normales aux divers plans méridiens, est d'écartier l'une de l'autre les parois des anciennes fissures dont la direction est transverse à celle du nouveau mouvement de la terre; ce qui peut répondre au phénomène de l'élargissement des failles et des filons, quoique l'effet principal ait dû s'exercer plutôt sur l'approfondissement des vallées.*

Voilà donc plusieurs circonstances capitales du phénomène des fractures qui trouvent dans le changement de rotation de la terre, leur raison facile, précise, géométrique : ce sont les propriétés de l'alignement, du parallélisme, de l'inclinaison et de l'expansion. Nous achèverons plus loin ce parallèle de la théorie avec l'observation, en montrant quelles peuvent être les causes de la pression considérable qui s'est exercée primitivement entre leurs parois et celles surtout d'un autre caractère plus fondamental encore, savoir la différence de niveau qu'elles déterminent avec une constance si remarquable dans les terrains qu'elles traversent. Mais avant d'entrer dans ces détails il convient de compléter l'étude d'ensemble des grands mouvements de la surface; il faut chercher la trace et les lois d'un autre genre de modifications pour ainsi dire inverse et compensateur du précédent, bien plus important toutefois par la grandeur de l'empreinte qu'il a marquée sur la surface extérieure du globe et par les moyens d'investigation qu'il nous donnera pour l'étude chronologique de ses révolutions : c'est le phénomène des ridements, des *montagnes*.

Jusqu'ici nous n'avons en effet considéré que l'expansion

centrifuge du fluide : mais cette expansion qui s'exerce parallèlement au nouvel équateur ne saurait exister que comme compensation d'un affaissement qui se manifeste aux parties polaires et qui tend à écraser les méridiens. Ce mouvement centripète doit réagir aussi sur la pellicule solide, il s'agit de savoir suivant quelle loi s'exercera cette influence. En se reportant à la figure 21, qui donne la position relative des deux surfaces dans le plan des axes, on verra que si dans le sens et au voisinage de la ligne *ab* une extension a dû avoir lieu pour passer de la surface primitive à la transformée, ce même passage laisse au contraire un excédant de la première surface sur la seconde dans la région des nouveaux pôles, en LAH. Cette partie excédante de l'écorce solide ne peut demeurer en suspens au dessus du fluide affaissé, son peu d'épaisseur comparative-ment à l'étendue de sa courbure ne le permet aucunement. Ce serait donc une grande erreur, comme je l'ai déjà dit, de supposer qu'il pourra résulter de cette disposition un vide et un effondrement local : le mouvement du fluide, son adhérence et son frottement, la pesanteur surtout et la cohésion de l'enveloppe elle-même rendent solidaires entr'elles toutes les parties de ce revêtement, groupent vers un effort général toutes les forces partielles qui le sollicitent, et les font concourir à un mouvement d'ensemble d'une nature toute spéciale, comme je vais essayer de le montrer.

Les forces centripètes, celles qui se dirigent soit vers le centre soit vers le plan équatorial, sont la pesanteur du revêtement solide d'une part, de l'autre l'adhérence et le frottement du liquide qui reflue des parties polaires vers l'équateur : mais toutes ces forces ne sauraient exercer leur impulsion directe sur l'enveloppe, vu la solidarité de ses diverses parties : l'une des lois essentielles du mouvement général étant, comme on l'a vu, un transport parallèle à l'équateur, toutes les forces emploieront dans ce déplacement une de leurs composantes, et il ne restera plus aux forces centripètes que la seconde composante dans le sens où un glissement peut avoir lieu, c'est-à-dire tangentiellement à la courbure du fluide.

Il est essentiel de remarquer en effet que la différence entre

ces deux mouvements de la surface, l'un parallèle, l'autre perpendiculaire à l'équateur, consiste en ce que le premier est déterminé forcément par la poussée du liquide, et que le poids de l'enveloppe ne doit y jouer aucun rôle; tandis que le second provenant principalement d'un manque d'appui, appartient spécialement à la pesanteur: or de l'inégalité de ces deux forces il résulte qu'encore bien que l'affaissement et l'expansion soient dans le liquide deux mouvements solidaires et que le second y soit la conséquence et la compensation du premier, il n'en est plus de même relativement à l'enveloppe solide: pour elle l'affaissement est au contraire le phénomène secondaire, il est subordonné à l'expansion du fluide qui est la force invinciblement déterminante, puisqu'en elle s'accumule toute la puissance des masses. C'est cette subordination de la pesanteur du revêtement solide à une force beaucoup plus considérable, qui donne lieu à l'importante décomposition dont je viens de parler, laquelle transforme une tendance verticale en une force de translation dans le méridien, et va devenir ainsi le principe d'un phénomène de contraction et de refoulement, qui par sa symétrie et sa concordance sur tout l'ensemble de la terre, exercera l'influence principale sur la forme de son revêtement.

J'ai représenté (fig. 21) cette décomposition pour deux points N et M d'un même méridien, où le mouvement de translation imprimé par la poussée du fluide a lieu dans des sens inverses par rapport à l'axe. Dans ces deux cas, qui forment en définitive les seules variations possibles dans la relation réciproque des forces, la divergence apparente de l'expansion du fluide ne détruit cependant pas la symétrie dans la direction des composantes effectives de la gravité, parce que dans ces deux positions le rôle des forces est interverti. Au point N la pesanteur n'est point contrariée par la poussée du fluide qui marche dans le même sens qu'elle; elle agit donc sur l'écorce solide comme cause de mouvement, mais non toutefois comme cause unique, ni même comme cause déterminante. Cette partie du revêtement est entraînée en effet, par la cohésion, dans le mouvement général de transport parallèle à l'équateur,

et par conséquent un mouvement effectif aura lieu dans le sens Nv . La force de pesanteur Np aura donc une composante dans ce même sens; mais comme cet emprunt ne peut l'absorber tout entière, il lui restera encore une composante active Nr , tangente à la courbe méridienne, puisque c'est le seul angle suivant lequel il puisse y avoir glissement de l'anneau sur le fluide. Au point M les circonstances sont changées: le mouvement du fluide, force très dominante, étant en sens contraire du poids de l'enveloppe, c'est son impulsion Ms qui se décompose partiellement pour détruire la pesanteur par une force Mt égale et opposée. Il restera donc encore là une composante Mz tangente à la courbe méridienne du fluide, et dirigée comme la force Nr vers l'équateur. Dans l'autre hémisphère adb , des forces égales se répéteront en sens inverse des premières en M' , N' .

Ainsi partout la pesanteur du revêtement solide, au lieu d'agir directement et dans son sens réel, se transforme en une autre force qui porte ces deux caractères, d'être universellement tangente au méridien ¹ et dirigée de toutes parts vers le cercle équatorial. L'adhérence et le frottement du liquide doivent évidemment donner lieu à un résultat semblable. Chacun des méridiens se trouvera donc ainsi soumis à une double série de forces antagonistes, qui exerceront l'une contre l'autre, de part et d'autre de l'équateur, leurs efforts opposés. L'écorce du globe saisie par cette double pression subira donc, non point par effondrement aux pôles mais par un refoulement universel, son raccourcissement dans le sens des méridiens, compensation nécessaire de l'étirement qu'elle a subi dans le sens des parallèles. Sous cette compression partout horizontale, produite par la réaction de son poids entier, elle réduira ainsi son excédant de développement par une série d'ondula-

¹ Les composantes de la pesanteur sont tangentes à la courbe méridienne du fluide pendant tout son mouvement de transformation, et à la limite de ce mouvement elles sont en réalité tangentes à l'ellipse méridienne de la nouvelle surface.

tions et de ploiements absolument semblables à ceux dont nous avons vu que nos montagnes sont formées.

Mais de là deux grandes lois :

1^o Les ondulations dont nous parlons étant dues à des forces tangentes à la nouvelle courbe méridienne et par conséquent uniformément inclinées sur tout le pourtour de chaque parallèle, ces ondulations devront dans leur relation d'ensemble reproduire cette loi de symétrie : elles devront donc sur la surface de la sphère être linéaires, parallèles entre elles et à l'équateur, et représenter par leur direction la direction même du nouveau mouvement de la terre.

Ainsi dans l'hypothèse qui nous occupe, non seulement la formation des chaînes de montagnes trouve des causes réelles et rationnelles, mais leur double propriété de l'alignement et du parallélisme y porte, comme pour les failles et les filons, le caractère d'une nécessité géométrique.

2^o Les mêmes forces de refoulement dirigeant toutes leur action vers le cercle équatorial, leur effort principal devra se concentrer sur la région de l'équateur, et c'est là qu'elles iront soulever les plus puissants ridements. Partout donc où le méridien du revêtement solide aura un excès de développement sur celui de la surface fluide, il devra se former à l'équateur un relèvement montagneux prédominant, et le méridien terrestre prendre la forme indiquée par la fig. 22, où la proportion relative des ridements est toutefois une grande exagération de nos montagnes.

Ainsi nous pourrions dire en résumant :

III^e PRINCIPE. *L'effet des forces centripètes, dans la transformation du mouvement de rotation, et en particulier celui de la pesanteur de l'enveloppe solide, ne produit point d'affaissements; il se résume en un refoulement général du revêtement de la terre par deux séries de forces symétriquement opposées, partout horizontales, qui en déterminent le raccourcissement dans le sens des méridiens au moyen d'ondulations alignées, parallèles entre elles et au mouvement de la terre. Ces ondulations et ploiements, qui sont l'origine de nos montagnes, croissent en intensité des pôles à l'équateur, et dé-*

terminent à l'équateur même les chaînes les plus considérables, lesquelles suivent ainsi l'alignement d'un des grands cercles de la sphère terrestre et doivent marquer sur la surface de la terre la trace de ses équateurs successifs.

Cette loi inattendue de la concentration des ridements vers l'équateur et du surgissement des plus hautes montagnes de chaque époque le long d'un grand cercle de la terre est une des plus précieuses révélations de la théorie : si notre idée fondamentale est réelle, cette loi doit nous donner le moyen de retrouver sur la surface de la sphère toutes les positions qu'a pu occuper l'équateur du globe dans ses différentes phases de rotation. Cette recherche méritait d'être entreprise, car en supposant qu'elle pût être réalisée, elle ne devenait point seulement une application plus ou moins heureuse de quelques idées conjecturales, elle devenait la plus imposante vérification que pût recevoir un système sérieux et positif.

J'ai l'espérance d'être parvenu à ce grand résultat, non seulement parce que j'ai pu trouver sur la sphère un nombre limité de grands cercles montagneux, mais encore parce que j'ai trouvé ce nombre rigoureusement égal à celui des formations géologiques reconnues, et surtout parce que j'ai pu identifier une à une leurs directions avec les directions caractéristiques des soulèvements de chaque terrain dans nos contrées.

Ce n'est pas tout : une fois l'âge des équateurs établi par l'étude des directions, la théorie nous fournit encore une remarquable méthode de vérification pour leur classement chronologique, et c'est ici déjà le lieu d'en indiquer les principes.

L'amplitude des ridements, c'est-à-dire la quantité dont chaque méridien de l'écorce du globe se contracte dans le passage de l'ancienne surface à la nouvelle, ne saurait être la même sur tout le pourtour du nouvel équateur : elle dépend en effet du rapport de courbure entre les deux sections de la surface fluide dans le plan de chaque nouveau méridien, rapport qui n'est point partout le même. La plus grande somme de ridements doit avoir lieu dans le méridien où la convexité de l'ancienne surface correspond à la plus grande dépression de la nouvelle, parce qu'il est évident que là est le plus grand

excès dans le développement primitif du revêtement solide ; que là enfin il enveloppe la plus grande portion relative de la nouvelle courbure. Or cette circonstance est précisément réalisée dans le plan qui passe par les deux axes, car c'est dans celui-là que l'ancien équateur, c'est-à-dire la plus grande convexité de l'ancienne surface, s'approche le plus du pôle, c'est-à-dire de la plus grande dépression de la nouvelle. Si l'on rétablit par la pensée le contour de cet équateur ancien au-dessus de la ligne A B (fig. 21), on voit que les convexités équatoriales des deux surfaces tendent d'autre part de plus en plus à se confondre à mesure que l'on approche de son point de jonction avec le nouvel équateur, point qui se projetterait, dans notre figure, sur le centre commun O : le méridien qui passerait par ce point même de jonction serait donc celui où la moindre quantité de ridements est nécessaire pour ramener à l'égalité la différence des courbures.

Il suit de là que lorsque deux équateurs successifs de la terre seront moyennement inclinés l'un sur l'autre, les principaux ridements sur le plus récent et par conséquent les chaînes de montagnes les plus élevées, les plus étendues, les plus nombreuses, doivent se trouver concentrées aux deux points intermédiaires entre la double rencontre de ces deux grands cercles ; et il y aura ainsi deux bandes montagneuses prédominantes, qui formeront les deux extrémités d'un même diamètre situé dans le plan des deux axes.

Les points au contraire où les deux cercles viennent se rencontrer sont précisément ceux où les ridements doivent être le moins sensibles.

Je n'ai pas besoin de faire pressentir quel parti nous pourrions tirer de ces deux théorèmes pour la vérification chronologique des équateurs : vérification de telle nature, qu'elle semble devoir effacer tous les doutes et établir enfin notre système et ses conséquences sur une base indestructible.

J'observe toutefois que le résultat général dont nous venons d'indiquer la loi, subit selon les cas des modifications notables, qui dépendent à la fois de la position relative des deux équateurs et de la variation des vitesses. Il est surtout exact

pour une inclinaison moyenne des deux équateurs, qui suppose presque toujours une augmentation dans la vitesse; mais si le choc est tellement dirigé que la vitesse de rotation précédemment établie doive s'y trouver ralentie (ce qui a lieu en général quand les deux équateurs sont fortement inclinés l'un sur l'autre, parce que cela indique un angle obtus dans l'inclinaison mutuelle des deux impulsions), alors l'ancienne convexité est partout prédominante sur la nouvelle, et les ridements doivent s'épandre sur toute l'étendue du nouveau cercle équatorial. Ainsi, par un paradoxe remarquable, le plus grand développement des montagnes sur un équateur et leur prolongement jusqu'au point de rencontre avec l'équateur précédent n'indiquent point une accélération, mais un ralentissement au contraire dans la vitesse de rotation. Ce qui ajoute surtout ici à cette dispersion des ridements sur une plus grande étendue, c'est que le croisement presque à angle droit des deux équateurs, résultat de l'antagonisme des vitesses d'impulsion, fait correspondre la convexité équatoriale de l'ancienne surface avec la dépression polaire de la nouvelle, et comme cette dépression est circulaire il doit en résulter un excédant de surface circulaire aussi, par conséquent une diffusion des ridements sur tout le contour. Enfin de plus, le méridien qui joint les deux points de rencontre des deux grands cercles renfermant pour ainsi dire tout l'équateur de l'ancien ellipsoïde, il doit se trouver précisément, dans ce cas particulier, que les ridements seront plus considérables dans ce méridien et par conséquent se concentreront vers les points de rencontre même, à l'inverse de ce qui a lieu pour les inclinaisons moyennes des deux plans équatoriaux. C'est un moyen de vérification à ajouter encore, dans l'application, à ceux que nous avons indiqués.

Nous résumerons tous ces résultats géométriques de la manière suivante :

IV^e PRINCIPE. « Lorsque l'angle formé par deux équateurs consécutifs ne dépasse pas certaines limites, les chaînes principales de montagnes, sur le plus récent, doivent se concentrer à la partie intermédiaire entre leurs points de rencontre, et correspondre ainsi approximativement aux deux extrémités

d'un même diamètre situé dans le plan des axes. Au dessus des valeurs moyennes, plus l'angle croît plus les chaînes doivent occuper d'étendue et enfin lorsque les deux cercles sont perpendiculaires, des ridements très prononcés doivent avoir lieu à leur point de rencontre même.»

Un précieux corollaire de toutes les considérations précédentes est qu'il existe un certain rapport entre l'accroissement de la vitesse de rotation et l'amplitude ou la disposition des chaînes de montagnes, rapport inverse comme nous l'avons vu. Une fois l'ordre chronologique des équateurs établi, nous arriverons donc à ce remarquable résultat, de pouvoir indiquer à chaque changement d'époque s'il y a eu augmentation ou diminution dans la vitesse de rotation de la terre. L'étude historique pourra-t-elle un jour aller au-delà? Sera-t-il donné jamais d'apprécier avec exactitude la mesure réelle des mouvements que des chocs successifs ont pu imprimer à notre planète? Il serait téméraire assurément de l'espérer, et cependant je me garderais d'énoncer à ce sujet des doutes trop absolus : le champ est ouvert aux recherches, et il ne faut pas trop timidement augurer de l'avenir d'une étude qui n'en est encore qu'à sa naissance. Il est évident que si l'on parvenait un jour à mesurer avec une précision suffisante l'amplitude des ridements dans les montagnes de chaque époque, on aurait, connaissant l'inclinaison des axes, la mesure exacte du raccourcissement des méridiens, par conséquent celle du changement dans la vitesse de rotation à chaque cataclysme.

Les lois générales du phénomène des ridements étant ainsi sommairement établies, il faut revenir à l'étude des ruptures planes, afin d'expliquer les deux dernières propriétés du phénomène qu'elles nous représentent, celui des failles et des filons.

D'après ce qui a été dit de l'universelle pression horizontale qui s'exerce dans le sens des méridiens, il ne sera pas difficile d'y concevoir le polissage des faces de fracture, et nous l'expliquerons bientôt; mais la circonstance du changement de niveau et de sa relation générale avec l'inclinaison des failles

exige un point de vue tout spécial et des considérations d'un ordre particulier.

La première idée qui pourrait se présenter dans cette recherche serait peut-être d'attribuer l'échelonnement des niveaux à la différence de courbure des arcs consécutifs du méridien elliptique depuis l'équateur jusqu'aux pôles : le rayon de courbure augmentant en effet progressivement dans cet intervalle, chacun des éléments solides tangents à la courbe fluide doit donc subir un petit relèvement par rapport à l'élément contigu, qui est tangent à une portion de courbe plus surbaissée. Mais si l'on applique le calcul à ce point de vue, on trouve que les différences de niveau qui en résultent sont absolument insensibles pour des espacements de fractures d'une étendue même considérable¹. Cette manière d'envisager le phénomène ne s'applique point d'ailleurs aux circonstances physiques toutes spéciales qui le caractérisent, et il faut recourir à d'autres influences plus puissantes. Voici l'idée à laquelle je me suis arrêté.

Bien que j'aie considéré jusqu'ici les deux mouvements d'expansion et de contraction, résultat du changement de forme de la terre, comme simultanés, cette concordance parfaite ne saurait exister en réalité pour son enveloppe solide. Dans le liquide, il est vrai, le renflement équatorial ne peut se séparer de l'affaissement polaire qui le détermine : mais relativement à l'enveloppe, dans les régions qui ne sont que moyennement éloignées de l'équateur, la première action doit précéder la seconde, de la même manière que dans une pompe le mouvement de l'eau précède, relativement à l'orifice, celui du piston qui la pousse. La pression qui s'exerce dans le méridien sur le revêtement solide n'est en effet, comme on l'a vu, qu'une conséquence du déplacement parallèle à l'équateur combiné avec l'affaissement polaire ; avant donc que cette pression ait pu se produire et se communiquer, ce déplacement devait être déjà réalisé.

¹ Voir la note A, à la fin du volume.

Ainsi le premier mouvement dans le méridien solide sera celui d'un libre transport sur une nouvelle courbure : quel sera le résultat instantané de cette transformation ? Ce résultat sera une expansion, un écartement dans le méridien lui-même. Les fragments solides, déjà séparés par une série de plans de fracture parallèles, se trouveront forcés d'embrasser, pour un même intervalle compté sur l'axe, une portion de courbe méridienne plus convexe et par conséquent plus longue qu'auparavant ; ils devront donc se désassembler et subir de l'un à l'autre un petit écartement proportionnel au changement de la courbure. C'est là, selon nous, l'origine réelle du changement de niveau dans les failles. Pour le concevoir il faut jeter les yeux sur la fig. 17, où sont représentées les deux sections M, M' du revêtement solide par le nouveau plan méridien, dans leur position relative avant et après le choc. Dans le transport de la section M en M', les plans de fracture ¹ ne cessent pas d'être sensiblement parallèles à l'équateur nouveau EE ; ainsi par l'écartement l'une des faces *ab* va se trouver en surplomb sur la verticale et d'autant plus fortement que la latitude sera plus élevée. Le prisme *abl* suspendu au-dessus du vide de la fracture doit donc inévitablement se détacher ou du moins s'abaisser jusqu'à la jonction nouvelle des deux faces écartées : Cet effet sera pour ainsi dire instantané et la chute devra certainement se faire en beaucoup moins de tems que la pression n'en mettra pour arriver des pôles. Or c'est là, c'est dans cet effondrement que réside tout le phénomène du changement de niveau. Si en effet l'inclinaison de la face en surplomb sur la verticale est assez forte pour que la cohésion de cette masse ainsi suspendue soit vaincue, alors de nouvelles fractures approchant de la verticale vont s'y déterminer, et des prismes tels que *ars* se détacher et tomber sur le fond incliné, de manière à occuper la position *efg* : le niveau des couches *as* s'abaissera donc en *fe*, et la

¹ L'écartement de ces plans que nous avons figuré dans la section M' est de 500 à 1000 fois plus grand qu'il ne faudrait relativement à l'épaisseur de l'écorce solide du globe : cela était nécessaire pour ramener les grandeurs à une proportion sensible.

grande faille inclinée *cf* se trouvera ainsi produite... C'est là la partie capitale du phénomène; car c'est ainsi que peuvent s'expliquer les grandes différences de niveau, avec l'apparence de glissement suivant la pente.

Les petites failles, si multipliées et reproduisant généralement la même loi de glissement, vont s'expliquer d'une manière non moins heureuse. Ce n'est pas un seul prisme en effet qui par sa chute ira combler le vide formé par l'agrandissement de la fracture; c'est une série de prismes dans lesquels se divisera la masse totale en surplomb et qui tombant chacun dans des conditions particulières à sa forme, vont produire tout le mécanisme de ces petites failles. Voici ce que l'on peut rationnellement imaginer à cet égard.

Le prisme suspendu au-dessus de la fente *abcd* (fig. 18) ¹ devrait avoir une hauteur d'environ 100 kilomètres, c'est du moins l'épaisseur que l'on peut supposer à l'enveloppe solide de la terre; si l'angle d'inclinaison est considérable, ce prisme ne saurait donc tomber en masse, et l'inégalité qui existe, pour ses diverses parties, dans le rapport du poids avec la cohésion, doit y déterminer des fractures multiples: or il est facile de voir que les mêmes conditions détermineront aussi dans ces faces de fracture non seulement des inclinaisons diverses, mais encore des inclinaisons variant suivant une loi, ou du moins croissant dans le même sens. A l'extrémité aigüe, en effet, le prisme *P* tombant le premier, déterminera une face de fracture peu inclinée sur la verticale parce que sa configuration donne à la pesanteur une grande prédominance sur la cohésion. Mais pour le prisme tronqué *P*₁, l'influence de la pesanteur, dans la partie en surplomb sur la verticale, étant moins grande, le talus *lm* devra être plus incliné que le précédent, ou si l'on veut l'angle *lmr* plus ouvert que *ars*. Par cette raison même d'une plus grande inclinaison cette influence se continue, et dans les prismes suivants *P*₂, *P*₃, etc., de plus en plus tronqués, les angles à la base s'ouvrent aussi de plus

¹ Dans cette figure, *HH* indique la ligne d'horizon.

en plus. Or qu'arrivera-t-il dans ce glissement du prisme P_1 sur un plan plus incliné que celui du prisme qu'il supporte? Evidemment l'arête r venant à frotter contre la face rt du prisme P , la marche de cette arête se trouvera entravée, et lorsque le point m sera descendu en k , l'arête r aura subi un retard qui laissera un vide entre la face inférieure du prisme et le fond de la fracture cd ; par conséquent l'arête supérieure h restera élevée d'autant au-dessus de l'arête e du premier prisme. Le même effet se continuant, la surface du sol se trouvera disposée en échelons, avec des inclinaisons inverses des couches représentées par les lignes gh, ip, yz , qui sont la transformation brisée de la surface continue du sol: disposition qui reproduit absolument celle de la figure 7, que l'on observe si fréquemment dans les terrains ¹.

La poussée des arêtes r, m, n , produit d'ailleurs un autre effet encore, c'est une réaction de chaque prisme sur celui qu'il supporte, en vertu de laquelle ils seront forcés de rétrograder un peu et subiront un petit écartement à leur partie supérieure: en définitive leur ensemble prendra la disposition en éventail indiquée par la figure 19, où les parties vides sont ombrées. Ces vides d'écartement ne sont pas toutefois généralement destinés à subsister: lorsque la compression horizontale, principe des ondulations montagneuses, viendra s'exercer sur ces faces mal jointes, il va s'y produire des ploiements tendant à effacer tous les vides; et c'est là, pour le dire en passant, la raison probable de cette cambrure des couches qui se montre au contact d'un si grand nombre de failles, circonstance que l'on n'avait jamais cherché à expliquer. Les fig. 15, 15 bis, en reproduisent différentes variétés ². C'est encore pendant ce mouvement sans doute que les

¹ La fig. 6, tirée d'une des coupes du bassin de Dudley données par M. Murchison dans son grand ouvrage (*Silurian System*, p. 500), représente bien cet échelonnement des petites failles presque verticales, en contrepenne d'une grande faille inclinée.

² Ces coupes sont tirées du mémoire de M. J. Prestwich sur le terrain houiller de Coalbrookdale. Trans. of geol. Society, 3^e sér. vol. 5.

faces de fracture de nouveau juxta-posées, mais inégalement, ont éprouvé ces glissements par pression destinés à combler les vides inférieurs, glissements qui les ont si généralement polies et sillonnées.

Le phénomène des failles est donc, comme on peut le voir, aussi complexe dans ses causes qu'il l'est dans ses accidents et dans ses lois; la théorie que je viens d'indiquer paraît néanmoins satisfaire à toutes ses exigences: on remarquera surtout avec quelle opportunité elle répond aux lois et au fait même du changement de niveau, circonstance capitale qu'aucun autre système n'avait encore éclaircie. Mais pour achever d'établir sa vraisemblance sous ce point de vue, il convient de lui donner la sanction du calcul, et de montrer que le mode de dislocation présenté ici comme la véritable expression des faits peut et doit produire des différences de niveau dont la valeur est comprise entre les limites des nombres fournis par l'observation habituelle des failles. Ces valeurs étant au reste susceptibles de varier à l'infini dans les grandeurs moyennes, il suffira de considérer des cas voisins de la limite la plus élevée: puisqu'il s'agit d'établir que les grandes failles, telles que *cf*, sont dues à une augmentation instantanée de la courbure du méridien, cherchons donc ce qui peut arriver dans le passage de la courbure polaire à la courbure d'une des parties moyennes de l'ellipse, puis à celle d'une des parties les plus voisines de l'équateur. Nous supposerons pour plus de simplicité que les éléments elliptiques n'ont pas changé, c'est-à-dire que la vitesse de rotation est demeurée la même dans le changement d'axe et nous prendrons aussi ces éléments tels qu'ils sont aujourd'hui: suppositions nécessairement erronées, mais dont la limite d'erreur est appréciable et ne doit pas nous arrêter dans un calcul d'approximation. Nous admettrons encore que pour une petite distance comptée sur le nouvel axe de rotation, deux arcs d'ellipse à peu près identiquement inclinés, interceptés par deux parallèles à l'équateur, sont inversement proportionnels à leur rayon de courbure: dans l'hypothèse où les deux fragments *M*, *M'* (fig. 17) recouvrent des arcs différents d'une même ellipse, cela donne immédiatement l'amplitude de

l'écartement ac , car de la proportion $s : s' :: \rho' : \rho$, dans laquelle s, s' indiquent les arcs et ρ, ρ' les rayons de courbure respectifs, on déduit la différence des arcs

$$s-s' \text{ ou } \varepsilon = \frac{\rho'-\rho}{\rho'} s$$

Cet écartement connu, il n'est pas difficile d'en conclure la grandeur de la faille : le triangle acf , presque rectangle en a , donne

$$ac = cf \times \cos.acf.$$

mais cet angle acf est celui que fait la tangente en c avec le grand axe ou avec la ligne des abscisses, c'est donc l'angle dont la tangente est égale à la dérivée de la courbe; d'où l'on déduit que la faille

$$\varphi = \varepsilon \sqrt{1 + y'^2} = \varepsilon \sqrt{1 + \frac{b^4 x^2}{a^4 y^2}}$$

a et b étant les demi axes de l'ellipse terrestre. Appliquons maintenant ces résultats.

Si nous supposons d'abord que le pôle ancien vienne correspondre au point où l'abscisse x est égale aux deux tiers du grand axe, c'est-à-dire à 4000 kilomètres, point où il se trouve que l'ordonnée est sensiblement égale à la moitié de l'abscisse, la formule précédente fait voir que dans ce cas la différence de niveau $\varphi = 2,70 \varepsilon$. Or d'après l'expression du rayon de courbure citée quelques pages plus haut on trouve, pour la même abscisse,

$$\rho = 0,99 \frac{a^2}{b} = 0,99 \rho',$$

puisque a^2/b est la valeur du rayon polaire. D'où l'on déduit que l'écartement ε est égal au centième de l'arc du méridien compris entre deux plans de fracture consécutifs. Si donc l'on suppose que les divers plans de rupture parallèles à l'équateur sont espacés l'un de l'autre de 10.000 mètres, l'écart résultant du changement de courbure au point que nous considérons sera de 100 mètres, et par conséquent la faille produira une différence de niveau de 270 mètres. Il serait difficile d'imaginer pour le cas, extrême sous certain rapport,

que nous avons considéré, un nombre plus en harmonie avec la valeur connue des grandes failles ¹.

Pour avoir maintenant la limite extrême la plus absolue il faudrait faire correspondre le pôle à un point très voisin de l'équateur, à celui par exemple dont l'abscisse $x = b = 6356$ kilomètres. En portant alors dans l'expression de ε la valeur deux rayons extrêmes de l'ellipse, a^2/b et b^2/a , on voit que l'écartement est sensiblement encore $1/100$ de l'arc, et pour un espacement de 1 myriamètre ce sera encore 100 mètres. Mais l'angle des plans avec le rayon devenant bien moins grand, la différence de niveau deviendrait beaucoup plus considérable si la chute du point a pouvait se faire exactement dans la verticale : dans ce cas en effet la formule donne pour $x = b$, $\varphi = 12 \varepsilon$, et la différence de niveau pourrait être de 1,200 mètres. Mais il est bien évident que si l'effondrement se produit, ce sera sous un angle assez évasé pour diminuer notablement la hauteur de chute. Cette valeur extrême fait seulement concevoir qu'il puisse exister des failles de 500 mètres et plus ².

Le calcul confirme donc ici de la manière la plus exacte l'accord déjà remarquable entre la théorie et l'observation, et je ne sache pas que l'on ait encore soumis la loi de pareils faits à une approximation numérique aussi précise. Ainsi je pense que ces détails suffiront pour prouver que le changement dans

¹ Voir la note de la page 131.

² Il faut reconnaître au reste que tous nos résultats sont entachés d'exagération, même dans le cas extrême où nous nous sommes placés, parce que 1° il est très peu probable que la vitesse de rotation du globe ait été dans la plupart de ses phases aussi considérable qu'aujourd'hui ; 2° et surtout parce que cette position extrême du pôle correspondant à l'équateur indique toujours, d'après la composition des forces, une diminution dans la vitesse de rotation par l'effet du choc, ce qui changeant le rapport des axes diminue sensiblement l'écartement ε tel que nous l'avions trouvé dans la supposition de la persistance de ce rapport. C'est ce que l'on peut vérifier en substituant des valeurs convenables des rayons de courbure dans la formule générale qui donne la valeur de ε .

la rotation du globe explique toutes les circonstances du phénomène des failles non seulement mieux qu'on ne l'a fait jusqu'ici, mais d'une manière qui paraît être complète et avec une rigueur inconnue encore. Il me reste maintenant à appliquer le même point de vue théorique à l'un des plus intéressants problèmes que nous présente la surface des continents, à l'un de ceux qui se rencontrant sans cesse sous nos pas, ont de tout temps vivement excité l'attention des naturalistes, sans que l'on n'ait pu lui donner encore une solution incontestable : je veux parler de la formation des vallées.

J'ai déjà eu occasion d'indiquer ailleurs ¹ les circonstances principales de cette question de géologie géographique et les difficultés qu'elle soulève. On ne saurait nier qu'il n'existe des vallées de fracture, et pour moi je suis porté à penser que toutes les dépressions du sol exactement alignées, soit qu'elles se resserrent entre d'abruptes et profondes murailles, soit qu'un seul escarpement les domine, soit enfin qu'elles s'évasent en de larges vallées, dérivent également de fractures. Mais la principale difficulté de ce mode de formation portait sur la manière dont ces vides sont terminés par le bas. Sont-ils dans certains cas des fentes d'écartement? Mais d'où viendrait alors qu'ils fussent régulièrement fermés à leur partie inférieure, et quel phénomène aurait pu ainsi arrêter la fissure dans la profondeur, ou quels remblais pourraient l'avoir comblée? Sera-ce une simple dislocation par effondrement ou soulèvement? Mais qui ne voit que la disposition si fréquente des fragments mobiles en forme de coins aurait dû les arrêter dans leur chute? C'est ainsi qu'une judicieuse observation des faits avait porté M. Elie de Beaumont ² à représenter la formation de la grande vallée du Rhin, dans l'intervalle où son alignement est si remarquable, par un effondrement entre des plans de fracture convergents vers la profondeur, et il y a tout lieu de penser que telle est la véritable expression des faits : mais théoriquement il paraît bien

¹ Page 38.

² Explication de la carte géologique de France, tom. 1, p. 437.

difficile d'imaginer comment un prisme de terrain *en forme de coin* a pû s'enfoncer ainsi de 3 ou 400 mètres par sa seule pesanteur, sans refouler et recourber avec force les parois résistantes sur lesquelles il s'appuie des deux côtés opposés.

Dans ces derniers tems la relation des vallées avec les fractures du sol a été remarquée par plusieurs autres savants observateurs : M. Dufrenoy l'a constatée il y a quelques années pour la vallée de la Garonne; les observations de M. Boué dans ses voyages en Allemagne en ont donné des exemples multipliés et sur une vaste échelle; M. de la Bèche enfin, dans ses *Recherches sur la partie théorique de la géologie*, a signalé cette particularité très intéressante que presque toutes les vallées du terrain de craie d'Angleterre sont visiblement établies sur une faille; et il y a lieu de penser que de semblables résultats sont d'une grande généralité: mais je ne sache pas que l'on ait pu encore rattacher à des causes et à des lois régulières un phénomène aussi important.

La théorie des failles telle que je l'ai indiquée comme conséquence possible d'un changement dans la rotation du globe, répond au contraire de la manière la plus heureuse à toutes ces apparences de la formation des vallées par fracture, par effondrement. La chute des grands prismes de terrain suspendus au dessus d'une ouverture béante, et l'échelonnement des niveaux qui en résulte, doivent produire en effet à la surface du sol des dépressions alignées qui représentent exactement nos vallées. Si l'on se reporte à la fig. 18, il est facile de voir que la dépression brusque *cfeh*, entre deux failles convergentes, n'est autre chose qu'une vallée évasée, et que les dépressions *egi*, *imj* figurent les vallées à un seul escarpement, si fréquentes et si peu expliquées. Lorsque la grande fissure *abcd* est peu inclinée au contraire sur la verticale, comme le représente la fig. 20, l'intervalle resserré *cfts*, laissé vide par la chute d'un prisme unique, peut produire une de ces vallées étroites et profondes, que l'on a souvent attribuées à des fentes d'écartement. Ce n'est peut-être pas toutefois l'unique origine de ces sortes de vallées: les vides allongés qui se produisent entre les prismes disloqués (fig. 19), mal refermés ensuite par la pres-

sion, peuvent aussi avoir donné lieu à quelques vallées extrêmement étroites ou à ces filons en forme de coin que l'on rencontre quelquefois dans l'exploitation des matières métallifères.

Une disposition semblable à celle de la fig. 20, où un seul prisme s'est effondré, fait concevoir enfin comment les couches peuvent se correspondre de part et d'autre d'une vallée étroite et escarpée, sans que pour cela on doive en attribuer la formation à l'érosion des eaux; ce qui répond à une des principales objections que l'on avait faites contre les vallées de fracture, et tend à réduire à des proportions plus convenables ces résultats gigantesques de l'érosion dont la réalité aurait par trop démesurément prolongé la durée des tems géologiques.

Ainsi notre théorie des failles non-seulement s'applique avec rigueur à toutes les circonstances du changement brusque dans le niveau des terrains, mais elle embrasse encore dans toutes ses variétés le phénomène des vallées alignées. Quelle puissance ne vient-elle donc pas donner à l'hypothèse des choes qui forme sa première base?

On peut résumer ainsi ce qui concerne cette théorie :

V^e PRINCIPE. Le résultat caractéristique des failles en géologie, c'est-à-dire la différence de niveau qui les accompagne constamment, est due à l'expansion instantanée des grandes fractures parallèles à l'équateur, par suite du changement de la courbure dans le méridien et avant le refoulement de celui-ci par la pression venue des pôles : de cette expansion résulte la chute d'un massif en surplomb, qui donne lieu d'une part à un grand abaissement de niveau dans la faille principale, et de l'autre à la formation d'une série de fractures secondaires à niveaux échelonnés en sens inverse.

Une des principales conséquences de ces mouvements est la production des vallées de fracture et en général de toutes les dépressions du sol assujéties à un alignement exact.

Ici se borne tout ce que nous croyons avoir à dire d'essentiel sur les modifications physiques permanentes qui seraient

pour le revêtement solide du globe les effets nécessaires de son changement de rotation. Ce serait peut-être le lieu de jeter un coup-d'œil en arrière pour juger avec quel ensemble les conséquences de cette hypothèse embrassent, dans leur universalité, tous les grands résultats de la géologie.

Nous y verrions en premier lieu les conditions universelles de parallélisme, que l'étude du globe nous révèle dans toutes les modifications de sa surface, en ressortir, non plus avec le vague du possible, mais avec la rigueur des lois géométriques, et dériver de la régularité des grandes forces de la nature combinées avec la symétrie de ses formes.

Nous verrions ces résultats dynamiques se diviser en deux genres exclusifs de modifications, les fractures planes et les ridements, correspondant aux deux seuls ordres de dislocation qui aient accidenté d'une manière générale la surface du globe depuis son origine, savoir les failles et les montagnes. Et l'on devra reconnaître dans ce double mouvement l'action simultanée des deux grandes forces qui régissent l'équilibre de tout corps planétaire : la force centrifuge agissant par expansion et rupture, la force centripète par refoulement et contraction.

Nous verrions enfin la théorie appliquée à ce phénomène des chocs, après avoir ainsi vérifié toutes les données de l'observation, les dépasser enfin en venant révéler et consacrer comme principe une loi physique que l'étude du relief de la sphère avait fait soupçonner déjà, celle de la concentration des principales chaînes de montagnes sur le contour de divers grands cercles de la terre, et une autre loi encore que l'on n'avait pu soupçonner, celle de la distribution des mêmes chaînes en des points précis du contour de ces cercles : préparant ainsi non-seulement des moyens puissants d'investigation, mais des vérifications non moins puissantes pour l'étude chronologique des révolutions du globe.

Tels sont les résultats qui concernent d'une manière exclusive les modifications du revêtement solide de la terre : mais pour achever tout ce qui a rapport aux mouvements de la surface terrestre dans cette grande hypothèse des chocs, il nous reste à considérer le déplacement du liquide superficiel, de

l'eau des mers, auquel on avait autrefois donné une si grande part dans les effets dévastateurs du phénomène. Par un résultat des plus remarquables cet effet tend ici notablement à s'atténuer en vertu de sa combinaison avec la circonstance fondamentale de la fluidité intérieure.

Les lois physiques auxquelles est assujéti le fluide de la surface, dans l'établissement de son nouvel équilibre, sont les mêmes que pour le fluide intérieur, aux modifications près qui résultent des distances respectives au centre de la terre. Un parallélisme exact dans la courbure des deux liquides serait pour l'eau, relativement aux continents, l'équivalent d'une immobilité absolue; mais cette immobilité relative de l'eau des mers ne saurait exister en réalité, la petite inégalité du rayon des deux surfaces suffit pour établir une différence dans leur courbure, et cette différence variant de position et d'amplitude à chaque changement dans la rotation, doit produire sur certaines portions du globe un envahissement ou un retrait de la mer. La force centrifuge est en effet également nulle pour les deux surfaces fluides sur l'axe même de rotation; à l'équateur elle est plus considérable pour la surface extérieure: il doit donc en résulter pour cette dernière ou pour l'eau des mers une convexité proportionnellement plus grande; et en supposant à l'enveloppe solide une épaisseur partout identique, cette forme impliquerait une plus grande hauteur d'eau au-dessus de l'équateur que dans les régions polaires, ce qui paraît d'ailleurs reconnu.

Dans les idées ordinaires, cette différence dans la profondeur des mers aux pôles et à l'équateur devrait être peu considérable; car à moins de supposer que l'écorce solide du globe s'est affaissée depuis sa solidification, elle devrait avoir conservé la courbure propre à sa fluidité primitive et par conséquent le méridien terrestre devrait concorder approximativement avec celui des eaux. Si l'on vient donc à vérifier que la profondeur des mers équatoriales est notablement plus grande que celle des mers polaires, il faudra en conclure: 1° qu'il existe une fluidité intérieure; 2° qu'on ne saurait admettre que l'une ou l'autre de ces deux alternatives: ou un affaisse-

ment progressif de l'écorce solide du globe, ou la réalité de l'hypothèse des changements de rotation.

Mais la question n'est point là dans ce moment, il s'agit seulement d'établir quels pourront être les résultats de cette hypothèse même : or, il est évident que puisqu'une de ses conséquences est un exhaussement des eaux à l'équateur, elle déterminera sur la surface de la terre un déplacement de ce liquide qui pourra même être considérable. La mesure de ce déplacement ne dépendra pas seulement de la nouvelle position équatoriale, elle dépendra aussi à un haut degré de la variation dans l'intensité de la vitesse.

On sait que la force centrifuge est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation, pour des points situés à une égale distance de l'axe. Or si par l'effet rétrograde d'un choc cette vitesse venait à diminuer notablement, la force centrifuge diminuant dans une proportion beaucoup plus rapide, les eaux descendraient de l'équateur, quand bien même il n'y aurait qu'une très faible déviation de l'axe, et viendraient envahir d'une manière permanente des régions polaires précédemment asséchées. Le contraire aurait lieu par l'accroissement de la vitesse, et les eaux afflueraient alors vers l'équateur nouveau avec une énergie plus que proportionnelle à cette augmentation.

Si donc il y a eu en réalité, comme nous le verrons par la suite, une succession alternante dans les vitesses de rotation de la terre, il a dû en résulter par cela seul de grandes oscillations dans le niveau relatif des eaux, et c'est par ces deux variations de la vitesse, en direction et en intensité, que seraient expliquées ces superpositions réciproques de formations marines et lacustres et cette récurrence alternative des terrains de grès et des terrains calcaires, les uns témoignant la rareté locale, les autres l'abondance et la profondeur des eaux marines. Cette idée émise, il nous restera plus tard à en faire la vérification, en coordonnant ces récurrences, bien connues dans la géologie de nos contrées, soit avec les positions de l'équateur soit avec les accroissements ou diminutions de vitesse indiqués par d'autres moyens que la théorie nous enseigne et que nous

avons annoncé déjà. Sans rien préjuger encore des résultats de cette étude nous pouvons consacrer du moins cet élément d'une vérification nouvelle, sous la forme suivante.

VI^e PRINCIPE. *Relativement à l'eau des mers, l'effet d'un changement de rotation sera aussi de modifier sa courbure superficielle ; qui ne saurait être parallèle à celle de la surface fluide intérieure ; elle s'en éloignera d'autant plus que la vitesse de rotation sera plus grande. De là doit résulter en principe une fluctuation dans le niveau relatif des mers à chacun de ces cataclysmes : premièrement selon la position de l'équateur, en second lieu selon les modifications de la vitesse. Les traces de ces fluctuations se retrouvent en effet en géologie.*

Si l'on connaissait exactement au tems actuel l'excès de courbure propre aux eaux de la mer, on en pourrait tirer un précieux résultat pour la connaissance physique du globe. En admettant que l'enveloppe solide de la terre fût partout d'une épaisseur identique, et en faisant abstraction des ridements qui l'accidentent, le lit des mers devrait être parallèle à la surface du fluide intérieur : ce résultat doit exister à coup sûr dans les plus grandes profondeurs, car d'après le mode de formation des terrains nous avons vu qu'il ne peut se produire que de très faibles dépôts dans la pleine mer, et il existe sans doute des étendues où elle a dû rester profonde depuis l'origine. Or si des sondages multipliés donnaient un jour avec une exactitude suffisante le rapport des plus grandes hauteurs du niveau de l'Océan au-dessus de son fond aux diverses latitudes, il y a lieu de penser que l'on pourrait alors en conclure la véritable épaisseur du revêtement solide de la terre. La différence de courbure entre les deux surfaces fluides est en effet une fonction de leur distance, et il deviendrait possible d'en déduire cette distance inconnue, soit par les propriétés de l'ellipse, soit par les lois de la pesanteur en la calculant au pôle et à l'équateur pour cette profondeur nouvelle et lui appliquant comme sur la surface de la terre le beau théorème de Clairaut.

La différence de courbure des deux fluides intérieur et extérieur devrait influencer aussi sur le rapport de l'aplatissement

continental à celui des eaux de la mer, s'il n'y avait probablement pour nos continents une compensation à cette différence dans l'amplitude des ridements qu'a subis l'enveloppe solide de la terre, amplitude croissante, comme l'excès de courbure des eaux, du pôle vers l'équateur. Cette cause et la grande prédominance des eaux en étendue doivent égaliser aussi, quant à la masse, l'effet de la surface des terres et des mers sur les mouvements de la lune. Mais dans l'intérieur des mers il est des points où aucuns ridements n'ont dû encore se faire sentir dans l'écorce solide du globe, et c'est là que pourrait se résoudre la question de la différence des deux courbures, par conséquent celle de l'épaisseur du revêtement lui-même, épaisseur du reste que je crois avoir des raisons d'estimer peu considérable, comme je l'indiquerai par la suite; peut-être donc est-il réservé à l'avenir des études hydrographiques de fournir la solution de cet intéressant problème.

Les considérations qui précèdent, sur le déplacement de la masse des eaux dans un changement de rotation, conduisent directement à une question que nous ne saurions complètement passer sous silence, car elle fait partie de l'histoire de la terre, quoique de son histoire la plus récente, et sans doute on pourrait en demander compte à nos idées systématiques : la question dont je veux parler est celle qui a joué un si grand rôle dans les premiers systèmes des géologues, c'est en un mot celle du déluge.

Cette grande tradition, que son caractère religieux semble placer hors de la portée de notre examen, peut cependant entrer dans le domaine de la science par son caractère historique : car elle n'appartient pas seulement à nos livres sacrés, elle s'est conservée encore dans la mémoire des peuples les plus éloignés, et indépendamment des Hébreux et des Grecs, on la retrouve chez les habitants du nouveau monde, chez ceux de la Chine et même de l'Océanie. Elle semble donc ainsi appartenir à l'histoire, et l'on peut se proposer, comme on a fait déjà, de l'expliquer par des causes naturelles, par un de ces phénomènes inusités au moyen desquels il est permis de penser

que se manifeste matériellement la puissance de Dieu, lorsque son dessein est de détruire.

Or il est naturel d'imaginer, de chercher même une relation entre le déplacement des mers dont un choc de la terre serait suivi et le grand fait dont il est question. Déjà l'influence d'une comète, par son passage à proximité de la terre, avait été indiquée comme cause possible de ce grand mouvement des eaux : mais la masse si peu considérable de ces corps et surtout leur extrême vitesse ne donnent que bien peu de chose à craindre de leur attraction¹, et ce n'est en réalité que dans leur rencontre que l'on pourrait chercher les causes d'un événement semblable.

Le déluge universel peut-il être en réalité considéré comme effet d'un choc ? La difficulté de cette question n'est pas dans le déplacement des eaux : ce déplacement est la plus claire des conséquences, et il doit même y en avoir réellement deux, l'un éphémère, dû à la vitesse acquise de ce mobile dans le changement brusque de rapidité ; l'autre permanent, résultat de la variation de la courbure s'il y a déplacement de l'équateur. Mais la difficulté principale porte ici sur ce point, desavoir comment aucun être humain, aucun animal terrestre, aurait pu résister à la violente secousse qu'une semblable rencontre devait produire ; car la brusque augmentation ou diminution de la vitesse dans la partie solide du globe aurait dû lancer comme des projectiles tous les corps mobiles qu'il supportait.

Sans vouloir discuter longuement un sujet semblable, nous pensons cependant que ce résultat n'est pas impossible. La limite d'atténuation dans les chocs qu'a pu éprouver la terre est sans doute plus indéfinie encore que la limite supérieure de leur énergie ; et ne peut-il s'en trouver un qui ait produit une divagation instantanée des eaux sans anéantir complètement les races terrestres ? Un choc qui n'altérerait que de $\frac{1}{1000}$ notre vitesse de translation, comme pourrait le faire par exem-

¹ Je ne saurais mieux faire que d'en appeler sur ce sujet à la savante notice que M. Arago a publiée sur les comètes dans l'Annuaire du bureau des longitudes de 1832.

ple la comète de 1770, ne produirait pas une secousse plus considérable que le tems d'arrêt brusque d'une locomotive lancée avec toute la force de sa vapeur; et l'on sait par l'expérience, quelque triste qu'elle soit, qu'un pareil choc n'est pas nécessairement mortel. Quant au changement de vitesse résultant de la rotation, il peut arriver telle combinaison de latitudes qui en efface entièrement l'effet. Et que dire maintenant des navigateurs que la mobilité des eaux aura pu sauvegarder en partie de cette instantanéité dans la variation de la vitesse ?

Je n'en dirai pas davantage sur ce sujet, et je n'ai prétendu ici que chercher à faire considérer le fait traditionnel du déluge comme possible au point de vue de la raison humaine, mais non point soumettre à une discussion le dogme religieux; me gardant d'oublier ce précepte que la grande voix du chancelier Bacon faisait entendre aux premiers rénovateurs des sciences :

Huic autem vanitati nonnulli ex modernis summâ levitate itâ indulserunt, ut in primo capitulo Geneseos et aliis scripturis sacris philosophiam naturalem fundari conati sunt: inter viva quærentes mortua...

Tantò magis hæc vanitas inhiibenda venit et coërcenda, quia ex divinorum et humanorum malesanâ admixtione non solùm educitur philosophia phantastica, sed etiam religio heretica. Itaque salutare admodùm est si, mente sobriâ, fidei tantùm dentur quæ fidei sunt.



CHAPITRE VII.

DES EFFETS CLIMATÉRIQUES QUI POURRAIENT RÉSULTER D'UN CHANGEMENT DANS LA ROTATION DE LA TERRE.

Outre les effets physiques, soit permanents, soit éphémères, que j'ai signalés dans le chapitre précédent comme conséquences du changement de rotation, un semblable cataclysme aurait pour le globe terrestre d'autres résultats encore, que je pourrais nommer physiologiques, parce qu'ils se rapportent surtout au développement de la vie et en général de toute organisation à sa surface. Ce sont ceux qui dérivent de la division des tems, de la loi et de la distribution des climats. Je ne ferai qu'indiquer ici ces caractères, dont il ne m'appartient pas de poursuivre l'étude dans ses détails, mais je dois au moins en signaler le principe, car c'est là que réside selon nous la cause principale et déterminante des variations qui distinguent les débris organisés des divers âges. Indiquons d'abord en peu de mots ce qui est relatif aux variations dans la mesure du tems.

Dans sa translation annuelle autour du soleil, la terre décrit actuellement 365 fois sa révolution complète sur elle-même, et c'est ce rapport entre les deux mouvements qui détermine le principal élément de la grandeur absolue des jours et des nuits. Que l'on suppose l'un des deux mouvements changé ou tous les deux à la fois, une différence importante en résultera nécessairement pour toute la surface de la terre. Si c'est la rotation qui a varié, cette différence portera sur la longueur du jour moyen; si c'est la translation, elle portera sur les modifications périodiques que les saisons et les latitudes produisent dans le tems absolu de l'apparition et de l'absence des

rayons solaires ; si ce sont enfin les deux mouvements qui ont varié dans le même sens, ils s'influenceront réciproquement de manière à augmenter ainsi la somme définitive des différences.

Quel sera maintenant sur tout ce qui vit ou se développe à la surface du globe l'effet d'une aussi essentielle variation que celle de la grandeur absolue du jour et de la nuit ? Quelle est l'influence que peut avoir par sa *durée* ce sommeil alternatif de la nature, ce passage de la chaleur au froid, du mouvement au repos, de la lumière aux ténèbres, de la vie enfin pour les êtres animés à un engourdissement image de la mort, mais réparateur des forces ? C'est une étude physiologique qu'il ne m'appartient pas d'aborder ; je ne sais même si elle pourrait être complètement accessible aux naturalistes dans l'état actuel des connaissances. Mais il est toutefois dans cette influence inconnue une tendance générale qu'il semble donné au sens naturel le plus simple de conjecturer. N'est-il pas vraisemblable que dans les êtres de chaque espèce il doit exister un rapport entre la puissance des organes et la durée du tems où ces organes peuvent demeurer actifs d'une manière continue ? La vigueur et le large développement des formes musculaires, par conséquent celui de la charpente osseuse qui en constitue le support, doit être nécessairement lié à la durée plus grande de cette période d'activité ; tandis que la délicatesse au contraire et la gracilité des formes semblent devoir convenir à sa moindre étendue.

Or qui refusera de reconnaître la possibilité d'une relation entre ce résultat logique des causes finales et les grandeurs gigantesques que nous offre l'organisation de tous les êtres à certaines époques géologiques ? Si le mouvement de rotation de la terre était alors notablement plus lent qu'il ne l'est aujourd'hui, pourrait-on prévoir un résultat différent ? Et si des modifications réelles peuvent reconnaître une semblable cause, n'est-ce point là une vue précieuse et importante, à introduire dans l'étude organique des âges passés ?

La variation relative à la loi des climats doit avoir une influence plus grande encore et une portée beaucoup plus étendue. Voici de quel principe elle relève.

On sait que la différence des saisons et l'inégale intensité de la chaleur pour une même latitude aux divers moments de l'année provient de l'inclinaison du plan de notre équateur sur le plan fixe de l'orbite terrestre ou de l'écliptique. Dans son mouvement de révolution annuelle l'axe de la terre se transporte parallèlement à lui-même et par conséquent, selon les points de l'orbite où il se place, c'est tantôt sa partie boréale tantôt sa partie australe qui tourne vers le soleil l'angle aigu qu'elle forme avec le plan de l'orbite; chacun des hémisphères que sépare notre équateur se trouve donc alternativement exposé aux rayons les plus directs de cet astre ou à ses plus obliques, et de là naît la distinction des étés et des hivers. Cette marche des saisons se représente plus facilement du reste en substituant aux mouvements réels les mouvements apparents, et en imaginant que le soleil décrit lui-même une orbite annuelle dans un plan incliné de $23^{\circ} 28'$ sur le plan supposé immobile de l'équateur terrestre; les tropiques sont, comme on sait, les parallèles du globe qui limitent la projection de cette orbite solaire et entre lesquels s'effectue la course apparente du soleil dans une année: à mesure qu'il s'avance vers l'un de ces tropiques, il porte à des régions plus voisines des pôles la chaleur, la lumière, la fécondité. Tel est l'état actuel, telle est la disposition sur laquelle se fonde la division des saisons et sa relation avec les latitudes: elle exerce une influence fondamentale sur le caractère de tous les êtres dispersés sur la surface de la terre et de toute l'organisation qui s'y développe; une atteinte portée à cet état particulier d'équilibre modifierait inévitablement ces caractères.

Or le résultat nécessaire et l'un des résultats les plus tranchés d'un changement de rotation serait d'altérer non pas seulement l'ordre des latitudes et par conséquent la distribution des climats, mais d'altérer encore la loi même de ces climats, en modifiant l'inclinaison de l'équateur terrestre sur le plan de l'écliptique. Le caprice d'un choc peut amener en effet l'équateur de la terre à toutes les inclinaisons possibles sur le plan de son orbite, puisqu'il modifie la vitesse de rotation avec une énergie relative beaucoup plus grande que celle de

translation ; et il pourra même arriver que se réalise le cas paradoxal d'un axe de rotation exactement situé dans le plan de l'orbite, disposition qui n'est pas du reste inconnue aux astronomes, car elle paraît appartenir dans notre système à la planète Uranus.

Il devient donc intéressant d'étudier comment devrait varier la loi des climats par l'accroissement progressif de l'angle que fait le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique.

Si l'axe de rotation de la terre demeurerait constamment perpendiculaire au plan de son orbite, la constance indéfinie de la température en chaque point de la terre et l'égalité absolue des jours et des nuits seraient les conséquences de cette disposition. Dans un pareil état de choses les saisons seraient inconnues, l'équateur recevrait une chaleur toujours égale et les pôles seraient toujours également froids : comme la terre doit recevoir d'ailleurs le même cône de rayons calorifiques quelle que soit l'inclinaison de son équateur, il s'en suit que cette disposition d'une inclinaison nulle réalise en définitive le maximum de chaleur annuelle pour les régions équatoriales et le maximum de froid total pour la région des pôles.

Si nous inclinons maintenant progressivement l'équateur sur le plan de l'orbite, comment se distribuera sur la terre la somme constante de chaleur annuelle ? L'équateur cesse alors par intervalles de recevoir normalement les rayons solaires, il perd donc proportionnellement de sa chaleur totale et il en perd une quantité définitive d'autant plus grande que l'inclinaison est plus considérable. Cette chaleur perdue par l'équateur ira nécessairement refluer vers les pôles, puisque la somme en demeure toujours la même : ceux-ci ne restent plus en effet exposés à l'obliquité seule des rayons du soleil, ils en reçoivent par intervalle les rayons directs ; mais par intervalle aussi ils cessent totalement de les recevoir, et l'on ne saurait décider s'il n'y a pas une compensation entre les deux effets, n'était cette considération de la constance dans la quantité de chaleur totale et la nécessité que toute celle qui est perdue par l'équateur soit gagnée par les régions polaires ; cette considération est décisive. Ainsi à la limite de l'accroissement des

inclinaisons, lorsque l'équateur terrestre se trouvera perpendiculaire à l'écliptique, alors sera réalisée la condition du minimum de chaleur annuelle à l'équateur et du minimum de froid annuel au pôle, en un mot ce sera le cas *de la plus grande uniformité possible dans les températures moyennes aux divers points du globe.*

Par un singulier contraste, cette tendance à une égale répartition des sommes de chaleur annuelle s'unit, dans le cas dont nous parlons, à la plus grande variation locale, au moins dans les points extrêmes : les pôles par exemple sont tantôt privés aussi complètement que possible des rayons solaires, tantôt par la présence continue de ces rayons pendant tout le mouvement de rotation ils éprouvent une élévation de température momentanée dont l'état actuel de nos climats ne peut nous donner qu'une bien faible idée ; l'équateur d'autre part éprouve deux fois aussi des froids momentanés comparables à ceux de nos pôles actuels. Il est toutefois probable que la chaleur emmagasinée pendant les deux étés doit servir à tempérer le froid des hivers et réciproquement, de manière à donner sans doute une plus grande continuité à la température locale qu'on ne le croirait au premier aperçu ; et nous allons voir que l'évaporation doit aider plus encore à cette atténuation des températures extrêmes, au moins au voisinage des mers.

Arrêtons-nous encore un peu en effet sur cette grande anomalie climatérique, car elle n'est pas pour la terre même une utopie, et nous montrerons qu'elle a dû se réaliser pour elle à certaines époques déterminées. Son étude prend donc un intérêt réel, et il est à désirer qu'elle excite quelque jour les recherches sérieuses des physiciens et des naturalistes. Le phénomène le plus spécial que présente cet état de choses consiste en des températures extrêmes, dont l'intensité est complètement inconnue aujourd'hui ; les rayons solaires dardant normalement sur les pôles pendant une saison entière, sans l'intermittence des nuits, et d'autre part l'absence complète de ces rayons pendant une autre série continue, doivent donner lieu à des phénomènes auxquels la climatologie actuelle du globe ne nous présente rien de comparable. Parmi ces effets,

ceux de la chaleur sont les plus importants à considérer, car le froid n'est qu'un état négatif, tandis que la chaleur développe, active et féconde tous les éléments de la nature : de son excès il doit donc dériver des résultats particulièrement remarquables. Un de ses principaux effets est sans aucun doute une évaporation considérable et tout ce qui en est la conséquence plus ou moins prompte, c'est-à-dire une grande humidité dans l'air, des nuages emportés par les vents, et se résolvant en pluies soit dans les régions supérieures de l'atmosphère, soit dans des contrées moins chaudes, soit au retour d'une température moins élevée. La force de vaporisation de l'eau augmentant rapidement avec la température et ne dépendant que d'elle, l'humidité atmosphérique doit en effet être une suite nécessaire de cette température excessive, vu surtout le peu d'extension que devaient avoir les continents aux premières époques géologiques.

Mais cette évaporation pendant les grandes chaleurs et la précipitation des vapeurs à l'époque des froids auront aussi pour effet d'amoindrir les deux excès inverses de température, dans une proportion plus forte encore qu'on ne le remarque dans les îles de notre époque; leur second effet sera d'entretenir dans l'air, au voisinage des masses d'eau, une saturation d'humidité très favorable au développement de certaines plantes qui en sont particulièrement avides, d'alimenter en outre les marécages, les torrents et les fleuves.

Or maintenant si l'on vient à comparer ces résultats avec ceux que nous offre l'étude organique et minéralogique du terrain houiller, par exemple, l'on ne saurait s'empêcher d'être frappé d'une analogie singulière : développement colossal de plantes avides d'humidité, abondance des marécages indiquée par les couches charbonneuses, celle des eaux courantes et même torrentielles indiquée par la puissance et l'étendue relative des grès, la variation enfin dans le pouvoir de transport de ces eaux indiquée par les alternances fréquentes dans la nature et la force des fragments charriés. Si l'on met de plus en rapport l'uniformité presque universelle de la végétation houillère avec ce que nous avons dit aussi de l'uniformité dans

la somme annuelle des températures aux diverses latitudes qui doit caractériser une pareille disposition, on reconnaîtra que l'analogie semble poussée jusqu'à sa limite. Or que dira-t-on si je viens à faire reconnaître, par l'étude géographique et géologique, qu'à l'époque du terrain houiller l'équateur terrestre avait précisément cette disposition si anormale d'être sensiblement perpendiculaire au plan de l'écliptique ?

On pourra peut-être objecter à nos conclusions que les plantes du terrain houiller n'auraient pu supporter des variations de climat aussi considérables que cette position ne semble les indiquer. Mais nous ferons remarquer au contraire que cette végétation, peu étudiée d'ailleurs, paraît supporter non-seulement nos plus chaudes latitudes mais encore des latitudes assez élevées, lorsqu'elle est favorisée par l'humidité de l'atmosphère : ainsi nous avons cité la nouvelle Zélande, où l'on rencontre actuellement les fougères en arbre. C'est d'ailleurs une observation connue des botanistes et due à Linnée, que les plantes marécageuses supportent mieux que les plantes terrestres les variations de climat ; la géographie botanique a mis ce principe en évidence ¹.

C'est au reste aux naturalistes, et aux botanistes en particulier, qu'il appartiendra de compléter ces vues ou de les rectifier, si les idées auxquelles ce livre est consacré leur donnent un intérêt assez puissant pour provoquer des recherches spéciales : il manque trop à mes connaissances sous le point de vue des études naturelles pour que je m'étende davantage sur un semblable sujet, et l'application réelle de ces principes aux époques géologiques lui donnera d'ailleurs bientôt plus de valeur que ne lui en saurait donner une vague dissertation sur des combinaisons possibles.

¹ Voir à ce sujet l'ouvrage intéressant du docteur Link que j'ai déjà cité : *Le monde primitif*, trad. franç. p. 106, 107.

CHAPITRE VIII.

DE LA PROBABILITÉ MATHÉMATIQUE QUE LA TERRE AIT ÉTÉ RENCONTRÉE PAR DES COMÈTES.

Lorsque l'étude des mouvements que produirait à la surface de la terre son changement de rotation par l'effet d'un choc, a démontré la concordance parfaite, géométrique, de ces mouvements avec la nature des grands accidents dont la trace régulière se retrouve en tous les points du globe et appartient à tous ses âges; lorsqu'ensuite appliquant ces vues et faisant concorder la direction de ces accidents et leur position précise avec l'ordre reconnu des formations, on est parvenu, comme nous l'exposerons un peu plus tard, à marquer la place déterminée qu'occupait pour chacun de ces âges l'équateur de la terre : il est permis alors d'arrêter sérieusement sa pensée sur la possibilité réelle de faits aussi extraordinaires que le choc de la terre par des comètes, et remontant pour un moment de son étude à l'étude du ciel, il convient de rechercher si l'on peut dans l'état actuel des idées faire admettre la concordance de ces faits avec les phénomènes et les lois astronomiques.

Et toutefois au seul éveil sérieux d'une semblable recherche, l'imagination s'étonne : dominée par la puissance des idées reçues, je dirais presque des préjugés astronomiques, et habituée par l'harmonie des grands mouvements célestes à l'idée d'un immuable équilibre, elle semble se refuser à admettre comme possibles de semblables perturbations et elle récuserait volontiers le témoignage de la raison et de l'observation elle-même, qui lui en montre la trace évidente sur le globe que nous habitons. Comment penser d'ailleurs que des corps auss

petits que la terre et les comètes ont réellement pû se rencontrer à travers l'espace, à travers l'immensité des distances qui séparent l'un de l'autre les divers corps de notre système solaire? Et si la supposition d'un seul événement de ce genre provoque dans l'esprit une telle résistance, que pensera-t-on d'un système qui amoncelant l'une sur l'autre tant d'impossibilités apparentes, prétend retrouver sur la surface de la sphère terrestre la trace régulière et l'ordre chronologique de quinze chocs successifs?

Ce n'est pas la première fois cependant que l'influence des comètes a été introduite dans le domaine de la géologie : en même tems que Whiston, à la fin du 17^{me} siècle, prétendait expliquer le déluge par le passage d'un de ces astres à proximité de la terre, le célèbre astronome Halley, plus hardi mais plus logique en même tems, attribuait à un choc le grand mouvement des mers qui d'après les idées des anciens géologues aurait porté les coquilles marines au sommet des montagnes, idée d'ailleurs inadmissible aujourd'hui dans ses conséquences géologiques; enfin plus récemment une semblable hypothèse a été renouvelée, je crois, pour expliquer la variation subite de climat que témoigne la présence des éléphants sur le sol de la Sibérie. Mais jamais l'imagination n'était allée jusqu'à multiplier, comme nous le faisons, les retours d'un semblable phénomène, jamais les conjectures n'avaient été poussées, sous le rapport des nombres, jusqu'à une aussi singulière exagération de l'improbable.

Et cependant lorsque l'on examine le principe astronomique des chocs avec la sérieuse attention que la précision de ses résultats ne permet pas de lui refuser, on demeure convaincu que loin d'aller à l'encontre de toute vraisemblance, il acquiert, même au point de vue le plus général des chances mathématiques, une probabilité qui équivaut à la certitude. Nous disposons en effet d'un élément dont il n'avait pas été tenu compte encore dans les phénomènes terrestres, le tems; et en déroulant en arrière de nous l'immensité réelle de ses espaces, il ouvre ainsi à nos conjectures un champ nouveau et des possibilités inconnues. Lorsque par l'étude des faits réels de la géolo-

gîe nous établissons un chiffre énorme comme limite inférieure de la durée moyenne des formations ¹, c'était assurer en même tems un immense intervalle aux incessantes divagations de ces petits corps qui sillonnent l'espace dans tous les sens et qui déviés sans cesse de leur course, percent ainsi en des points toujours nouveaux le plan de l'orbite de la terre ; les conséquences de cette immensité dans le nombre des combinaisons amenées par la course variable des comètes pendant d'immenses intervalles de tems, ces conséquences n'ont jamais été recherchées attentivement, sans quoi il est permis de penser que la nécessité des chocs en serait d'elle-même ressortie. Mais cette recherche devait paraître sans objet, à cause des idées erronées que l'on s'était formées sur la durée des tems qu'a parcourus la terre depuis qu'elle est habitée : ces tems amenés maintenant à leur proportion véritable, et les effets des chocs sur la forme du revêtement terrestre une fois connus, la question de leur probabilité astronomique ne saurait plus être passée sous silence.

¹ Il est essentiel de rappeler en effet que la valeur qui peut être assignée aux durées géologiques par l'épaisseur des dépôts ne saurait être qu'une limite inférieure : la formation de ces dépôts, soit arénacés soit calcaires, s'effectuant principalement le long des côtes et dans les moindres profondeurs. Le comblement progressif qui en résulte et l'avancement incessant de ces côtes font que nulle part l'épaisseur d'un terrain ne correspond à toute la durée d'une période d'entassement et qu'elle n'indique souvent qu'une faible partie de cette durée : ainsi lorsque les alluvions du Rhône et des autres torrents auront comblé le lac de Genève jusqu'au niveau de la plaine, combien de tems encore ce fleuve ne coulera-t-il point sur cette plaine ainsi nivelée, sans y laisser la trace de son passage et par conséquent celle du tems ? Lorsque le Pô et l'Adige auront, par leur ensablement, fermé aux eaux le golfe de Venise et une partie de l'Adriatique, comment s'y indiquera la marche des années ? Il en est de même des calcaires lorsque le long entassement des coquilles aura comblé les portions de mer *toujours peu profondes* où elles s'accumulent. Je ne serais donc point étonné qu'un jour des considérations nouvelles ou plus précises vissent à démontrer que 2.000.000 d'années sont une estimation trop faible de la durée des périodes ou du moins de quelques-unes d'entr'elles. J'ai dû revenir ici sur cette considération que je n'avais pas fait, je crois, suffisamment ressortir dans le Chapitre 1^{er}.

Je ne me dissimule pas toutefois combien ce sujet doit rencontrer actuellement peu de faveur, combien il doit sembler inopportun, lorsqu'il y a peu d'années un illustre astronome, dont les savantes et spirituelles productions sont si justement admirées et recherchées, semble avoir pris à tâche, dans un recueil destiné à devenir populaire, d'enlever aux comètes tout le prestige de leur influence. On se méprendrait cependant, je crois, sur le but et les principes de ce savant, dont l'opinion doit être si puissante dans une question semblable, si l'on pensait qu'il a voulu dénier toute vraisemblance à l'idée d'un choc et la reléguer parmi les suppositions imaginaires. Son but principal à cet égard paraît avoir été de considérer l'action d'une comète relativement à un moment fini, relativement à l'exiguité de nos durées, et non point de poursuivre les chances de sa rencontre à travers l'immensité des tems. Il a cherché surtout à effacer de l'esprit du vulgaire les craintes exagérées que pouvait inspirer l'apparition de semblables météores et leur proximité de la terre; ce but, si bien rempli d'ailleurs, était digne de ce haut talent et de son autorité dans la science: rien ne déshonore plus en effet l'esprit humain, l'esprit des peuples, que les vaines terreurs, et le plus noble rôle de la science a toujours été de les dissiper. C'est au reste atteindre assez ce but, relativement à la superstition des comètes, que de montrer la nullité de leur influence par le seul fait de l'attraction et de la proximité, et de réduire ainsi le seul danger qui menace la terre à la chance si faible de la rencontre entre deux petits corps au milieu de l'immensité des espaces. Qu'est-ce en effet que cette chance relativement au tems fini, relativement surtout à l'extrême petitesse de l'existence humaine? Et quelle ombre de terreur pourrait y être attachée? Etres chétifs que nous sommes, tant de dangers nous environnent à chaque instant, qu'un de plus perdu dans l'immensité des âges ne mérite pas d'être compté: un atôme errant dans l'atmosphère suffit à inquiéter notre vie; la moindre agitation d'un petit coin de la pellicule terrestre détruit nos villes et anéantit des populations entières; les hommes eux-mêmes dans leur fureur ont imaginé des moyens faciles de s'entredé-

truire : c'est donc près de nous, c'est dans des faits à notre taille et à l'échelle de nos durées qu'il faut circonscrire nos frayeurs, si nous ne saurions, comme le juste du poète antique, demeurer fermes sous les ruines de la nature. Quant à ces événements dont l'intervalle ne se compte que par milliers de siècles, pour eux l'instant fini disparaît, la durée de l'homme, de ses monuments, de ses empires, s'anéantit et s'efface, et quelle place y aurait-il là pour la crainte ?

Mais si négligeant ces chétives durées que le souvenir des hommes peut atteindre, nous embrassons de nos regards l'immense étendue des âges dont les dépôts et les ossuaires géologiques nous ont conservé la trace, nous comprendrons alors que la proportion des faits y puisse changer comme y change l'unité de mesure dans le calcul des tems : nos événements les moins probables deviennent les faits réguliers de cette vaste histoire ; ils forment les combinaisons ordinaires dans l'échelle de numération convenable à ces durées, dans cette vie des mondes dont nos siècles ne forment pas un des jours.

C'est par des considérations de cette nature que l'on serait philosophiquement autorisé à rechercher les conditions mathématiques de la question des chocs et la relation de leur probabilité avec la grandeur des tems géologiques, quand bien même on n'y serait pas amené par les grands résultats physiques de cette question. Mais il ne faut pas l'oublier, il ne s'agit point ici d'un simple jeu d'imagination et de calcul, ni de la frivole combinaison de chances plus ou moins probables : ici les faits dominent nos recherches, et dans le phénomène qui nous occupe réside la solution tant désirée des principaux problèmes de la géologie et de la physique terrestre.

La question ainsi posée, entrons donc maintenant plus avant dans l'étude de ses données numériques.

En supposant une comète astreinte à cette seule condition, de pouvoir pénétrer dans les limites de l'orbite terrestre, condition que la petitesse de leur distance périhélie réalise pour le plus grand nombre, la chance qu'elle a de rencontrer la terre se compose de deux parties : l'une est la condition de couper la ligne même de l'orbite terrestre ; l'autre est la condition que la

terre se trouvera placée, au même instant, précisément en ce point de sa course dans son orbite.

La première de ces chances est exprimée par le rapport entre la surface de l'anneau que décrit la terre et l'aire totale de son orbite : car la possibilité que le bolide vienne tomber sur une portion donnée de ce plan limité est proportionnelle à l'étendue relative de cette partie. Si la comète n'était qu'un point mathématique, l'anneau dont nous parlons aurait pour unique largeur le diamètre de la terre, augmenté de la très petite extension que lui donnerait la puissance attractive du globe luttant contre une immense vitesse ; mais puisque la comète peut tomber tangentiellement de part et d'autre de ce diamètre, et puisqu'il ne s'agit que de la position que peut occuper son centre, il faut donc ajouter à la largeur de la bande deux fois au moins la longueur de son rayon ; nous verrons même bientôt que cette addition seule est bien loin d'être suffisante pour l'expression complète de la chance.

La seconde condition, relative à la position de la terre même sur son orbite, est exprimée par le rapport de l'aire circulaire qui aurait pour rayon la somme des rayons des deux astres, à l'aire du même anneau dont nous venons de parler et qui forme le contour extérieur du plan de l'orbite terrestre. Le produit de ces deux rapports est la chance totale de rencontre, et il est facile de voir qu'en considérant l'orbite comme circulaire et faisant disparaître le terme commun, qui est la surface de l'anneau, cette chance sera exprimée par la fraction

$$\frac{(r+r')^2}{(D+r+r')^2 - R^2}$$

R , r , r' étant les rayons du soleil, de la terre et de la comète, et D la distance du centre de la terre à celui du soleil. Mais cette simple expression donnerait des résultats trop faibles, et il faut y introduire deux modifications essentielles.

Bien que la distance périhélie des orbites cométaires soit souvent peu considérable et qu'on l'ait vue s'abaisser presque jusqu'au 20^e de notre distance au soleil, cependant il n'en est

pas moins vrai que les points où elles rencontrent le plan de notre orbite sont généralement beaucoup plus éloignés de son foyer ; ce n'est pas seulement à cause de l'étendue ordinaire de leur distance périhélie , ce n'est pas seulement à cause de l'élargissement de leur orbite à partir du sommet , c'est aussi par ce que la position de ces orbites en travers de la nôtre éloigne généralement une des branches beaucoup plus que l'autre du soleil , pour la rapprocher de la courbe terrestre. Or il est évident que la soustraction forcée d'une notable portion de surface centrale aux chances du passage doit amplifier dans une proportion très grande et très rapidement croissante la probabilité d'une rencontre de l'orbite terrestre par la comète ; il est donc essentiel de faire entrer dans le dénominateur de la fraction cette condition variable en quantité , mais constante en fait : on le fera en retranchant de l'aire totale de l'orbite un cercle intérieur arbitraire dont le rayon soit une partie aliquote n $(D+r+r')$ du rayon vecteur total. La formule de probabilité deviendrait ainsi

$$\frac{(r+r')^2}{(D+r+r')^2 (1-n^2)},$$

expression dans laquelle il s'agirait de faire varier convenablement le coefficient n . Mais les modifications ne doivent point se borner là.

Nous n'avons considéré, en établissant la formule, que le cas exceptionnel où le bolide tomberait perpendiculairement sur le plan de l'orbite terrestre, et nous n'avons pas tenu compte de la quantité dont la terre s'élève au-dessus de ce plan : il est cependant certain que vu l'obliquité constante du plan des orbites cométaires sur le nôtre et vu l'obliquité de la course que décrit la comète dans ce plan, l'épaisseur de la terre doit exercer une influence notablement plus grande, relativement au rapport des surfaces compté sur le plan de l'écliptique, que dans le cas d'une chute normale. Une tangente à la terre en un point situé au-dessus de ce plan vient le rencontrer en effet fort loin du globe, et cette distance, qui est déjà égale à trois fois le rayon pour un angle de 20° formé par la tangente, peut

même devenir infinie pour un angle nul. Ainsi une comète peut choquer la terre en réalité, bien qu'elle rencontre le plan de l'écliptique fort loin de la terre même, et c'est un phénomène qui peut avoir lieu sur tout le contour de la terre, partout où elle s'élève au-dessus du plan de son orbite. Sans tenir compte au reste d'aucune condition relative à l'inclinaison, il est évident que la chance d'une rencontre se trouve amplifiée, par la considération dont nous parlons, dans le rapport de la surface de la sphère à l'aire de son grand cercle, c'est-à-dire dans le rapport de 4 à 1. En ayant égard à cette modification, en supposant de plus que le diamètre du corps choquant est seulement égal au 5^e de celui de la terre et substituant enfin à la distance D sa valeur égale à 23578 rayons terrestres, on obtient pour la condition générale de probabilité

$$\frac{1}{96.525.000 (1 - n^2)}$$

Telle serait la chance qu'aurait, pour rencontrer la terre, une comète de la dimension indiquée, dont on ne saurait pas autre chose, si ce n'est qu'elle rencontre le plan de l'orbite de la terre dans l'intérieur de la courbe, ou bien en dehors mais avec la condition de raser son contour, et enfin en l'assujétissant à ne couper ce plan, dans l'un ou l'autre de ses passages ou dans tous les deux, qu'à une certaine distance du soleil indiquée par le coefficient n .

Si les comètes étaient assujéties à se mouvoir dans des orbites constantes, il est évident que la chance serait invinciblement fixée pour presque toutes dès que leur orbite serait connue, car toute possibilité de rencontre serait perdue pour celles qui dans leur trace invariable ne couperaient point l'orbite même de la terre ou ne passeraient pas à une proximité suffisante au dessus d'elle. Mais les dérangements incessants qui font dévier de leur route ces petites masses par l'attraction planétaire enlèvent toute fixité à la courbe qu'elles décrivent autour du centre général de notre système, et leur conservent ainsi à chacun de leurs passages toute l'intégrité de la chance. Il suffirait donc de connaître exactement le nombre moyen des passages

annuels des comètes à travers le plan de l'écliptique pour indiquer, d'après la formule que nous avons donnée, en combien d'années serait amenée la certitude d'une rencontre. Mais examinons d'abord ce que devient la probabilité lorsque l'on fait varier la grandeur du coefficient n , qui indique le rapport du rayon de l'espace circulaire où l'on suppose que ne peut pas tomber la comète, au rayon entier de l'orbite de la terre. Elle devient

$$\text{Pour } n = 0,2 \dots\dots\dots \frac{1}{92.664.000}$$

$$\text{Pour } n = 0,5 \dots\dots\dots \frac{1}{72.392.500}$$

$$\text{Pour } n = 0,9 \dots\dots\dots \frac{1}{19.305.000}$$

$$\text{Pour } n = 0,98 \dots\dots\dots \frac{1}{3.861.000}$$

Ainsi donc s'il ne passait qu'une seule comète par an à travers le plan de l'écliptique, la certitude d'une rencontre se trouverait accomplie entre 92.000.000 et 4.000.000 d'années selon que le passage pourrait se faire sur presque toute la surface de l'orbite ou seulement sur une zone très restreinte; nous avons dit pourquoi cette supposition d'une zone restreinte doit entrer comme partie intégrante de la probabilité.

Mais les passages annuels de comètes sont bien loin de se borner à un seul. Depuis 1800, la moyenne des comètes recon- nues chaque année par les astronomes a été de trois environ, et plusieurs devaient couper deux fois le plan de notre orbite. Ce nombre même est encore éloigné de la réalité, car beaucoup de ces astres échappent à l'observation, soit par leur petitesse, soit par leur opposition avec la terre et leur éloignement du soleil au périhélie, soit surtout parce qu'ils n'apparaissent que dans la partie du ciel visible pendant le jour. Cette insuffisance des observations est bien reconnue des astronomes : sir John Herschel croit pouvoir porter le nombre absolu des

comètes à plusieurs milliers, et d'autres astronomes l'ont amplifié bien davantage. Il serait impossible d'ailleurs, à moins d'observations complètes faites pendant un nombre considérable d'années, d'établir autre chose qu'une limite inférieure du nombre annuel moyen; et enfin il faut tenir compte, quant au passé, du nombre de ces corps qui ont pu s'anéantir par leur chute sur le soleil ou sur d'autres astres, ou même peut-être des comètes réellement paraboliques ou hyperboliques. Voilà donc bien des raisons pour que l'on puisse supposer le nombre des comètes considérable pendant les âges géologiques. Or admettons seulement 10 passages annuels, ce qui ne fait guère plus de 6 à 7 comètes dans les conditions supposées, la certitude d'un choc se trouverait ainsi réalisée en 9, 7, 2 millions d'années ou même en 400.000 ans, selon la grandeur des zones où l'on peut supposer que sont renfermés ces passages : comme nous avons vu qu'une partie d'entre eux est toujours comprise dans les zones les plus excentriques, il faudra donc prendre une sorte de moyenne entre ces nombres, laquelle, en donnant même une faible proportion au nombre des passages excentriques, mais en tenant compte de l'inégalité des surfaces des zones, ne mènera jamais à beaucoup plus de 3.000.000 d'années et par conséquent rentre avec une exactitude étonnante dans les limites d'étendue que nous avons assignées moyennement aux divers âges du globe, étendue qui ne pouvant descendre beaucoup au-dessous de 2.000.000 d'années, peut toutefois s'élever encore au-dessus.

Il est essentiel de remarquer d'ailleurs que si la certitude d'une rencontre est accomplie en 3.000.000 d'années, il n'est pas dit pour cela que l'événement lui-même n'aura lieu qu'à la dernière année de cet intervalle, il peut se produire en réalité à un moment quelconque dans l'intervalle entier, et il est par conséquent très rationnel que l'on trouve pour réunion de toutes les chances un nombre supérieur à la durée ordinaire des périodes : un résultat contraire indiquerait évidemment une erreur ou une exagération dans les conditions favorables du problème.

Ainsi donc le calcul général des probabilités non seulement

laisse admettre comme possible l'éventualité des chocs, mais il en circonscrit les limites de telle manière que l'un d'eux a dû venir comme nécessairement se placer dans chacun des intervalles de durée que l'on peut assigner rationnellement aux divers âges de la terre : cette question, que nous pouvions regarder déjà comme géologiquement résolue, se trouve donc l'être mathématiquement, et l'étude du ciel vient pleinement confirmer ce que l'étude de la terre avait commencé à nous apprendre.

Mais il n'est pas possible de limiter une idée scientifique : quelque modeste et circonscrite que puisse être la pensée première qui lui a donné naissance, elle se trouve incessamment poussée vers un plus vaste essor, sans pouvoir résister non pas seulement à l'attrait, mais à la nécessité des recherches; et c'est ainsi qu'à ce point de notre étude, nous sommes entraînés comme malgré nous à porter notre investigation sur un sujet bien élevé sans doute pour notre faiblesse mais vers lequel nous porte l'invincible force des déductions, sur celui de la cause générale qui a pû présider aux mouvements observables des grands corps de la nature.

Si la terre, nous dira-t-on en effet, a été à tant de reprises bouleversée par le choc des comètes, qu'a-t-il dû arriver du reste des planètes, les unes plus rapprochées du soleil et ainsi plus sujettes à la chance des rencontres, les autres compensant jusqu'à un certain point par leur dimension la grande étendue de leur orbite. Le principe des chocs n'a-t-il donc pas exercé aussi son influence sur la rotation de tous ces astres, peut-être même sur celle du soleil ?

Je le crois ainsi, et malgré l'élévation du sujet, il se rattache trop directement au système que je produis relativement aux révolutions du globe, pour que je puisse me résoudre à le passer sous silence. Mais il se lie d'autre part à des considérations d'un ordre si vaste et si conjectural que je ne veux point encore l'exposer maintenant et que j'en remets l'étude à la fin de cet ouvrage. Il n'est pas tems déjà de quitter la terre, et avant de chercher une route vers l'infini des mondes, il convient

d'épuiser les faits que l'observation du nôtre nous permet d'établir, il convient que nous ayons affermi notre système sur des bases expérimentales. Les questions de théorie relatives aux faits terrestres ne sont point d'ailleurs achevées, et après avoir recherché les causes des phénomènes physiques, il nous faut entrer dans le champ de la chimie générale et remonter à un ordre de principes tout spécial dont les résultats, sont moins grands sans doute, mais ne sont point toutefois des matériaux inutiles pour l'histoire du globe, dont ils tendent à révéler la constitution intime et primitive.



CHAPITRE IX ¹.

CONSIDÉRATIONS SUR L'HISTOIRE CHIMIQUE DE LA TERRE,
OU SUR L'ÉTAT ORIGINAIRE ET LES TRANSFORMATIONS DES MATÉRIAUX
QUI COMPOSENT SON REVÊTEMENT OBSERVABLE.

Il est dans les études géogéniques un point de vue du plus haut intérêt, qui semble avoir échappé jusqu'ici aux études précises des savants, en particulier à celle des chimistes, s'il n'a toutefois rebuté leurs recherches par son excentricité toute particulière : je veux parler de la répartition originaire des matières minérales à la surface du globe.

Un revêtement d'une singulière uniformité, le granit, et d'une nature constante aux divers points de la terre, s'est étendu sur toute sa surface aux premiers tems de son origine. Partout en effet on le retrouve au dessous des plus anciens terrains de sédiment, ils sont formés de ses débris, et encore bien que le granit, considéré comme roche d'injection et de filons, paraisse accidentellement postérieur à certains terrains sédimentaires assez avancés dans l'échelle géologique, il apparaît

¹ Ce chapitre uniquement réservé à des considérations de chimie, n'est pas essentiel à la marche de l'ouvrage ; il ne lui est pas inutile toutefois, puisqu'il tend à établir par des raisons précises l'indépendance du phénomène volcanique et sa non-simultanéité avec les grands mouvements de la surface du globe. Sous ce point de vue la place de ce chapitre était marquée avant les recherches relatives à l'application pratique de notre système ; mais si quelque lecteur se trouve rebuté par la nature toute spéciale du sujet dont il traite et du genre d'étude qu'on y suppose, il peut sans inconvénient passer outre sans que cela nuise beaucoup à l'Intelligence des chapitres suivants qui doivent former le complément nécessaire de notre théorie des révolutions *physiques* du globe.

cependant partout comme lié intimément aux plus anciens dépôts et comme la base de toute stratification.

Ce caractère de haute antiquité et de revêtement universel ne saurait être contesté au granit par aucune théorie, et l'uniformité de cette roche est encore plus remarquable lorsqu'on vient à la comparer à la diversité de composition des roches plutoniques plus modernes.

Mettons maintenant en regard de ce grand fait un autre moins important en apparence, mais aussi remarquable peut-être par son caractère de simplicité et d'étendue, celui de la salure des mers. Si l'on considère la nature des substances contenues à l'état de dissolution dans la grande masse des eaux océaniques, on ne saurait manquer d'être frappé de la simplicité et de l'essence toute spéciale de sa composition chimique, caractérisée presque exclusivement par le chlorure de sodium, *le sel marin*.

Que l'origine de ce produit soit liée par une simultanéité d'époque à celle du granit primitif, c'est une proposition qui pourra sembler singulière, mais qui cependant deviendra de toute évidence si l'on considère que dans les premiers dépôts fossilifères on rencontre en nombre infini les restes d'animaux marins dont les genres habitent encore aujourd'hui dans les eaux salées, et que dès l'époque carbonifère on peut leur mettre en parallèle, comme vivant dans les rivières et dans les lacs d'alors, des genres analogues à ceux de nos eaux douces. La salure des eaux de la mer est donc un fait de première origine, c'est un fait du même ordre que la production du granit ancien, et rien ne répugne à supposer que leur origine ait été simultanée, je veux dire qu'elle n'ait été séparée par aucun événement géologique.

Or il n'est pas un chimiste qui envisageant d'un point de vue philosophique la distribution actuelle des matières minérales, ne soit frappé de ce fait singulier, que des deux principaux alcalis répandus à la surface du globe l'un (*la soude*) est concentré et pour ainsi dire isolé dans la grande dissolution marine, tandis que l'autre (*la potasse*) caractérise exclusivement le premier revêtement solide de l'écorce terrestre, le granit, où

il forme la base active et fondante de deux éléments cristallins, le feldspath et le mica. Tout le feldspath des roches anciennes est en effet à base de potasse, et la prédominance presque absolue dans ces roches de la potasse sur la soude est un des points les mieux établis et à la fois l'un des plus remarquables de la minéralogie chimique.

N'est-ce pas un sujet digne de la plus sérieuse attention que cette séparation originaire de deux bases si semblables cependant par l'ensemble de leurs propriétés, sous le point de vue surtout de la voie ignée? N'y a-t-il pas lieu de méditer sur les causes de ce grand départ entre deux des corps les plus importants de la nature active, puisque l'un, la potasse, est devenu partie essentielle de toute la végétation terrestre et que l'autre forme la base et l'aliment de toute l'organisation marine? Et cependant ce sujet, malgré ce qu'il a de saillant, n'a pas même été effleuré dans les diverses théories qui se sont élevées jusqu'à l'histoire de la terre et jusqu'à la recherche des origines. Dans la préoccupation des grands faits physiques on a peu tenu compte des caractères spéciaux que présente la composition intime des roches et des terrains et l'on a fait surtout une complète abstraction de la salure des eaux, sans aucun souci de rechercher d'où peut provenir la condition si particulière des matières qu'elles renferment en dissolution.

Dans l'état actuel de nos connaissances il n'est plus permis de négliger un pareil fait, et la concentration originaire de la potasse dans les granits, de la soude dans les eaux de la mer, reste à étudier comme un sujet vierge encore et comme un des plus intéressants problèmes de chimie naturelle. Il semble en réalité impossible que la production d'un fait si tranché ne soit pas liée à quelque chose de fondamental dans la question des origines: une théorie qui non-seulement se prêterait à la possibilité de ce phénomène chimique, mais qui reposerait sur lui comme sur une base nécessaire, serait donc empreinte d'un caractère particulier de précision qui tendrait à la distinguer tout d'abord des hypothèses vulgaires et simplement conjecturales, et la recommanderait ainsi à l'intérêt, si ce n'est à l'attention des naturalistes. C'est en effet quelque chose de

cette espérance qui anime mon esprit, en rassemblant ces fragments épars de quelques idées nouvelles sur la chimie géologique, idées bien hardies sans doute pour mes forces par la difficulté des questions qu'elles abordent, mais que je n'hésite point à faire connaître, à cause de la précision qu'elles tendent à apporter dans quelques parties de ce sujet toujours si vaguement traité, et enfin parcequ'il me semble qu'elles empruntent à un point de vue nouveau quelque originalité de conception.

Le phénomène de séparation originaire dont je viens de parler ne forme qu'une partie accessoire des relations si problématiques du granit; il en est beaucoup d'autres plus évidentes, depuis longtemps observées, et dont la raison n'est pas mieux connue. Ce n'est pas en effet un médiocre sujet d'étude que la liaison de cette roche massive avec les plus anciens terrains de sédiment, avec les diverses roches ignées et enfin avec les eaux minérales et les filons métallifères, relations dont les dernières n'intéressent pas seulement les spéculations philosophiques de la géologie, mais encore l'étude pratique d'une des grandes sources de l'industrie humaine. L'observation de ces phénomènes tire surtout de sa généralité un intérêt puissant, car elle ne se borne plus maintenant à quelques districts de l'Allemagne et de l'Angleterre, elle embrasse tous les points du globe, depuis les confins de la Sibérie et les pentes de l'Altaï jusqu'aux Cordilières du nouveau monde. Que le granit soit lié si constamment à des produits ignés à base calcaire, magnésienne, ferrugineuse, tandis qu'il ne contient lui même ni chaux, ni fer, ni magnésie; avec des eaux minérales à sels sodiques, lorsque la soude lui est étrangère; avec des filons métallifères, lui qui ne renferme aucuns métaux des filons.... Ce sont là de remarquables problèmes et qui sont dignes d'exciter fortement l'attention. J'espère que la suite de ce travail fournira quelques données théoriques qui ne seront pas inutiles pour leur solution: en apportant une idée nouvelle sur la formation des granits, j'espère apporter aussi quelque lumière sur ces intéressantes et encore inextricables questions. Elles semblent liées à une hypothèse spéciale sur la constitution intime du globe, et aux phénomènes les plus généraux qui aient

pû se passer primitivement à sa surface; leur étude va donc dérouler devant nous presque toute l'histoire des origines chimiques.

Mais il est nécessaire à mon sujet que je prenne d'un peu haut l'étude de ce que l'on appelle généralement les roches ignées, pour m'acheminer ensuite par une voie nouvelle à l'histoire du granit et des premiers revêtements, par suite à celle du métamorphisme des roches, de l'action volcanique des eaux minérales et des filons, ou du moins à l'exposé de la manière dont je conçois ces phénomènes et leur liaison réciproque.

Les phénomènes qui attestent l'action de la chaleur à la surface du globe sont encore, malgré beaucoup de brillantes recherches, un des problèmes les plus délicats que l'étude géologique nous présente. Ces recherches, théoriques ou pratiques, qui datent de Descartes, Leibnitz et Buffon, mais qui depuis un demi-siècle ont acquis un haut degré de développement et de portée, ces recherches ont eu au moins pour résultat de mettre hors de doute l'influence des phénomènes ignés sur l'état actuel d'une grande partie des roches et des terrains, débris des époques passées, que l'on retrouve à la surface de la terre. Mais l'origine de cette chaleur, ses produits immédiats, ses effets sur les roches et son mode d'action mécanique ou chimique, les limites de cette action, ses périodes de durée, tout cela est encore un problème, pour ceux du moins qui observant sans esprit de système les grandes œuvres de la nature, veulent être conduits des effets à leur cause par un enchaînement de déductions rationnelles, suivant les strictes lois que les sciences positives nous ont révélées, et sans appel à des moyens et à des lois imaginaires. Dans ces conditions le champ reste encore ouvert pour l'étude des phénomènes plutoniques et de leurs causes : qui pourrait dire en effet que le problème en est résolu ?

Au premier aperçu la source de ces phénomènes ne semble point rester douteuse et l'on ne peut se refuser à la chercher dans la chaleur propre du globe qui a conservé, comme le calcul le montre, et doit conserver encore pendant d'immenses

périodes de tems son énergie et son intensité à une faible profondeur au-dessous de la pellicule solidifiée qui nous supporte. Mais pour moi, tout pénétré que je sois de l'existence de cette chaleur interne et de son importance dans les phénomènes cosmogoniques, je crois cependant que l'on s'est exagéré ses effets sensibles à la surface du globe et que l'on a dénaturé son mode d'action, faute de se restreindre assez aux limites des lois physiques et à celles d'une observation impartiale. Peut-être a-t-on trop oublié, dans quelques recherches théoriques des derniers tems, quelle faible partie du rayon de ce vaste globe est pour nous accessible, et combien sont imperceptibles à cette échelle de comparaison, combien sont restreints dans leurs effets ces phénomènes ignés que l'étude géologique nous accuse ou que la nature active nous présente dans ses volcans. Evidemment, pour moi, la source d'un aussi faible tumulte n'est pas aussi éloignée qu'on a pu le supposer ; et ce n'est pas jusqu'aux entrailles du globe qu'il faut en aller chercher l'origine et les matériaux.

Mais avant toute supposition, jetons un coup d'œil sur les caractères généraux du phénomène igné dans l'ensemble de ses produits des divers âges.

Ce qui frappe surtout lorsque l'on examine les terrains d'ancienne origine, c'est l'impuissance où nous sommes d'assigner une limite de démarcation tranchée entre les roches qui nous accusent par leur aspect minéralogique l'action puissante de la chaleur, et celles qui portent encore l'empreinte caractéristique du dépôt par les eaux, la stratification. Le granit massif le mieux caractérisé passe par gradations insensibles au gneiss clairement stratifié, et par lui au schiste ou limon durci, produit évident et encore actuel de l'action sédimentaire. Bien plus, non seulement il s'intercale régulièrement aux strates du gneiss, mais il porte quelquefois lui-même des traces non douteuses de stratification. Si nous élevons nos regards un peu plus haut dans la série des formations, nous y voyons des phénomènes analogues caractérisés par des roches différentes : citerai-je les porphyres intercallés en couches dans les terrains de grès ou de schiste, et rappellerai-je ces pas-

sages tellement graduels de la roche ignée à la roche d'atterrissement, que l'on ne saurait décider où l'une finit et où l'autre commence? Citerai-je les trapps et les basaltes des terrains houillers d'Angleterre et d'Ecosse, à la fois en lits et en filons; les couches de toadstone du Derbyshire, les trapps de Vicentin, les variolites et les spilites des Alpes, les ophites des Pyrénées, alternant avec des calcaires de divers âges, se fondant et s'entremêlant avec eux, et s'associant à leurs directions? Ces faits et d'autres sont bien connus et je ne prétends point les décrire, mais je les rappelle seulement pour en signaler la généralité; pour faire concevoir comment l'école neptunienne a pu opposer si longtemps une résistance rationnelle aux théories qui faisaient intervenir l'action ignée dans la production des roches, pour justifier enfin ces nuances si diverses d'opinion qui ont partagé de toutes manières la théorie des faits géologiques entre l'action de l'eau et celle du feu.

Cette division théorique a existé, pour ainsi dire, dès les premiers tems de la géologie, et si le vulcanisme est devenu prédominant, ce n'est pas sans avoir éprouvé les mutations habituelles qui dérivent de la lente progression des idées et des observations scientifiques; il doit en subir encore les influences. Parmi les opinions en effet qui faisaient intervenir l'action ignée dans la formation ou le déplacement des roches, aucune avant la fin du dernier siècle ne s'était encore élevée au-delà des phénomènes physiques de la fusion ou de ceux de l'expansion volcanique: Buffon dont les brillantes hypothèses avaient donné tant de popularité à l'idée de la chaleur terrestre, en bornait l'influence aux premiers âges du globe et sa production à celle du granit comme revêtement igné universel¹; l'eau, selon lui, avait formé tout le reste et façonné les montagnes au sein des mers; Lazzaro-Moro n'avait cherché au contraire dans la chaleur interne que la cause du soulèvement des montagnes au-dessus du niveau des eaux, mais sans tenir compte

¹ Quant aux volcans, rappellerai-je que Buffon leur donnant pour principe la combustion atmosphérique, les faisait brûler par le haut, comme des torches?

des effets chimiques de cette chaleur ; Dolomien préoccupé par les alternances des roches ignées et sédimentaires imaginait ses coulées de laves soumarines, et il ne faisait pas intervenir l'action ignée dans les bouleversements de l'écorce terrestre...

Ainsi dans l'origine du mouvement philosophique des sciences générales, il semble que chacun des grands esprits qui ont travaillé à les établir n'ait appliqué la puissance de son imagination qu'à un point de vue exclusif, et qu'embrassant sous ce point de vue toute l'étendue des phénomènes naturels, il ait laissé l'éclat de ses idées, dispersé sur trop d'espace, se diviser et s'affaiblir. L'esprit de l'homme ne saurait-il, dans ses recherches idéales et hypothétiques, soulever un coin du voile qui nous dérobe la nature, que pour le rejeter plus épais sur la portion qui échappe encore à nos regards ? Espérons qu'il n'en sera point toujours ainsi ; mais c'est que les sciences naturelles sont progressives et que dans leur établissement les conceptions de l'esprit n'ont pas la plus grande part, elle appartient à l'observation. Or, dans une science comme celle de terre, l'observation est l'apport de tous : elle fournit les matériaux, le travail de l'esprit se borne à les mettre en œuvre.

Un homme vint cependant, à la fin du siècle dernier, qui par d'ingénieuses observations faites sur une terre qu'il a rendue classique, l'Ecosse, et par des conceptions larges et hardies, changea la face de la question des phénomènes ignés et embrassa sous un nouveau point de vue les études géogéniques. Cet homme était le docteur Hutton. Réunissant les deux théories antagonistes dans une conception d'ensemble tout originale, il dit aux neptuniens : « Oui, c'est l'eau qui, sur le globe, détruisant et stratifiant sans cesse produit tout le revêtement superficiel, mais ce n'est là qu'un mouvement de rénovation aux dépens de plus anciens dépôts : loin de former des montagnes l'action de l'eau les détruit et tend à niveler incessamment la surface de la terre. » Aux vulcanistes il dit : « Oui, c'est l'action du feu qui a élevé les montagnes et infléchi les strates des terrains, mais ce feu ne borne pas son influence aux phénomènes physiques de l'action volcanique, il agit incessamment dans toute la périphérie du globe, au-dessous de son

écorce et de ses dépôts d'entassement ; il modifie et *consolide* les roches déposées au sein des mers, change les calcaires en marbre, les sables en grès, le limon en schiste ; c'est lui enfin qui par une résorption continue des dépôts inférieurs produit sans cesse de nouvelles roches fondues qu'il injecte à travers les strates ; et c'est cette injection des roches fondues qui a produit les inflexions et les relèvements des terrains sédimentaires, les soulevant au-dessus des eaux pour être détruits à leur tour par l'injure des tems et fournir des matériaux à une sédimentation nouvelle. »

Hutton asservissait ainsi la surface du globe à une rénovation indéfinie, du moins relativement à l'échelle de nos durées ; il enfermaient comme dans un cycle fatal l'avenir matériel du globe, son présent et son passé ; image des plus grandioses que l'étude de la nature ait suggérées à l'imagination d'un homme, et c'est un tort grave de quelques dogmatistes contemporains d'avoir cherché à la faire considérer comme une atteinte à l'idée de la toute-puissance divine ; il n'y a rien de plus naturel que de supposer aux vues de la Providence un caractère de durée comme indéfinie relativement à l'existence humaine, qui n'est pas même un point dans l'immensité des tems. Et certes il y avait peut-être moins de philosophie dans les idées de Buffon, qui condamnaient la terre à un dépérissement progressif et certain, dont la date aurait été marquée d'avance par les simples lois de la physique et mise ainsi à la portée des investigations humaines. Hutton d'ailleurs était bien loin de dénier à la puissance divine la faculté de créer et de détruire ; seulement selon lui, les termes extrêmes de la série des transformations échappait à la petitesse infinie de notre point de vue.

Hâtons-nous de dire toutefois qu'une étude plus exacte de la nature et de l'origine des roches nous paraît mener à des conséquences diamétralement opposées à celles du système dont nous parlons : nous pensons, contrairement à la théorie de Hutton, que l'étude des terrains loin de couvrir d'un voile l'origine de la terre, nous fait retrouver dans son histoire non seulement une série d'époques fixes, mais encore une durée totale limitée et une date certaine, sinon connue, de son commence-

ment. Plus tard ces considérations ressortiront d'elles-mêmes du nouveau point de vue sous lequel j'essaierai de faire envisager la question de l'origine des roches.

Quoi qu'il en soit il y avait un génie singulier et une prodigieuse hauteur de vue dans les conceptions de Hutton; et ce n'est point d'ailleurs seulement par des spéculations conjecturales qu'il a enrichi la science géologique. Le premier il a signalé la postériorité du granit, considéré comme roche ignée, au dépôt de certains terrains qu'il traverse sous forme de veines, et l'a fait descendre du rôle exclusif de roche primitive que jusque là on lui avait attribué; le premier il a signalé les effets de la compression sur les roches échauffées: considérant que le calcaire était chimiquement formé d'une partie fixe et d'une partie volatile, il conçut cette idée remarquable, que si l'on pouvait opposer un obstacle à l'évaporation du principe aérien, ce mélange forcé de deux éléments si différents devait produire sous l'action de la chaleur le résultat intermédiaire, c'est-à-dire un composé fusible; et il en a conclu la production des marbres par une transformation ignée des calcaires sédimentaires sous les poids des terrains superincumbants: idée confirmée depuis avec éclat par les belles expériences de son illustre ami, Sir James Hall. Il est donné quelquefois au génie de deviner la nature et de devancer les résultats de l'expérience.

C'est en appelant l'attention des savants sur la transformation des roches par l'action de la chaleur aidée de la compression, et en cherchant à établir la préexistence de l'action de l'eau sur celle du feu dans la partie observable de la surface du globe, que Hutton a jeté pour ainsi dire les fondements d'une nouvelle géologie. Néanmoins ce point si délicat des recherches géologiques est encore, comme je l'ai dit, un de ceux qui présentent le plus d'obscurités, non seulement parce que le mélange des effets de la stratification avec ceux de l'action ignée est souvent indiscernable, mais parce que la structure intime des roches elles-mêmes présente des problèmes que, suivant les idées ordinaires, on ne peut considérer comme résolus. Je me propose dans le cours de ce travail de faire res-

sortir quelques-unes de ces obscurités plus franchement qu'on ne l'a fait encore; et amené par leur étude à entrer dans la voie des principes de Hutton, mais à les dépasser ou à les restreindre dans des points fondamentaux, j'essaierai d'introduire des considérations nouvelles plus précises dans l'histoire et, s'il est permis de le dire, dans l'anatomie des roches ignées.

Le grand fait qui ressort en premier lieu d'une étude attentive des roches ignées et qui me paraît dominer tous les autres par son importance, c'est l'étrangeté, si je puis ainsi parler, de la nature intime du granit. Cette roche si universelle par sa position, si uniforme sur tous les points de la terre, est celle sans contredit dont les lois connues de la physique et de la chimie peuvent rendre le moins facilement compte. Il paraît impossible, à la vérité, par l'ensemble des phénomènes géologiques et des caractères propres au granit, d'y méconnaître l'empreinte de l'action ignée : la forme massive de cette roche, l'enchevêtrement complet et réciproque de ses éléments cristallins, sa diffusion en veines dans les terrains qui avoisinent ses masses, l'altération et le durcissement de ces terrains au contact, en sont des preuves qu'aucun géologue ne saurait aujourd'hui récuser ¹. La nature minéralogique des cristaux qui entrent dans la composition du granit achève d'attester l'influence calorifique sur la constitution actuelle de cette roche, car si l'on fait abstraction du quartz, nous voyons toutes les autres substances (feldspath, mica, grenat, amphibole etc.) se reproduire par la voie sèche, tandis que la voie humide n'en a pas encore su reproduire une seule.

Et cependant sans rappeler même ce que nous avons dit de la stratification souvent apparente de cette roche ou de son passage à des masses évidemment stratifiées, si nous examinons d'un œil attentif la structure intime du granit, nous y trouverons la disposition la plus anormale que puisse offrir une roche qui a fondu : cette disposition consiste en ce que la substance la moins fusible, le quartz, y forme souvent comme

¹ Je passe à dessein sous silence l'absence des fossiles qui peut être indépendante (et qui l'est, je crois, en réalité) de l'action de la chaleur.

la pâte qui enveloppe les autres éléments et qu'elle y porte l'empreinte des cristaux de plus facile fusion. Cette structure si singulière ne se rencontre pas comme une exception dans cette roche universelle : elle y est normale, régulière, quelquefois exclusive, et c'est un caractère particulier au granit, que si l'on y rencontre très fréquemment des cristaux complets de feldspath et de mica enclavés dans une pâte quarzeuse, on n'y trouve jamais le quartz avec sa forme propre enveloppé par les autres éléments ; il n'existe cristallisé que dans les fissures et les géodes, mais dans la masse il prend l'empreinte de la forme cristalline des autres éléments et ne leur communique point la sienne.

Or d'après les principes connus de fusibilité il n'est pas concevable que la silice pure ait jamais pû former, par voie ignée, la pâte molle du feldspath et du mica déjà consolidés. Ce phénomène subversif des lois connues, qui serait déjà remarquable pour des corps d'une fusibilité relative peu différente, prend un caractère paradoxal tout particulier lorsqu'il est question du quartz, dont l'infusibilité relative est si tranchée, et qui doit conserver toute sa rigidité à la température où les autres éléments du granit (mica, feldspath, tourmaline noire, amphibole, etc.) sont déjà à l'état de liquidité parfaite.

La disposition dont nous parlons, souvent sensible dans le granit le plus commun, l'est surtout dans le granit à grands cristaux de feldspath comme il en abonde dans presque tous les massifs granitiques considérables ; il l'est dans le granit nommé graphique, où le quartz prend si régulièrement l'empreinte rentrante des angles saillants du feldspath ; elle l'est plus distinctement encore dans le granit à tourmalines et grenats, où les éléments sont bien mieux tranchés par la couleur et par la forme. Nulle part on ne rencontre dans ces variétés un *crystal* de quartz enchassé dans la pâte feldspathique ; mais qui n'a remarqué les cristaux de tourmaline aux faces polies et brillantes, les prismes du feldspath, le grenat multiface, enfin les feuilletés même du mica enchassés dans du quartz hyalin ou dans une pâte quarzo-feldspathique, qui s'est moulée sur eux de manière à porter avec la plus parfaite exac-

titude l'empreinte en creux de leur forme régulière? C'est donc un fait général, caractéristique de la structure du granit, que les substances les plus fusibles y sont le plus souvent encastrées et forment empreinte dans la moins fusible de toutes.

Voilà certes un grand fait, sans aucun doute un utile enseignement y est renfermé; et si l'on veut trouver quelque lumière sur l'origine du granit, c'est là qu'il la faudra chercher. Telle est la pensée en effet qui s'est présentée à mon esprit, et il a embrassé cette recherche avec l'ardeur de la conviction, et je dirais presque avec l'illumination d'une vue nouvelle. Mais avant d'exposer nos idées, résumons d'abord les conditions générales de la formation du granit et voyons comment les opinions les plus accréditées prétendent y satisfaire.

L'enchevêtrement parfait des parties constituantes du granit prouve d'abord avec évidence que toutes se sont formées à la fois, que toutes ont pris ensemble la disposition qu'elles occupent aujourd'hui. Il serait certes impossible de dire lequel du quartz, du feldspath ou du mica s'est formé le premier, et la simultanéité de consolidation peut être considérée comme un caractère évident des éléments de cette roche. Il est tout aussi hors de doute, comme nous l'avons dit déjà, que la chaleur a joué un grand rôle dans l'état actuel de ces éléments. Ainsi : simultanéité de consolidation, influence ignée, sont deux caractères essentiels auxquels toute explication de l'origine du granit devra nécessairement satisfaire. J'ajoute cependant qu'une théorie qui invoquerait l'action d'une température très intense, aurait à justifier cette hypothèse par des faits, car les modifications des roches au voisinage du granit ne témoignent pas d'une énergie calorifique démesurée, et sont hors de proportion par exemple avec la haute température qui aurait été nécessaire pour fondre la silice. Enfin la théorie devra s'adapter à la conception de cette anomalie du quartz que j'ai signalée avec détail. Cela posé examinons l'état actuel des idées sur ce phénomène du granit, il faut le dire, un peu vaguement étudié jusqu'à ce jour.

En prenant pour point de départ l'action de la chaleur, l'idée la plus naturelle et celle aussi qui est le plus générale-

ment professée, consiste à supposer que cette roche a été injectée à l'état d'un silicate multiple, fondu sous l'action d'une très haute température, mais dans cet état particulier qu'on a désigné sous le nom de fusion pâteuse; puis le refroidissement agissant sur cette matière, d'une proportion inconnue aujourd'hui, en aurait séparé la silice excédante par une sorte de dévitrification particulière. Telle est aujourd'hui, ouvertement ou tacitement, l'opinion la plus accréditée. Cette théorie, remarquons-le d'abord, laisse entière la difficulté d'expliquer comment le granit se trouve associé si intimement à des roches stratifiées; comment les gneiss présentent non seulement tous les éléments du granit, mais encore les anomalies de leur groupement: examinons toutefois l'hypothèse en elle-même et relativement aux simples faits de structure. N'y a-t-il pas lieu de se demander s'il est en effet possible que le quartz puisse se séparer à l'état d'isolement et de pureté d'une combinaison fusible dans laquelle il serait entré comme partie chimique constituante, et si les faits connus présentent rien qui puisse autoriser une semblable supposition? N'y a-t-il pas lieu de se demander encore si l'extrême variété de proportions élémentaires du granit peut laisser supposer que sa masse ait jamais formé un composé défini comme les silicates de la voie ignée? Considéré comme roche d'aggrégation et relativement à la nature de ses éléments, le granit est à la vérité partout remarquable par leur uniformité caractéristique; mais si l'on compose une masse chimique de tous ces éléments et si l'on tient compte de leurs proportions relatives, il deviendra la roche la plus hétérogène que l'on puisse imaginer et son point de fusion indiqué par cette proportion relative des éléments en divers lieux impliquerait l'action d'une température très diverse non pas seulement sur des points éloignés du globe, mais même à des distances très voisines. Or ce n'est pas ainsi que procède la nature dans les phénomènes de fusion, et l'échelle de proportions chimiques y reste la même pour tout le milieu soumis à la même influence calorifique.

Mais toutes ces considérations s'effacent pour ainsi dire devant celle de structure anormale que nous avons signalée et

qui place entre cette opinion et les faits la barrière d'une impossibilité physique. Comment imaginer en effet que le feldspath, le mica, la tourmaline ou l'amphibole, tous silicates facilement fusibles aux températures dont nous disposons, aient pu se trouver déjà consolidés et agglomérés sous la forme si nette de leurs cristaux, pendant que la silice, relativement infusible, aurait encore été assez pâteuse pour se mouler sur ces mêmes cristaux, sans affecter jamais une forme qui lui soit propre? Ce seraient donc le feldspath et le mica qui se seraient séparés par refroidissement de la silice encore fondue? Il y a là impossibilité flagrante, contradiction avec les lois physiques; car si l'on admet une séparation par refroidissement, phénomène dans lequel la force de cohésion joue le principal rôle, il a dû arriver un moment où le quartz se trouvait déjà consolidé au milieu de la masse fondue, c'est-à-dire absolument le contraire du fait que l'on veut expliquer. L'élimination par refroidissement implique en effet le jeu des affinités *physiques*, car un corps se solidifiant au milieu d'une masse fondue doit avoir perdu son état de division *chimique* et moléculaire, sans quoi il resterait disséminé: or faire intervenir ici les affinités physiques et la cohésion, c'est se heurter contre des faits impossibles.

J'ai été curieux de voir si ce point remarquable de la question des granits n'avait pas été invoquée dans la grande dispute des vulcanistes et des neptuniens et j'ai recherché si l'une ou l'autre de ces opinions ne l'avait pas appelé en sa faveur. Mais cette recherche est seulement propre à montrer combien l'esprit de système est facile conseiller dans les questions délicates; car les deux opinions avaient cru trouver des armes dans le même phénomène. Les neptuniens n'avaient pas manqué de signaler la circonstance singulière que nous avons analysée comme un appui à leurs idées¹; et cependant nous la trouvons de même signalée dans Playfair, commentateur de Hutton, comme venant à l'appui de l'origine ignée des granits. Voici en effet le passage curieux qu'on lit dans le paragraphe

¹ Voir Breislak, un de leurs antagonistes. *Introduction à la géologie.*

137 de ces commentaires : « Le granit de Portsoy présente une des plus singulières variétés de cette pierre, et est remarquable en ce que le feldspath est la substance qui a pris sa cristallisation propre et *donné la forme au quartz*, de manière que ce dernier porte les deux impressions des angles aigus et obtus qui appartiennent à la figure rhomboïdale du premier. Les morceaux angulaires du quartz ainsi modelés sur le feldspath et placés par lui en rangées, donnent à cette pierre l'apparence d'une lettre alphabétique grossière.

« Maintenant le docteur Hutton soutient que les substances précipitées par solution et cristallisées paisiblement ne peuvent être soumises à l'impression réciproque que nous venons de citer, et que cela ne peut avoir lieu que lorsque toute la masse se consolide au même moment. Une telle consolidation simultanée ne peut s'effectuer par d'autres moyens que par le refroidissement d'une masse qui a été en fusion. »

Il est impossible de mieux caractériser le phénomène que ne le fait Playfair dans cette description du granit de Portsoy, mais les théories font arme de tout ce que l'on ne sait pas expliquer : pénétrés par de hautes considérations géologiques de la nature ignée du granit, Hutton et Playfair veulent en voir une démonstration dans l'enchevêtrement de ses parties composantes, sans se demander si ce phénomène présente des conditions de possibilité compatibles avec le refroidissement, et comment il pouvait se faire que des substances dont les points de fusion sont si distants aient pu se solidifier simultanément. Breislak avait mieux senti la difficulté, mais je ne le suivrai pas dans l'explication qu'il en donne et qui, malgré le mérite de son auteur, ne me paraît pas pouvoir supporter l'analyse; la difficulté qui s'attache à la structure anormale du granit est depuis cette époque demeurée encore entière.

Pénétré de cette difficulté, la croyant fondamentale, j'ai pensé que pour satisfaire aux données si contradictoires de la question il fallait sortir complètement des voies ordinaires, et qu'il fallait changer le point de vue sous lequel les partisans de l'origine ignée avaient considéré jusqu'ici le granit.

Puisque le refroidissement ne saurait expliquer la sépara-

tion du quartz, dans les conditions de la structure du granit, n'y aurait-il pas lieu d'intervertir les termes de l'hypothèse, et de placer dans la chaleur même le principe de cette séparation? Rechercher si le granit, cette roche si universelle en étendue et si constante dans son anormale composition, n'aurait pas été primitivement formée sous d'autres conditions générales que celles de la chaleur, si elle ne pourrait être le produit d'une sédimentation chimique primitive et si elle n'aurait point reçu par une simple transformation ignée ce type de structure qui la caractérise actuellement... Telle est l'idée qui s'est élevée dans mon esprit; ce passage des affinités de la voie humide à celles de la voie ignée et cette sorte de duel entre les deux modes de combinaison chimique m'a paru être un principe nouveau et fécond, directement applicable au cas qui nous occupe.

Dans la plus grande simplicité de cette hypothèse, il faut se représenter la formation, dans le sein des mers primitives, d'un dépôt chimique silicaté, dont la nature serait réfractaire si on le considère dans la totalité de ses éléments, ceux-ci pouvant former d'ailleurs des groupements partiels capables de céder à l'action de la chaleur, de la même manière que dans certains fourneaux métallurgiques l'action du feu sépare les scories fusibles de la masse métallique moins rammollissable. L'influence adventice d'une chaleur modérée, telle par exemple que la nature nous l'offre dans ses volcans, venant à s'exercer sur le dépôt hypothétique dont nous parlons, y aurait ainsi déterminé la formation des composés fusibles, représentés par le feldspath et le mica, et leur élimination individuelle de la combinaison primitive; par suite l'élément réfractaire superflu, le quartz, isolé à l'état naissant et *moléculaire*, se serait aggloméré *sans fusion* sur ces noyaux fluides, et rien ne répugnerait à penser que rendu plastique par cet état de division chimique il ait pu obéir, en se soudant à lui-même, à l'influence de la compression et se mouler ainsi sur la surface des cristaux pendant qu'ils se formaient. La séparation du quartz serait donc considérée comme une sorte de précipitation chimique *par résistance à la fusion*, phénomène dont les con-

ditions sont bien différentes d'une solidification par refroidissement. Dans ce dernier cas en effet, la substance séparée, qui est toujours la moins fusible, s'agglomère d'elle-même par la force de cohésion *physique* et prend sa dureté immédiatement; dans le premier cas au contraire, la substance réfractaire, isolée à l'état de division *chimique*, se subordonne aux autres matières de mélange, par conséquent son adhérence peut être influencée par leur pression et par la forme suivant laquelle elles se solidifient.

Quelques géologues, par une extension des idées huttoniennes avaient déjà émis l'opinion que le granit pourrait bien dériver de la transformation ignée des produits de la sédimentation, mais de la sédimentation mécanique, tels que les grès, tandis que les gneiss et les micaschistes seraient le résultat de la transformation des dépôts limoneux. Cette hypothèse est essentiellement différente de la mienne et j'en récusé complètement le principe : elle ne change rien en effet à la difficulté de la structure du granit, puisqu'elle aboutit en définitive au même fait de la fusion générale; elle introduit seulement une difficulté de plus, celle de l'origine même du terrain transformé, car les premières roches d'aggrégation ayant dû dériver de la destruction des masses granitiques, on ne saurait échapper ainsi à un cercle vicieux.

La théorie de l'origine du granit que j'entreprends d'exposer repose sur des principes tout différents : la transformation ignée s'y serait exercée sur un sédiment formé par *voie chimique*, par précipitation, et non point par voie mécanique comme les dépôts qui se forment de nos jours; ce dépôt aurait par conséquent une origine réellement primitive ou antérieure à tous les terrains sédimentaires. Et il faut bien l'avouer dès maintenant, nous nous trouverons ramenés par cette supposition au principe si paradoxal des neptuniens, la formation première du granit par la voie humide.

Isolée et bornée à de vagues considérations, la conjecture théorique dont nous parlons, n'eût peut-être mérité qu'une attention médiocre, et sans doute elle n'eût point mérité d'être connue; mais nous lui verrons bientôt puiser dans les lois pré-

cises de la chimie, mises en rapport avec les faits naturels, une force et une netteté peu communes dans des questions aussi générales, et elle nous portera enfin par induction vers des considérations d'un ordre bien plus élevé. Rien ne saurait être indifférent dans un pareil sujet et le champ des hypothèses y prend tout aussitôt une extension démesurée : il ne s'agit pas seulement en effet d'une anomalie dans la structure d'une roche, il s'agit d'un grand fait dans l'histoire de la terre, il s'agit du granit qui forme partout la base de son revêtement observable, du granit, roche ignée s'il en fut, et qui cependant se mêle intimement aux produits de la stratification ; il s'agit enfin de déterminer qui l'emporte comme cause première, dans ce phénomène complexe des roches primitives, ou du principe igné ou du principe de sédimentation. Et de la solution précise de ce problème dérivent, quant à l'histoire chimique du globe, les plus vastes conséquences.

La première question à résoudre relativement à la formation de la matière originaire des granits, est celle de sa composition possible, en ayant égard à ces deux conditions : que cette matière soit insoluble, et qu'elle renferme tous les éléments normaux du granit, savoir la silice, l'alumine, la potasse, très peu de soude et du fluor. Or les lois connues de la chimie fournissent ici de précieuses données.

Si l'on se reporte à ce que j'ai dit au commencement de ce chapitre sur la séparation originaire de la potasse et de la soude et sur l'isolement de l'une dans les granits, de l'autre dans l'eau des mers, on ne pourra s'empêcher de remarquer quelle convenance chimique existe à ce que cette séparation se soit effectuée d'après les affinités de la voie humide. Nous ne connaissons encore aucune combinaison de la voie ignée dans laquelle la potasse et la soude ne se comportent d'une manière identique et ne puissent se mélanger en toute proportion ; par la voie humide au contraire les propriétés des deux alcalis ne sont plus complètement les mêmes, et la potasse a en général plus de tendance que la soude à former des composés insolubles. De cette tendance on déduira sans peine que si, par un événement fortuit, les éléments de divers sels neutres de po-

tasse et de soude viennent à se trouver en présence, et que d'après la nature des acides il doit se former parmi eux des sels solubles et des sels insolubles, évidemment c'est plutôt la potasse qui se précipitera et la soude qui restera en dissolution, sauf des cas très exceptionnels.

Si nous consultons les analogies que peut fournir la composition du granit, il est en particulier deux composés silicieux qui jouissent de la propriété de précipiter les deux alcalis mais non tous deux avec la même énergie : c'est la silicate d'alumine et l'acide fluosilicique. On sait que lorsque la silice et l'alumine se rencontrent à l'état naissant dans une liqueur alcaline, ces deux corps se précipitent, entraînant dans leur combinaison une certaine portion de l'alcali ¹. Dans les divers procédés de laboratoire que l'on peut employer pour effectuer ces combinaisons, la condition nécessaire est toujours un excès d'alcali comme dissolvant, de sorte que si l'on employait les deux alcalis ensemble on ne pourrait s'apercevoir sans doute de leur différence relativement à la solubilité : mais si l'on savait réaliser le cas où un acide, l'acide muriatique par exemple, existât dans la dissolution en quantité suffisante pour la saturation de la soude seulement, il paraîtra certain sans qu'il soit nécessaire que l'expérience prononce à ce sujet, que c'est la potasse qui doit se précipiter avec la silice et l'alumine, laissant la soude dans la dissolution à l'état de chlorure de sodium.

Il est un autre genre de composé qui doit déterminer plus évidemment encore la séparation des deux alcalis, c'est l'acide fluosilicique. Le fluosilicate de soude, quoique peu soluble, l'est cependant notablement plus que celui de potasse, et il l'est beaucoup plus dans l'eau chaude que dans l'eau à une basse

¹ M. Berzelius qui dans ses admirables travaux sur la silice et ses combinaisons a le premier, je crois, attiré l'attention des chimistes sur ces composés insolubles, a vu que suivant divers procédés on pouvait précipiter ainsi par voie humide des combinaisons où l'alumine contient trois fois autant d'oxygène que la potasse, et la silice autant que les deux bases ensemble ou bien une quantité double.

température. Qui doutera que si les deux alcalis viennent à se trouver (surtout dans une eau d'une température assez élevée) en présence des acides fluosilicique et muriatique en quantité justement nécessaire pour leur saturation, ce ne soit la potasse qui se précipite en fluosilicate, laissant la soude dissoute à l'état de sel marin ?

Ces conclusions admises, ne sera-t-on point frappé de la singulière coïncidence qui existe entre la présence du fluor avec la potasse dans le granit d'une part, et de l'autre celle du chlore avec la soude dans l'eau des mers ? L'exclusion réciproque de deux corps aussi rapprochés chimiquement que le chlore et le fluor, en regard de l'exclusion réciproque de la soude et de la potasse, forme un double résultat d'une concordance merveilleuse avec les principes chimiques que je viens d'exposer. La présence normale du fluor dans un des éléments du granit, dans le mica, est un problème jusqu'ici resté sans solution, un fait sans raison apparente, et son absence de la dissolution marine, où abonde le chlore, n'est pas une circonstance moins remarquable et moins inexplicée. La raison de ces faits c'est la formation du granit par voie humide qui nous la donnera : l'origine du fluor dans cette roche est un point de théorie tout à fait nouveau dans son principe, et auquel je n'attache pas un médiocre intérêt, parce qu'il me semble répandre une grande clarté sur la nature intime du granit et sur les relations si problématiques de cette roche avec les terrains placés au contact de ses masses.

Qu'arrivera-t-il en effet si l'influence d'une chaleur accidentelle vient tendre à modifier ce mélange d'allumino-silicate et de fluosilicate de potasse, que nous supposons avoir été le principe élémentaire des granits ? Si l'on admet qu'à l'intérieur des masses la pression a été suffisante (comme dans la transformation des calcaires en marbre) pour s'opposer à la dissipation des matières volatiles, les éléments dont nous parlons, non fusibles dans leur combinaison originaire, devront prendre les groupements partiels favorables à la fusibilité : le composé fusible alumineux, le feldspath, et le composé fusible fluoré, le mica, se formeront en groupes distincts, retenant chacun

la quantité de potasse nécessaire et séparant par exclusion la silice superflue, que la fusion ne saurait atteindre : tel sera l'origine de l'état actuel du granit dans sa nature la plus générale. Mais sur le bord des massifs, là où la pression ne sera plus aussi énergique, aussi complète, une modification essentielle va se produire : l'action de la chaleur expulsant du fluosilicate de potasse une portion du gaz fluorique silicé et même du fluorure de potassium, non seulement destituera le granit de l'élément micacé, mais altérera les terrains environnant en y transportant des éléments nouveaux, le quartz, le fluor, la potasse, et tel pourra être le principe de cette transformation des terrains sédimentaires au contact du granit, que dans ces derniers tems l'on a nommée *métamorphisme des roches*, transformation réellement inexplicée dans les théories ordinaires.

La formation des gneiss ne s'explique pas avec une moindre facilité dans notre manière de concevoir l'origine des roches granitoïdes. La transformation ignée de ces premiers dépôts de précipitation chimique n'ayant pu être que progressive, il a dû exister un moment où bien des portions de ces roches, non transformées encore, étaient cependant émergées hors du sein des mers et par conséquent soumises aux dégradations torrentielles, atmosphériques ou au battement des vagues marines : de là des sédiments mécaniques et par conséquent *stratifiés*, mais contenant toutefois dans leur composition les éléments constitutifs du granit. La transformation ignée y développera donc les mêmes composés fusibles ou réfractaires, tout en y conservant le trait caractéristique de l'action des eaux courantes, la stratification. Quant au micaschiste intimement uni à ces terrains de gneiss, il proviendrait en partie d'une atténuation du même mode de sédiment, dans le même rapport que le schiste ou limon fin est au grès, peut-être proviendrait-il encore en partie d'une transformation par contact, comme elle a lieu au voisinage du granit lui-même.

Ainsi donc la nature et les relations les plus anomales des roches primitives trouvent dans la théorie que nous produisons une explication claire et rationnelle, et cette théorie tend à introduire les données réelles de la chimie là où l'on n'avait

proposé encore que des conjectures plus ou moins vagues, plus ou moins improbables. Nous reviendrons au reste sur ces faits, nous n'avons voulu que montrer d'un premier coup d'œil quelque chose de la portée de notre nouveau point de vue et indiquer les conséquences les plus frappantes de cette introduction d'un élément humide des granits, avant de chercher à pénétrer le mystère de son origine.

Hutton est, comme nous l'avons dit, le premier créateur du principe fécond de la transformation des roches sédimentaires par l'action de la chaleur; mais en considérant cette action comme un phénomène continu et en enveloppant ce grand fait dans l'ambitieuse idée d'une rénovation indéfinie de la surface du globe, il a obscurci d'un épais nuage sa belle conception, et l'a forcément limitée à de vagues considérations philosophiques. C'est, je pense, par ce côté erroné de son système qu'il a donné naissance à cette école de géologues qui dans les phénomènes naturels comptent le tems pour tout et le moment pour rien, et qui faisant abstraction de toutes les perturbations instantanées qui ont changé périodiquement la face de la terre depuis l'origine des âges, pensent tout expliquer par des passages, par la continuité des causes insensibles et par des cataclysmes purement locaux. Hutton en un mot, par la conséquence même de ses grandes vues, détournait sa pensée et celle de son école non seulement de toute considération relative à l'état originaire de notre planète et de son revêtement, mais encore de toute idée de modification intermittente agissant à la fois et d'une manière brusque sur de grandes portions de la surface du globe.

Tels ne sont point les principes qui nous ont guidé : comme dans la question des révolutions physiques de la terre, nous ne reculons pas ici devant la pensée de mouvements généraux et intermittents, pouvant ouvrir ou interrompre des sources de chaleur; nous ne reculons point non plus devant la recherche d'un état originaire du globe antérieur à tous les sédiments mécaniques. Frappé au contraire de la physionomie caractéristique des termes inférieurs de la série géologique, je me suis demandé s'il n'était pas possible de remonter par eux à des

idées d'origine, et comme les anciens géologues, mais sous un point de vue nouveau, j'ai cherché dans la roche fondamentale, le granit, non pas une transition mais un point de départ. Par ce premier trait les idées que je présente se distinguent tout d'abord des théories modernes de transformation.

C'est en effet sous l'empire des idées huttoniennes, quoique par une modification de ces idées, que s'est développée et qu'a grandi démesurément aujourd'hui l'hypothèse de la transformation ignée des roches sédimentaires, que l'on a caractérisée dans ces derniers tems sous le nom de *métamorphisme*. Mais ce métamorphisme tel qu'il est compris par un grand nombre de géologues, ne tendrait à rien moins qu'à intervertir toute l'étude historique des terrains, en déniaut aux roches cristallines tout caractère chimique qui leur soit propre et originaire. Partout il admet en effet une transformation non seulement dans l'apparence mais dans la nature même des roches; partout il admet l'apport d'éléments étrangers et leur pénétration intime dans les terrains ¹ par une élaboration chimique colossale, malgré tous les obstacles qu'offre la cohésion à leur passage. De semblables conceptions appliquées sur une trop grande échelle répugnent, je dois le dire, aux idées de la chimie pratique, et avant de rechercher de nouvelles lois naturelles, il paraît convenable d'essayer si celles qui nous sont bien connues ne sauraient se prêter à la nature des faits. Ce phénomène de transformation adventice par l'absorption de matières étrangères, qu'il nous est possible de concevoir sur une petite étendue et pour des cas de contact par exemple, ne peut plus se comprendre de la même manière lorsqu'on vient à l'appliquer à d'immenses formations comme celle des gneiss, dont le passage à des roches bien évidemment déposées n'est nullement douteux. La transformation en grand ainsi définie, loin d'être

¹ Le gneiss et les schistes cristallins sont caractérisés par la présence du quartz, de la potasse et du fluor, à la différence des sédiments argileux plus modernes qui ne renferment aucun de ces éléments, ou du moins en très petite quantité. C'est cette introduction d'éléments étrangers que la théorie du métamorphisme doit chimiquement expliquer, elle ne l'a point fait encore.

circonscrite à une seule époque géologique, devrait appartenir d'ailleurs aux terrains de tous les âges, ce que l'expérience n'a point suffisamment confirmé : non que l'existence de ces roches contemporanément à des formations assez récentes n'ait pu être reconnue, elle paraît l'avoir été en effet dans quelques contrées, dans les Alpes par exemple, et notre théorie du reste n'est pas en opposition avec ce fait ; mais il faut ajouter qu'il est relativement rare et il n'en demeure pas moins constaté que les gneiss et les micaschistes appartiennent en général exclusivement aux plus anciennes périodes géologiques : ce seul résultat tend à démontrer avec évidence qu'il y a en réalité dans ces dépôts problématiques un phénomène de composition origininaire distinct et caractéristique et que si, comme il y a lieu de le croire, une transformation s'est opérée dans ces terrains, leur essence chimique totale n'en a pas dû être très notablement modifiée ¹, qu'enfin la nature exceptionnelle de leurs éléments compesants provient uniquement de leur formation origininaire.

C'est dans la recherche de cette composition origininaire des premiers sédiments que consiste la première partie de notre

¹ Nous exceptons de cette conclusion les phénomènes dus au contact du granit avec les roches où il a pénétré, phénomènes réels mais dont l'échelle est peu considérable : loin que je récuse ces faits, ils forment au contraire une portion importante de notre étude, et nous cherchons à leur donner tout l'intérêt théorique dont ils sont dignes, en leur assignant une cause chimique simple et rationnelle, ce qui n'avait pas encore été fait. Mais il ne faut pas s'en exagérer exclusivement l'influence, et je crois que la formation des gneiss leur est complètement étrangère. On ne saurait fournir une meilleure preuve de l'indifférence du contact du granit par rapport à la production des gneiss, que la relation de cette roche massive au contact simultané des gneiss et des schistes plus récents. M. Lyell donne dans ses éléments de géologie une coupe prise en Norwège, près Christiania, où cette relation est extrêmement significative. Le granit pousse à la fois des ramifications dans le gneiss très incliné et dans les strates siluriennes qui s'étendent au-dessus en gisement discordant. Nous avons reproduit cette coupe dans la fig. 23. Evidemment ici ce n'est pas l'éruption granitique qui aurait pu produire le gneiss par la transformation des schistes, puisque les schistes de la formation silurienne, également pénétrés par le granit, n'ont point subi une influence semblable.

étude, nous en avons déjà exposé les principes : parmi tous ces terrains que l'on a nommés primitifs et que nous croyons universellement formés au sein des eaux, le granit seul, suivant ces idées, serait le produit d'une précipitation *chimique* ; les terrains primaires stratifiés, au contraire, auraient été formés mécaniquement aux dépens de ce premier dépôt dans son état originaire, puis transformés avec lui plus tard par la pénétration intermittente de la chaleur.

Mais il ne suffit point de l'énoncé de ces idées, il ne suffit pas qu'elles puissent être considérées comme possibles, il faut qu'elles puissent être considérées comme réelles. Il me reste donc une grande tâche à remplir, c'est de chercher à remonter aux causes premières de ce dépôt élémentaire des granits et à indiquer ainsi comment il est possible de concevoir la concordance de cet effet originaire des eaux avec l'état igné de notre planète, dont je ne pense pas que l'on puisse contester la réalité. Mais il me faut ici renoncer pour un moment à l'ordre analytique des recherches pour me borner aux formes de la synthèse, et présenter l'exposé simple et systématique des idées telles que la théorie définitive nous les a faites.

C'est une admirable pensée due au génie de Davy que d'attribuer les déflagrations volcaniques à l'action de l'eau des mers sur un noyau terrestre d'une nature métallique, et en partie formé des éléments si oxidables dont Davy lui-même, armé d'un des plus beaux instruments de la science moderne, la pile voltaïque, avait révélé au monde savant l'existence par la découverte du potassium. Par une fatalité qui n'est point sans exemple dans l'histoire de la science, l'auteur de cette brillante hypothèse, malgré les présomptions de vraisemblance que les faits assignent à son principe, n'a point réussi à lui donner lui-même la rigueur nécessaire pour qu'elle pût s'adapter à toutes les conditions chimiques du problème qu'elle était destinée à résoudre, et ce qui est d'un exemple plus rare, ce grand chimiste a cru devoir sur la fin de ses jours y renoncer solennellement lui-même. En vain un autre chimiste illustre aussi, M. Gay-Lussac, a-t-il, en modifiant heureusement le principe

de Davy, donné une force nouvelle et de nouvelles applications à cette idée théorique, les faits échappent encore à son étreinte, et le grand problème des volcans, si intimement lié à toute la théorie des roches ignées, attend encore une explication complète et de nouveaux efforts des chimistes et des géologues.

Et cependant la disposition à peu près exclusive des volcans sur le littoral de la mer ou des lacs, donne à l'hypothèse de l'action des eaux dans ce phénomène une puissance de probabilité à laquelle l'esprit aurait bien de la peine à se soustraire. Pour moi j'ai toujours été frappé de l'heureuse et féconde originalité de principe, et lorsque par l'étude des roches ignées anciennes, des granits, je fus amené à reconnaître l'influence primitive de l'eau sur leur formation, je me reportai aussitôt à l'hypothèse de Davy et je conçus que par un paradoxe bizarre de la nature c'était dans l'action de l'eau peut-être que résidait la véritable relation chimique entre toutes les roches qui portent à nos yeux l'empreinte de l'action du feu. Je conçus que bornée au phénomène restreint des événements volcaniques, la conception de Davy n'était point parvenue à sa proportion de grandeur; je conçus qu'il lui manquait des faits à son échelle, et que c'était à la géologie à les lui fournir. Mais pour entrer dans cette voie il ne faut pas seulement modifier le point d'application des idées du grand chimiste anglais, il faut en modifier le principe même et donner une extension beaucoup plus grande à la recherche des causes.

Lorsque l'on considère le rôle immense que remplit l'oxygène à la surface de la terre, la multiplicité et la masse énorme des éléments auxquels il est combiné, et enfin son influence exclusive sur toute l'activité organique, on ne peut se refuser à penser que ce corps a reçu relativement à la matière du globe une destination providentielle. Principe essentiel de l'air et de l'eau, élément composant, et à double titre, de toutes les roches et de presque toutes nos combinaisons chimiques, unique agent de la combustion, instrument enfin de vie et de destruction à la fois pour tout l'organisme terrestre, l'oxygène occupe une place à part dans toutes les relations matérielles de notre globe. C'est une idée qui du reste a dès longtemps pris sa

place dans la science, et les illustres auteurs de la nomenclature chimique avaient apprécié ce grand rôle à sa juste valeur. L'esprit se trouve donc tout disposé par d'importantes considérations de philosophie chimique, à adopter pour l'oxygène une personnification distincte dans l'économie du globe, peut-être même une origine toute spéciale, si l'étude générale des faits et de leurs causes le conduit aussi vers cette voie. Nous allons voir bientôt en effet combien la sphère des idées vient à s'agrandir, lorsque l'on transporte à ce point de vue la question de l'origine des roches.

La recherche d'un composé chimique de la voie humide, élément originaire des granits, nous a conduit à supposer que des acides minéraux et des bases, tels que la silice, l'alumine, la potasse et la soude etc., avaient pu se rencontrer tous à la fois à l'état naissant dans l'eau des mers pour former le plus ancien revêtement sédimentaire du globe terrestre : ce serait sans doute le lieu de chercher à appliquer l'hypothèse de Davy, et l'action oxidante de l'eau sur les métaux simples et leurs composés pourrait peut-être expliquer assez bien la formation des bases et des acides oxigénés au milieu de ce liquide. Mais sans tenir compte ici des difficultés dans le détail chimique et de celle en particulier qui résulte du dégagement des gaz hydrogénés dans l'action complexe de l'eau sur les composés métalliques (gaz dont toute la géologie prouve qu'il n'a pu exister en aucun tems de grandes masses), l'explication dont nous parlons, devint-elle même applicable comme phénomène consécutif ou transitoire, ne saurait satisfaire complètement l'esprit lorsqu'il s'occupe de la recherche des causes : elle s'arrête au milieu des phénomènes et laisse encore bien des questions à résoudre pour remonter à leur origine première. L'existence seule de l'eau en présence d'une masse capable de la décomposer serait suffisante en effet pour constituer un grand problème devant lequel l'imagination est obligée de s'arrêter.

L'origine ignée du globe terrestre et sa haute température au moment où il a pris sa forme aplatie par la rotation étant un fait fondamental de la théorie de la terre, l'existence ori-

ginaire de son revêtement fluide actuel a toujours excité mon étonnement. L'espèce d'antagonisme qui existe pour nous entre l'idée de l'eau et celle que nous nous formons d'une combustion durable, rend bien difficile d'attribuer rationnellement à l'eau une existence simultanée de l'état igné primitif, et enfin l'association d'éléments fluides aussi hétérogènes que l'oxygène, l'azote et l'eau, m'a toujours paru s'éloigner de cette haute simplicité que nous recherchons naturellement dans les questions d'origine. Je l'ai dit ailleurs, dans les phénomènes naturels la variété des effets semble partout dériver de l'unité d'action; et c'est en cherchant la réalité de ce principe que l'idée m'est venue d'essayer à rattacher tous ces résultats disparates à une source unique, à un phénomène simple en rapport avec les lois chimiques qui nous sont connues.

La question immédiate à résoudre était la formation de l'eau : en l'étudiant, toute la série des matériaux qui composent le revêtement du globe actuellement observable est venue d'elle-même s'offrir à mes recherches et se rattacher comme par un lien commun à l'idée de l'origine ignée de la terre. Ce lien pour ainsi dire vital et animateur des matériaux superficiels du globe, c'est dans l'influence de l'oxygène que nous l'avons rencontré.

Si l'on part de l'hypothèse première de l'origine ignée de notre planète, il est naturel de supposer, d'après les saines idées de la chimie, que les corps s'y trouvent (et s'y trouvaient primitivement à la surface) non point isolés, mais groupés en combinaisons *définies*, suivant les affinités particulières de la voie ignée. En réfléchissant à la nature définitive des composés qui forment le revêtement actuel, on voit que la présence de l'oxygène apporte de grandes difficultés à la conception de cet état premier du globe; mais il y a lieu de rechercher si en séparant ce gaz, tous les autres corps ne pourraient pas être renfermés dans un nombre limité de combinaisons simples déduites des affinités calorifiques, d'où l'action de l'oxygène lui-même aurait extrait les combinaisons variées actuellement observables. Telle est la pensée fondamentale qui a formé la base de mes recherches; les considérations cosmogo-

riques qui me paraissent l'autoriser se rattachent à des idées générales auxquelles nous consacrerons quelque développement dans le dernier chapitre de cet ouvrage : je vais en indiquer ici seulement ce qui est indispensable à la recherche des conditions chimiques primitives du revêtement terrestre.

Nous ignorons en réalité et peut-être ignorera-t-on toujours quelle est la source matérielle d'où la main de la Providence a tiré le globe que nous habitons. Il n'est pas interdit toutefois de conjecturer que son origine se rattache à une grande loi de création et il n'est même pas irrationnel de croire que tout l'ensemble des mondes observables est réuni dans une grande unité de pensée créatrice : les grandes découvertes de l'astronomie récente marchent directement vers ce résultat, vers cette haute conjecture, et peut-être nous sera-t-il permis de penser que le progrès des sciences chimique et géologique tend à nous amener aussi vers ce but, le plus élevé sans doute que puissent se proposer nos études matérielles. Ce ne serait donc pas assez de l'idée, sans doute grande et philosophique, qui avait porté deux esprits élevés, Buffon et Laplace, chacun par des voies différentes, à embrasser le système solaire à lui seul dans une sorte d'unité distincte de formation, comme s'il se fut trouvé isolé au milieu de l'espace. Le système du premier, quelque remarquable qu'il soit comme conception originale, n'a plus je pense aucun partisan aujourd'hui; quant au système du second, bien que d'ingénieux rapprochements dynamiques paraissent lui donner une assez grande force, il est basé sur une hypothèse dont bien des faits permettent de suspecter la vraisemblance, et nous traiterons plus explicitement ce sujet dans le chapitre spécialement consacré à l'énoncé de quelques vues astronomiques, le dernier de ce livre.

Mais s'il vient à être prouvé qu'il y a lieu de récuser ces deux systèmes, et que l'on doit les considérer comme restreints et insuffisants malgré leur grandeur apparente, il restera toujours à appliquer une idée qui est encore l'expression la plus simple des lois newtoniennes, c'est celle qui consisterait à considérer le système des planètes comme d'une provenance étrangère au soleil et dérivant tout entier d'une impulsion

simultanée vers la sphère d'attraction dominante de cet astre. Ce n'est pas le lieu de rechercher ici quelle aurait pu être la cause de cette impulsion, ce sujet viendra en son lieu, mais ce qu'il est essentiel de signaler, c'est que le résultat de cette théorie serait une *succession* dans la provenance des deux parties constituantes de notre système planétaire, l'astre central d'une part et ses satellites de l'autre. On peut admettre au moins dès maintenant que ce résultat est dans la série des possibles, et je devrais dire des probables. Si l'on raisonne d'après cette base, ne saura-t-on admettre aussi que ces planètes, dérivant d'un milieu igné particulier, ont pu rencontrer dans leur course, ou plutôt à leur point même d'arrivée, une substance diffuse qui n'entrât point dans leur composition propre? S'il est vrai, comme nous serons amenés plus tard à le conjecturer avec quelque vraisemblance, que le soleil n'eût pas encore sa rotation lorsque le système de ses satellites est entré dans sa sphère d'activité ¹, on comprendra ce qui n'était nullement compréhensible dans l'hypothèse de Laplace, savoir qu'il ait pu être, à un moment donné, entouré d'une atmosphère qui se serait étendue au moins jusqu'à l'orbe de la terre et peut-être jusqu'à celle des planètes les plus éloignées. Ces corps se trouvant enveloppés d'un pareil fluide, ont du le rassembler autour d'eux quelle que fut sa rareté, et s'en former comme un manteau. Or si l'on admet maintenant que ce fluide fut de l'oxygène pur et que ce gaz n'entrât point dans la composition des planètes, il va en résulter pour la terre les conséquences les plus remarquables.

En définitive nous voulons seulement qu'on nous accorde pour un instant que la terre, formée de substances ignées, c'est-à-dire combinées entr'elles sous l'influence de la chaleur, et de plus dépourvues d'oxygène, a pu se trouver tout-à-coup

¹ Il faut absolument, pour regarder ces suppositions comme acceptables, se reporter au dernier chapitre de cet ouvrage où elles sont spécialement traitées. Nous y donnons une raison vraisemblable de cette diffusion d'une atmosphère oxygénée autour du soleil au moment de l'arrivée des planètes et de leur première révolution autour de lui.

entourée d'une atmosphère oxygénée : l'influence soudaine de cette nouvelle substance sur une surface combustible et échauffée a dû produire, comme nous allons le voir, des phénomènes d'une singulière précision relativement à l'état actuel du revêtement terrestre.

Il est naturel d'abord de penser que dans une masse planétaire formée sous l'influence de la chaleur, les corps les plus légers doivent se trouver portés à la surface et entrer plus spécialement dans la composition du revêtement extérieur : or qu'y a-t-il, parmi les corps connus, de plus léger que l'hydrogène? Qu'y a-t-il de plus combustible par le contact de l'oxygène sous l'action de la chaleur? Nul doute donc que dans l'hypothèse qui nous occupe, ce corps ne soit l'un des premiers et le premier peut-être sur lequel s'exercera l'influence de l'atmosphère oxygénée. Mais le produit de la combustion de l'hydrogène c'est l'eau, l'eau des mers, ce grand revêtement liquide de la surface du globe... Ainsi l'on est rationnellement amené à concevoir par cette hypothèse, que la masse des eaux ait pu être un produit et non pas un principe dans l'économie originelle du globe.

Mais pour donner un corps, une forme chimique à cette conception, il faut essayer de reconnaître dans quelle sorte de combinaison pouvait entrer primitivement ce gaz combustible, l'hydrogène.

L'hydrogène se combine avec énergie aux corps non métalliques, avec lesquels il forme des composés en général d'une tendance acide très prononcée; cependant il en est deux, l'azote et le carbone, avec lesquels il peut former des composés basiques et avec le premier même il produit une base très puissante, l'ammoniaque. Une idée naturelle est donc d'imaginer qu'il a pu exister des *sels hydrogénés* dans le revêtement primitif de la terre, et que cette base aujourd'hui exceptionnelle, l'ammoniaque, a pu y jouer un rôle important. Un remarquable résultat vient donner une grande force à cette idée : en effet, de la combustion des sels ammoniacaux que doit-il chimiquement résulter? De l'eau et de l'azote..., la mer et l'atmosphère.

Ce serait là sans doute une merveilleuse concordance des faits chimiques avec les données de la nature, et cette coïncidence m'avait en effet vivement frappé lorsqu'elle s'offrit à mon esprit. Cependant il ne faudrait pas se laisser entraîner trop facilement aux séductions d'une idée simple et qui paraît grande par sa simplicité même : en examinant celle-ci plus attentivement on reconnaît qu'elle ne saurait satisfaire à toutes les relations de quantité qu'implique la formation simultanée de l'air et de l'eau. D'après le poids connu de l'atmosphère par mètre carré de surface terrestre, il est facile de déduire la quantité d'azote qu'elle renferme, en supposant que le mélange avec l'oxygène y soit identique à toutes les hauteurs¹ : or quelque considérable que soit cette quantité, elle ne saurait entrer en comparaison avec la masse des eaux. Prenons par exemple l'hydrochlorate d'ammoniaque : 100 k. de ce sel, renfermant 41 k. d'azote, produiraient 120 k. d'eau, par la combustion de tout l'hydrogène ; par conséquent les 8000 k. d'azote par mètre carré que contient notre atmosphère correspondraient à un poids d'eau de 24000 k. La formation originelle de l'azote par ce procédé n'aurait donc produit que 24 m d'eau sur toute la surface du globe, ce qui n'est peut-être pas le 20^e de la quantité qui en existe.

Ainsi l'on serait bien loin de la vérité en regardant la combustion des sels ammoniacaux comme suffisante pour avoir produit en même tems l'hydrogène de l'eau et l'azote de l'air. Quant à l'azote d'ailleurs nous en trouverons bientôt une autre source, qui viendra restreindre notre première considération ; celle-ci subsiste toujours cependant, non pas seulement pour remplir les vides que nous laisseront les autres sources d'azote atmosphérique, mais comme ayant pu exercer un rôle principal sur sa formation : nous y admettons comme parties contribuantes l'hydrochlorate, peut-être l'hydrofluat et l'hydrocyanate d'ammoniaque.

¹ Cette quantité totale est de 4.000.000.000.000.000 kilogr. ; elle est par mètre carré de 8000 k. environ. Quant à l'azote qui appartient à la matière animale, il ne forme pas plus de la cent millionième partie de ce poids atmosphérique.

Quant à l'eau il nous en faut chercher encore une autre provenance immédiate : la plus simple des suppositions serait de donner à la terre une première atmosphère composée d'hydrogène pur ou mêlé d'hydrogène proto-carboné, lequel serait l'origine de l'acide carbonique qui existe encore en petite quantité autour du globe mais qui a dû y exister en quantité beaucoup plus grande si l'on en juge par l'ancienne végétation et par le carbone enfoui dans les houillères ¹. Cette supposition d'une atmosphère en partie formée d'hydrogène libre n'a par elle-même rien d'in vraisemblable, rien qui ne soit compatible avec l'origine ignée de la planète, et cela suffit bien pour la rendre admissible, si elle est d'ailleurs une transition nécessaire à des conséquences irrécusables quant à la formation des autres éléments de l'enveloppe actuel du globe. C'est en effet cette formation universelle que nous allons essayer de faire concevoir, en partant de cette base première, la formation préliminaire de l'eau.

Si l'on suppose que les différents corps élémentaires de la nature observable ont été assemblés à l'origine sous l'influence ignée et sans la présence de l'oxygène, il faut nécessairement admettre que ces éléments se sont trouvés groupés en combinaisons binaires, quaternaires ou même d'une multiplicité plus grande, dans lesquelles les corps non métalliques (gazolytes d'Ampère) se trouvaient unis, comme éléments électro-négatifs, aux métaux; ces derniers se trouvant ainsi à l'état de chlorures, fluorures, sulfures etc., et formant dans ces divers

¹ En réunissant il est vrai tout le carbone répandu à la surface du globe, soit dans l'atmosphère soit comme partie intégrante des êtres organisés, la combustion de l'hydrogène qu'il pouvait contenir à l'état d'hydrogène carboné ne donnerait pas sur tout le globe une hauteur d'eau de 5 millimètres; quant au carbone souterrain, si l'on admet qu'il existe sur un 50^e du globe une puissance de charbon de 50^m, il aurait pu en résulter environ 3^m d'eau. Cette influence de l'hydrogène carboné n'a donc pu être que très médiocre. Cependant les relations du carbone avec l'organisation végétale et animale sont si importantes, qu'on ne pouvait ici passer sous silence la formation de l'acide carbonique de l'atmosphère. Nous la verrons bientôt reproduite ou complétée par d'autres réactifs.

modes de saturation des combinaisons plus compliquées, analogues à nos *sels* oxygénés. L'oxygène et l'eau agissant sur ces corps auraient produit toutes les transformations d'où résultent les combinaisons actuelles, combinaisons où l'oxygène joue en effet partout le principal rôle. De là se seraient formées la silice et l'alumine, la potasse et la soude, la magnésie et la chaux, l'oxide de fer et toutes les autres bases ou acides minéraux plus ou moins répandus sur la surface actuelle du globe. Mais cette supposition, admissible en principe, l'est-elle en résultat? C'est ce qu'il faut rechercher par l'étude de détail : indépendamment de l'action de l'oxygène, deux circonstances principales ont dû influer puissamment sur le groupement définitif des corps, c'est la nature de leur combinaison première d'une part, et de l'autre la présence de l'eau, dont nous trouverons en réalité que le rôle a été principal; ce sont les modifications apportées par ces deux influences au phénomène de l'oxidation qui fourniront la justification de notre système et la concordance des idées théoriques que nous avons émises, avec les faits observables.

Il faut en effet que nous parvenions à faire voir qu'en parlant des bases que nous venons d'admettre, les éléments constants qui devaient servir à la composition future du granit, savoir la silice, l'alumine, la potasse et le fluor, ont pu se trouver seuls *insolubles* dans le revêtement fluide général, dans l'eau, tandis que les autres éléments, ceux même qui se sont plus tard déposés, ont dû se trouver tous *dissous* pendant cette première période des réactions chimiques de la voie humide.

Je ne puis m'empêcher de remarquer que tout en prenant pour point de départ les phénomènes ignés, notre théorie, par un retour singulier, semblerait en revenir ainsi à ce premier terme des conceptions neptuniennes, le dépôt des roches primitives dans un fluide universel, en un mot au *fluide chaotique* de Werner, de Kirwan et de Deluc. Nous ne récusons point ce rapprochement avec des idées adoptées par ces géologues célèbres, et qui leur étaient inspirées comme instinctivement par les apparences générales de la géologie : hâtons-nous

cependant de le dire, notre fluide chaotique, à nous, n'embrasse point toute la masse du globe et ne vient pas disputer au feu la liquidité primitive de la terre ; notre fluide n'est qu'une simple pellicule aqueuse formée par la combustion à la superficie du globe terrestre. Mais passons au détail des faits.

Nous ne répéterons point ce que nous avons dit déjà sur la nature du dépôt qui doit avoir formé l'élément constitutif des granits ; ce devait être, comme nous l'avons vu, une aggrégation de silicate d'alumine entraînant de la potasse, peut-être de silice libre, et enfin de fluosilicate de potasse : la formation de ces composés se conçoit par la seule rencontre de leurs éléments binaires ; ils sont d'ailleurs insolubles, la difficulté n'est donc pas de savoir comment ils ont pu se précipiter en se formant au sein de l'eau primitive, mais comment ils ont pu se précipiter seuls ; ce problème, nous en trouverons la solution en faisant intervenir l'action de l'eau nouvellement formée, et non plus celle de l'oxygène, sur les combinaisons primitives des corps, et en imaginant sur la nature de ces combinaisons une hypothèse qui n'avait point été introduite encore dans la science théorique.

Une des premières et des plus sérieuses difficultés de cette question de solubilité était de trouver une combinaison des corps élémentaires qui put satisfaire au rôle du carbone et à celui des quatre terres alcalines, la chaux, la magnésie, la baryte, la strontiane. Quelle que soit la provenance du carbone qui entre aujourd'hui dans la composition des carbonates, il est certain qu'il n'a pu, par suite de l'oxidation originnaire, précipiter immédiatement ces quatre bases, puisqu'il n'en existe aucune trace dans la masse ordinaire des granits ¹. Il faut donc supposer ces bases originnairement dissoutes, et la difficulté est d'imaginer à quel état elles l'ont pu être. Si on les supposait à l'état de chlorures, il y aurait lieu de se demander ce qu'est devenu aujourd'hui le chlore primitivement combiné ; et d'autre

¹ Le syénite, il est vrai, contient de la chaux et de la magnésie et cette dernière base entre encore dans quelques micas ; mais ces exceptions pourront être expliquées lorsque nous parlerons du phénomène igné en général.

part il y aurait lieu de se demander aussi d'où provient tout le carbone enfoui dans le sol avec les calcaires : cette double nécessité porte donc à penser que les bases dont nous parlons se sont trouvées, après l'oxidation, dissoutes sous forme de composés carbonés ¹.

Ainsi il est nécessaire de trouver un composé de cette nature qui satisfasse à cette double condition, premièrement d'être soluble, en second lieu d'avoir pu être produit par la chaleur et d'être stable sous son influence.

Après quelques recherches, c'est à la classe des cyanures que mes idées se sont arrêtées, et c'est là, je pense, une solution non seulement heureuse de la question, mais une solution d'une grande importance, car elle aura, comme nous l'indiquerons bientôt, une influence décisive dans la théorie des phénomènes ignés au tems actuel. Les cyanures alcalins comme on le sait, se produisent facilement et spontanément par la voie ignée, et ils sont stables sous l'action d'une forte chaleur ; il y a grande probabilité qu'il en serait de même des cyanures de calcium, magnésium, barium, si on les avait obtenus secs et hors des atteintes de l'oxygène : mais ne les ayant formés encore que par voie humide, l'évaporation de l'eau les décompose. Tous sont solubles.

Ainsi les cyanures réalisent pour nous ces deux propriétés si remarquables par leur réunion et si essentielles ici, de la stabilité au feu et de l'affinité pour l'eau. Il sera donc bien facilement admissible qu'ils aient pu entrer dans la composition première de notre planète et que l'effet de l'eau formée, comme nous l'avons vu, par la combustion, ait été tout d'abord de les dissoudre. Une fois en dissolution, ces corps il est vrai se décomposent, mais assez lentement pour que le dépôt de la

¹ On pourrait penser qu'une partie au moins des calcaires a pu être dissoute dans les premières eaux à la faveur de l'acide carbonique, beaucoup plus abondant alors qu'aujourd'hui, mais il est facile de voir combien ce moyen serait insuffisant pour expliquer l'absence de la chaux dans les granits, si l'on pense que l'eau saturée d'acide carbonique ne dissout que le 400^e de son poids de carbonate de chaux, tandis que la masse des calcaires forme peut-être le 10^e de celle des eaux, comme nous le verrons ci-après.

matière granitique ait pu se former auparavant au fond des eaux, et de manière sans doute à ce que sa partie supérieure seule ait pu être mélangée de chaux et de magnésie, ce qui, pour le dire en passant, pourrait être l'origine de quelques masses syénitiques ou amphiboliques.

Maintenant la décomposition même des cyanures nous donne aussi de bien remarquables et bien satisfaisants résultats : on sait qu'ils se résolvent en carbonates avec dégagement d'azote; ils rendraient donc ainsi raison non seulement de la formation des calcaires, mais encore d'une partie de l'azote atmosphérique. Mais avant d'aller plus loin, et pour ne laisser en arrière aucune difficulté, il est bon de s'assurer que la relation de quantité qui existe à la surface du globe entre ces deux corps, l'azote et le carbonate de chaux, n'est pas incompatible avec notre hypothèse des cyanures.

On serait tenté de penser à première vue que la quantité des calcaires répandus à la surface du globe est trop considérable pour dériver de la même origine que l'azote de l'atmosphère; mais si l'on se reporte à ce que nous avons dit au chapitre 1^{er} sur le mode de formation actuel de ces roches sédimentaires, on se convaincra facilement qu'il n'en est point ainsi. Il faut se rappeler en effet que les calcaires ont dû se déposer peu à peu autour des continents et des îles à mesure qu'elles étaient soulevées hors des eaux, de sorte que la puissance des calcaires continentaux est bien loin d'être égalée par celle des calcaires qui peuvent s'étendre sous les eaux profondes, et il faut rappeler aussi que toute la masse répandue sur le globe fournit à la fois à cette accumulation locale; ainsi lorsque l'on essaie de répartir en épaisseur uniforme sur les continents la quantité de calcaire qui peut s'y trouver dispersée, on doit en trouver une hauteur triple sans doute de celle qui a dû être déposée primitivement sur toute la périphérie du globe après le dépôt du granit. Or je ne pense pas être au-dessous de la vérité si, tenant compte de l'espace qu'occupent sur le globe les terrains primitifs d'une part, de l'autre les dépôts schisteux et arénacés, j'admets que les calcaires ne couvrent pas plus du cinquième de la surface des continents d'une épaisseur

moyenne de 500 m; ou en d'autres termes qu'ils ne la couvriraient pas toute entière d'une hauteur de 100 m de calcaire pur. Cela porterait à 30 ou 40 m peut-être la hauteur du dépôt de calcaire primitif sur tout le globe, et cette évaluation est peut-être même exagérée. Mais soient si l'on veut 100 m, ce serait un poids de 2800 k. par mètre carré de surface : le carbone y entre pour 330 k.; voyons à quelle quantité d'azote ce carbone répondrait. Dans les cyanures le carbone est à l'azote dans le rapport de 75 à 88, d'où l'on déduit que l'azote correspondant par mètre carré à la quantité des calcaires n'est pas de 400 k. Or nous avons vu qu'il y avait dans l'atmosphère près de 8000 k. d'azote par mètre carré de surface terrestre, en supposant du moins que le mélange avec l'oxygène se soutienne à de grandes hauteurs; y eut-il même une forte diminution à faire par cette raison, la disproportion serait toujours énorme; de sorte que l'azote de l'atmosphère est suffisant pour répondre non seulement à tous les cyanures de calcium, magnésium, potassium et sodium qui auraient pu exister, mais encore à une très grande quantité de sels ammoniacaux et peut-être enfin à du cyanogène libre.

La considération des cyanures, si utile par elle-même, est féconde aussi par d'autres conséquences. La combustion du soufre semble en effet présenter à notre théorie des difficultés plus graves encore que celle du carbone en présence des bases, car la formation simultanée de la baryte avec celle d'un des acides oxygénés du soufre sous l'influence de l'eau aurait dû la précipiter immédiatement en sulfate, tandis que cette base est absolument étrangère à la composition du granit; les produits que l'on peut supposer formés par l'hydrogène sulfuré, tels que les sulfures métalliques, sont aussi assez rares dans le granit massif: il faut donc qu'à l'origine le soufre n'ait pu se combiner ni avec l'oxygène ni avec l'hydrogène, et que, comme le carbone des carbonates actuels, il soit demeuré d'abord dissous. C'est encore par les cyanures que nous parviendrons à ce résultat. On sait en effet que ces composés s'unissent au soufre de manière à former une sorte de sels que l'on a nommés sulfo-cyanures; ceux des alcalis et des ter-

res alcalines sont *solubles* comme les cyanures simples. Rien n'empêche donc de supposer que des sulfo-cyanures aient pu exister à l'origine et demeurer dissous pendant le dépôt de la matière des granits, la décomposition de l'eau y développant d'ailleurs progressivement des hydrosulfates et formant par suite des sulfures métalliques insolubles, lesquels après être restés quelque tems en suspension ont pu se précipiter plus tard et fournir ainsi par exemple l'origine des pyrites, si abondantes dans les terrains de sédiment immédiatement supérieurs au granit.

Ainsi l'existence des cyanures, sulfo-cyanures et l'on pourrait ajouter, des chloro-cyanures, répond bien aux faits de première origine, et à la transformation des matériaux de la surface primitive du globe en composés solubles et insolubles, on verra plus loin comment les mêmes combinaisons satisfont aussi aux faits actuels, à ceux qui sous nos yeux mettent en communication avec la surface du globe les matériaux de son intérieur. Maintenant dirons-nous comment, dans ces composés quaternaires de la voie sèche, les quatre minéralisateurs principaux, le chlore, le fluor, le soufre, le cyanogène, ont pu se répartir entre les différents métaux tels que le potassium et le sodium, le silicium et l'aluminium, le calcium, le magnésium, le fer¹ etc. ? Nous ne chercherons pas à aller jusque-là ; il nous paraît suffisant d'avoir montré comment des composés *définis* de la voie sèche ont pu satisfaire aux conditions de notre problème et produire sous l'action de l'eau les combinaisons nouvelles, définies aussi, que nous rencontrons dans l'ensemble des roches. Ce qu'il est essentiel encore de reconnaître c'est que dans la succession des faits que nous avons énoncés en dernier lieu, l'oxygène de l'atmosphère perd pour ainsi dire son pouvoir oxidant immédiat pour le céder à l'eau, et c'est par la décomposition de celle-ci que les différentes transformations des métaux vont s'effectuer : cette considération est im-

¹ Il y a lieu d'observer, comme suite de notre remarque relativement à l'hydrogène, que ceux des corps connus dont le poids d'atome est le plus léger paraissent être les plus abondants à la surface du globe.

portante, parce qu'elle nous conduira directement à l'explication du phénomène des volcans. On devra observer enfin que la silice jouant le rôle d'acide et neutralisant deux des bases, l'alumine et la potasse, il doit se produire aux dépens de l'eau des composés hydrogénés surexcédants pour la saturation. Or dans une réaction de ce genre l'hydrogène devrait tendre à se porter sur ceux des corps non métalliques qui en sont le plus avides, en particulier sur le chlore et le fluor ; mais la combinaison de l'hydrogène avec le chlore ou le fluor ne pouvant demeurer libre en présence des composés du cyanogène et du soufre sans déplacer ces derniers corps, c'est en définitive à la formation d'acide hydrocyanique et d'hydrogène sulfuré que doit aboutir le dégagement d'hydrogène ; et nous retrouverons les conséquences de ce fait lorsque nous traiterons soit de l'origine et de la composition des eaux minérales, soit même du phénomène volcanique.

En résumé telle sera pour nous la composition qu'il est rationnellement possible d'imaginer à la surface primitive du globe terrestre, pour qu'une oxidation instantanée ait pu y développer les différentes combinaisons et les masses distinctes que nous y observons actuellement : une atmosphère d'hydrogène pur, mêlé peut-être d'hydrogène carboné et d'azote ou de cyanogène, aurait entouré un noyau métallifère composé, à la partie extérieure au moins, de cyanures et de leur combinaison avec les chlorures, fluorures et sulfures ; à ce mélange on peut ajouter, s'il en est besoin, des sels ammoniacaux correspondant aux divers acides hydrogénés. Sans supposer même à cette masse une chaleur considérable, l'action de l'oxygène sur quelqu'un des composés des métaux a dû déterminer une incandescence locale, capable de porter la déflagration dans tout le mélange inflammable d'oxygène et d'hydrogène, et de produire ainsi subitement la grande masse des eaux, dont les vapeurs se condensant peu à peu sur le noyau même, ont dû exercer leur action propre sur les matières qui en formaient le revêtement. De là, par la décomposition de l'eau, oxidation des métaux, avec dégagement de carbures et sulfure d'hydrogène ; de là la combinaison de la silice avec l'alumine, la potasse et

le fluor et leur précipitation immédiate, élément futur des granits ; de là la dissolution au contraire du chlorure de sodium, avec la quantité surexcedante des cyanures et sulfo-cyanures, comprenant ceux de calcium et de magnésium, élément futur des calcaires, des dolomies, et des sulfates alcalins de la dissolution marine.

Ainsi tous ces faits s'enchaînent et se lient l'un à l'autre, ils forment un ensemble complet de principes chimiques qui embrasse toute la série des faits originaires¹ ; et nous verrons bientôt comment l'application des mêmes vues s'étend aussi aux faits ultérieurs et comprend les phénomènes ignés de tous les âges. Mais avant d'entrer dans cette étude, arrêtons-nous d'abord un instant sur une première conséquence de ces faits, applicable à l'ensemble du globe et aux sources de sa chaleur générale.

L'idée d'une chaleur originaire et surtout d'une chaleur centrale excessive dans le globe terrestre a paru inadmissible à un certain nombre de physiciens et de chimistes ; MM. Ampère et Poisson en particulier ont fortement soutenu cette opinion, que la terre en se formant avait dû perdre la plus grande partie si ce n'est la totalité de sa chaleur d'origine, et le dernier de ces savants a prouvé par de hautes recherches mathématiques que le tems du refroidissement de la surface, en prenant pour point de départ une température originaire de 3000° étendue jusqu'au centre de la sphère, conduirait à des périodes incalculables, absolument incompatibles avec tout système de géologie. Ce serait donc d'après cela un heureux résultat que de pouvoir attribuer rationnellement à une cause extérieure la température interne dont nous recevons encore maintenant une petite fraction à la surface de la terre. Or dans le système chimique que nous avons exposé une cause considérable de chaleur externe aurait en effet exercé son action sur la surface du globe à l'origine des âges : la combustion instantanée de l'énorme quantité d'hydrogène qui a pu former

¹ Dans tout ceci il n'a point été question des métaux proprement dits, nous réservant de parler de leur rôle lorsque nous traiterons des filons métallifères.

la masse des eaux est une source immense de calorique, qui pénétrant vers l'intérieur du globe, a pu y emmagasiner l'excès de température encore actuellement sensible.

Cette conjecture émise sur l'une des causes de la chaleur interne générale, examinons maintenant comment les faits chimiques que nous avons exposés peuvent être aussi une source de chaleur *locale* et devenir l'origine de ces phénomènes accidentels, qui se révélant encore à nos yeux par la déflagration volcanique, ont donné la première idée d'une haute température intérieure et de son influence sur les grands faits de soulèvement; idée que l'on a toutefois, comme nous l'avons dit, étendue bien au dessus de la portée des faits.

Ces phénomènes calorifiques partiels comprennent trois ordres de résultats : les volcans, les eaux minérales et les filons métallifères. Tous ces faits dérivent selon nous d'un même principe, agissant à des degrés différents, savoir l'action de l'eau sur la masse intérieure inoxidée, dont nous avons donné plus haut la composition générale et les effets originaires. Qu'on suppose les faibles eaux des sources pluviales pénétrant jusqu'à ce noyau métallifère (qui ne paraît pas être en général très éloigné de la surface du sol), et l'on aura les sources minérales et thermales; qu'on suppose la communication de ce noyau combustible avec la mer ou les lacs profonds, et l'on aura les grands phénomènes d'éruption calorifique, les volcans, les roches

On peut admettre avec assez de vraisemblance que l'eau des mers couvrirait la surface entière du globe, supposée aplanie, d'une épaisseur uniforme d'au moins 500 m. Or si l'on prend pour unité calorifique la quantité de chaleur qui peut élever 1 gr. d'eau de 1°, et si l'on admet d'après les expériences de Lavoisier et Laplace que la combustion de 1 gr. d'hydrogène en fournit 23500, la combustion originarie aurait produit par mètre carré de surface terrestre 1.175.000.000.000 de ces calories; ce qui équivaut à la quantité de chaleur produite par la combustion d'environ 1000 mètres cubes de charbon.

Si l'on a égard à ce que nous savons des tems géologiques, il y a là, en tenant compte de la double marche de la chaleur à l'intérieur du globe, un principe de recherches numériques auxquelles je ne puis penser à me livrer au milieu de l'immensité des matériaux que mon sujet embrasse, mais qui laissent entrevoir la possibilité d'une grande précision de résultats.

ignées; quant aux filons métallifères, ils appartiennent selon leur nature à l'un ou l'autre de ces deux effets.

Nous arrivons donc ainsi à la grande idée de Davy, mais nous y arrivons en plaçant cette idée sur la base élevée qui lui convient et en donnant à ses principes chimiques les modifications essentielles qui seules pouvaient la rendre complètement acceptable. Commençons par rattacher à cette théorie le phénomène des sources thermales: il nous fournira comme une introduction nécessaire au phénomène des volcans, dont il n'est pour ainsi dire que le diminutif.

Deux faits chimiques dont l'importance ne paraît pas avoir été assez appréciée, signalent d'une manière caractéristique la composition des eaux minérales: c'est d'une part la présence de la soude, à l'exclusion presque absolue de la potasse; de l'autre la présence constante aussi de l'azote, quelquefois en quantité considérable, soit à l'état de gaz soit à l'état de combinaison hydro-carbonée.

Si l'on réfléchit à ce double caractère, dont l'importance est grande par sa généralité, on verra qu'il relie comme invinciblement le phénomène des eaux minérales aux principes que nous avons établis comme base fondamentale des réactions chimiques originaires, savoir la séparation de la potasse d'avec la soude sous l'action de l'eau, et la présence des cyanures, composé nouveau dont la considération n'était encore entrée dans aucune théorie des faits généraux du globe.

Faisons agir en effet l'eau des sources pluviales sur la masse intérieure composée comme nous l'avons définie, de cyanures, chlorures et sulfures métalliques combinés entr'eux; ne va-t-il pas en résulter les mêmes phénomènes que nous avons indiqués déjà comme ayant dû se passer à l'origine de l'état actuel de la terre? Décomposition de l'eau avec chaleur par les combinaisons siliceuses, aluminéuses, etc.; isolément simultané de la silice, de l'alumine, de la potasse et du fluor par précipitation immédiate, saturation au contraire et dissolution de l'acide hydrochlorique par la soude; par suite dégagement proportionnel ou du moins mise en liberté des combinaisons hydrogénées du soufre et du cyanogène; enfin dissolution des cyanu-

res et sulfures superexcédants : n'est-ce pas là d'un seul trait toute la théorie des eaux minérales ? La présence exclusive de la soude et du chlore, sans le fluor et sans la potasse, le dégagement de l'azote, celui du pétrole ou autres carbures d'hydrogène que présentent un certain nombre de sources, le dépôt du carbonate de chaux et la formation de carbonate de soude et d'acide carbonique libre par l'altération des cyanures et de l'acide hydrocyanique, enfin la présence des sulfures et par suite celle des sulfates : tout s'explique, toute la série des faits se déroule avec une facilité extrême, comme le détail va bientôt le montrer mieux encore.

Notre hypothèse des *cyanures* vient remplir une lacune bien grande dans la théorie de la production des eaux minérales. L'existence des carbonates à la partie interne du globe et au dessous du niveau des roches ignées serait certainement un des points de théorie les plus difficiles à concevoir ; et cependant lorsque l'on voit sortir du granit des eaux fortement chargées de carbonate de soude, il ne reste guère d'autre alternative si l'on n'admet point nos idées. L'influence même des terrains calcaires ne peut d'ailleurs donner ici aucun résultat, car rien ne saurait faire concevoir comment sous l'action de l'eau l'acide carbonique peut se porter de la chaux sur la soude ; ainsi il faut bien ou admettre l'existence des carbonates de soude et de chaux tout formés à l'intérieur du globe, ce qui répugne, je le répète, à toutes nos idées de chaleur interne et semble en opposition avec la nature du granit qui ne contient que de la potasse ; ou bien il faut admettre que le carbone fait partie d'une combinaison non oxidée, et quelle autre combinaison concorde mieux que les cyanures avec un état igné intérieur ? Nous irons enfin plus loin encore, et la composition même du cyanogène va nous servir à expliquer une des particularités les plus curieuses des eaux minérales, savoir la propriété qu'elles ont de contenir de l'acide carbonique libre, ou des *bicarbonates*. L'atome de cyanogène renfermant en effet deux atomes de carbone pour un atome d'azote, et l'acide hydrocyanique contenant aussi ces deux atomes de carbone combinés à un seul atome d'hydrogène, il est évident que le cyanure de sodium par exemple doit produire,

par l'oxidation, du *bicarbonate* de soude et non point du carbonate neutre. Les chimistes apprécieront, je pense, la valeur de ce résultat.

Quel est maintenant l'agent de cette oxidation des cyanures et des sulfures dans le sein de la terre, et pourquoi ne trouve-t-on plus de traces des premiers dans les eaux minérales à leur émergence du sol? Nul doute pour moi que cette transformation n'ait lieu dans les profondeurs même, au moyen de l'oxygène de l'air qui est entraîné en dissolution par l'eau des sources. Il y a cependant bien loin de ma pensée à cette supposition, que l'air contenu dans la seule quantité d'eau qui est minéralisée a pu suffire pour l'oxidation des sulfates, des carbonates et de l'acide carbonique libre qu'elle renferme; ce serait une supposition déraisonnable, car la quantité d'air dissoute est beaucoup trop faible pour cette saturation; mais voici ce que l'on peut imaginer sur ce sujet. Lorsque l'eau des sources, celle des montagnes en particulier, pénètre à une assez grande profondeur au-dessous de la surface du sol, lorsque surtout elle s'approche d'un foyer d'action chimique, l'augmentation de sa température tend à rendre libre une portion de l'air qu'elle contenait: les cavités intérieures qui se rencontrent au-dessus de son cours souterrain doivent donc se remplir d'oxygène, ainsi que la courbure supérieure des syphons naturels dont elle suit les sinuosités. Maintenant dans ces cavités intérieures remplies d'air fortement oxygéné, la vapeur d'eau produite par la haute température ou bien l'eau de quelque source partielle, pourront aussi s'introduire, et si les parois d'une de ces grottes sont, au moins en partie, formées par la matière métallifère que nous pourrions nommer *matière primitive du globe*, voici alors ce qui pourra se produire par suite de l'action de cette eau et de sa décomposition. Les gaz hydrogénés, que la combinaison de la silice avec l'alumine et la potasse doivent comme nous l'avons vu mettre en liberté, iront brûler au contact de cet air (je dis brûler, parce qu'il est probable que la vapeur d'eau attaquant la voûte doit y produire une élévation locale de température propre à déterminer la combustion, l'inflammation). Or quels seront les pro-

duits de cette oxidation des gaz ? De l'eau, de l'azote et de l'acide carbonique, si c'est l'acide hydrocyanique qui est brûlé; de l'eau, de l'acide sulfureux et sulfurique, quelquefois du soufre, si c'est l'hydrogène sulfuré. De là d'abord formation évidente de sulfates, mais formation de carbonates aussi, car l'acide carbonique est assez fort pour déplacer l'acide hydrocyanique des cyanures en dissolution, et ainsi doit se produire un cercle indéfini de décompositions à la surface de l'eau, à mesure que les cyanures s'y dissolvent, décomposition dont l'effet est de charger l'eau de bicarbonates alcalins et calcaires.

Lorsque les cavités où l'eau exerce son action chimique ne sont pas aérées, les gaz hydrogénés doivent au contraire s'élever librement vers la voûte et agir seulement par leur ressort sur la surface de l'eau, à moins qu'un orifice supérieur ne leur soit ouvert; il ne se forme alors dans l'eau elle-même ni carbonates ni sulfates, c'est le cas des eaux simplement sulfureuses. Dans cette circonstance c'est l'acide hydrogéné le plus faible, l'acide hydrocyanique, qui doit être complètement mis en liberté, ce qui explique d'abord l'absence ordinaire des composés carbonés dans les eaux minérales sulfureuses¹; d'autre part l'acide hydrocyanique se décomposant spontanément, peut produire, sous l'action d'une température plus ou moins forte, de l'azote, des carbures d'hydrogène fortement carbonés, peut-être de l'hydrogène libre, et enfin du charbon même ou plutôt du bitume. Les gaz produits de cette décomposition seront, comme je l'ai dit, généralement retenus à la partie supérieure des grottes ou des syphons; quant aux carbures susceptibles de se liquéfier par la pression, ils devront être entraînés avec l'eau, et de là ces sources de naphte, de pétrole, d'hydrogène carboné et de bitume, dont l'origine est si peu expliquée, et qui par l'abondance de leurs produits et la continuité de leur durée depuis les tems les plus reculés, attestent qu'elles proviennent d'une matière pour ainsi dire inépuisable et par conséquent intérieure, étrangère à tous les dépôts

¹ Si ce n'est ceux qui y apparaissent sous forme huileuse ou gélatineuse, comme aux eaux de Saint-Sauveur, Barèges, etc.

superficiels. On conçoit au reste combien le degré de température dû à la réaction chimique, combien aussi la disposition des cavités intérieures et des eaux qui les traversent doivent apporter de variations locales dans ces effets; il suffit d'en avoir indiqué le principe général.

Les considérations précédentes expliquent suffisamment pourquoi les carbonates sont toujours réunis aux sulfates dans les eaux minérales et non pas aux sulfures: c'est que comme les sulfates ils sont un produit d'oxidation, ce qu'aucune théorie n'avait encore ni expliqué ni supposé même. On concevra enfin bien facilement, d'après nos idées, comment les eaux minérales, carbonatées ou sulfureuses, sont toujours plus ou moins rapprochées d'un massif granitique, le granit devant se trouver immédiatement superposé à la matière primitive non oxidée.

Telle est en résumé pour nous la théorie des eaux minérales; nous la croyons ainsi complète, ou du moins complètement renfermée dans les principes que nous avons donnés si quelques-uns de ses détails ont échappé à notre analyse. Elle dérive toute entière de l'action de l'eau des sources, avec ou sans la présence de l'oxygène, sur la masse intérieure superficiellement composée d'une combinaison de chlorures, fluorures, sulfures, cyanures... Cette théorie va nous conduire maintenant à celle des volcans, qui sont produits par l'action des eaux profondes, celles de la mer ou des grands lacs, sur les mêmes composés. La différence des effets réside ici surtout dans la différence des masses, ajoutons encore dans l'absence presque constante d'oxygène libre au siège même de l'action volcanique.

Avant toute chose il paraîtra sans doute nécessaire que j'indique comment concevoir que l'eau des mers puisse en réalité pénétrer jusqu'au noyau primitif, inférieur au granit et à tous les sédiments; c'est déjà en effet une condition du problème qu'on ne peut regarder comme satisfaite par elle-même et à priori... Nous trouverons son explication dans les principes que nous avons établis au chapitre VI, d'après l'hypothèse des changements dans la rotation de la terre. On a vu¹ qu'une

¹ Pages 138—160.

des conséquences de ces cataclysmes était d'ouvrir une grande partie des fractures transversales à la direction de l'équateur, et il devrait en résulter ainsi un passage subitement ouvert à la pénétration des eaux marines. Cependant en y réfléchissant plus attentivement, on demeure convaincu que cette cause ne saurait être ni suffisante ni même principale : d'après la disposition d'ensemble que nous avons reconnue aux failles qui constituent chaque ligne de vallée, il est évident que le terrain qu'elles découpent doit former une somme de prismes disposés comme des coins contigus, et que dans l'écartement général tous ces prismes doivent descendre par leur pesanteur et fermer ainsi en grande partie le vide formé entre eux, tout l'effet se bornant ainsi dans la plupart des cas à un approfondissement de la vallée. Les orifices de pénétration ouverts de cette sorte à l'eau des mers doivent donc être rares et étroits.

Mais notre théorie de la formation des vallées linéaires par effondrement, et la raison que nous venons de donner immédiatement de leur approfondissement périodique, fournissent une cause infiniment plus puissante à l'action de l'eau des mers sur la matière intérieure. Si en effet, comme cela est une suite nécessaire de nos idées, cette matière primitive est à une petite profondeur au-dessous de la superficie des masses de granit, le foncement d'un certain nombre de vallées granitiques ne devra-t-il pas mettre à nu de vastes tranchées dans le noyau oxidable, et fournir ainsi à l'action des eaux un immense moyen de développement ? Cette considération est extrêmement heureuse en géologie, car elle nous expliquerait bien facilement ces grandes sources de chaleur instantanée dont on retrouve tant de traces sur toute la surface des continents dans la transformation des calcaires en marbre, dans celle du sédiment chimique primitif en granit, des premiers dépôts mécaniques en gneiss et en micaschiste, enfin dans toutes les roches ignées qui entourent les massifs granitiques. Et l'on conçoit aussi combien aux premières époques ces phénomènes ont dû être plus largement développés, alors que la masse inerte des sédiments n'avait qu'une très faible épaisseur. Nous reviendrons du reste sur ces faits en parlant du granit et de son influence sur les

terrains ; contentons-nous d'abord d'appliquer cette donnée aux causes du phénomène volcanique tel qu'on l'observe de nos jours, faisant seulement remarquer, comme conséquence générale, que les grands alignements des volcans et de leurs îles ressortent tout naturellement de ces principes, comme l'alignement des massifs de granit dans les montagnes anciennes : tout se lie, tout s'enchaîne en effet dans ce merveilleux ensemble des révolutions physiques et des révolutions chimiques de la surface terrestre.

Il y a deux circonstances principales à considérer dans les volcans : la composition chimique de leurs produits d'une part et de l'autre leurs effets physiques, ceux de chaleur, d'éruption et de soulèvement, ce dernier principalement intéressant pour la géologie. Nous en parlerons successivement.

Lorsque l'on examine au point de vue de la chimie philosophique la composition générale des produits qui émanent des volcans soit à l'état de laves, soit à l'état gazeux, on ne saurait éviter d'être frappé d'un ensemble de résultats fort curieux ; lorsqu'on vient à les comparer à la composition des roches primitives. N'est-ce pas un fait remarquable que la présence normale, et souvent exclusive, de la chaux, de la magnésie, de la soude et de l'oxide de fer dans les laves des volcans, tandis que ces éléments sont complètement étrangers à la roche ignée primitive, le granit ? Les laves de l'Etna et du Vésuve sont formées en grande partie de labrador, feldspath à base de chaux et de soude ; celles des Andes sont caractérisées par l'albite, feldspath à base de soude, le pyroxène, qui forme avec le labrador l'élément essentiel des basaltes et de la plupart des laves, n'est à proprement parler qu'un silicate de chaux, de magnésie et d'oxide de fer ; le feldspath vitreux des trachytes contient aussi une forte proportion de soude ; enfin dans les zéolites (qui forment un accident si remarquable dans certains basaltes et partie essentielle des phonolites), la chaux et la soude jouent le premier rôle. Quant aux expirations gazeuses des volcans, savoir l'acide hydrochlorique, l'acide carbonique et l'hydrogène sulfuré, tous ces corps, comme les bases dont nous venons de parler, sont éminemment étrangers aux roches

que l'on nomme primitives, tandis que leur rapport est évident avec les sédiments ultérieurs : ainsi la distinction originare que nous avons signalée entre les roches granitoides et tous les autres produits des eaux existe encore entre elles et l'afflux des volcans. Le rôle de l'eau dans le phénomène volcanique tire donc encore de là un genre particulier d'évidence. On peut concevoir ce rôle de l'eau de deux manières, ou par l'influence de la chaleur intérieure sur les divers produits des eaux, hypothèse dont le germe réside dans la théorie de Hutton ; ou bien par l'action directe de l'eau sur un noyau intérieur oxidable, selon la belle idée dont la première conception est due à Davy. Pour nous, sans rejeter toute idée relative à l'altération des sédiments, comme on le verra clairement par la suite, nous rapportons cependant la formation des lavés à un phénomène distinct, et nous voyons dans l'action des eaux la source de toute chaleur considérable à la surface du sol. Nous ne pensons pas en effet que les lois physiques puissent permettre à la chaleur générale de l'intérieur du globe de pénétrer ainsi avec une énergie locale et intermittente à sa surface ; et indépendamment de toute considération théorique, le fait de la disposition des volcans le long des côtes de la mer, malgré les rares exceptions, et je crois facilement explicables, que l'on y signale, ce fait restera toujours comme un argument matériel inébranlable contre tout système qui ne ferait pas intervenir l'influence des eaux comme agent principal dans le phénomène.

Il n'est pas nécessaire de supposer, comme le faisait Davy, la masse intérieure absolument métallique, pour qu'il puisse en résulter une déflagration considérable par la décomposition de l'eau. Que l'action de l'eau sur des composés du silicium, de l'aluminium, du potassium etc., tels que nous les avons définis, soit capable de produire une chaleur extrêmement intense quand elle agit par grandes masses, c'est un fait qu'on ne saurait révoquer en doute. Il s'agit de reconnaître seulement si les produits pourront en être identiques avec ceux que nous offrent les volcans. Or la question est ici complexe, et elle se mêle aux causes physiques de l'éruption de telle sorte qu'on ne saurait traiter complètement l'une sans l'autre.

Hutton avait supposé que les différentes roches plutoniques dérivait directement du foyer général de chaleur pour être violemment injectées entre les strates des terrains ; à son exemple les plutonistes plus modernes ont généralement fait dériver d'un laboratoire commun toutes les roches placées hors des conditions normales de la stratification. Or nous avons vu déjà, en parlant du granit, combien il y avait peu de probabilité à ce que des roches si régulièrement diverses pussent dériver d'une fusion commune ; mais il y a encore des raisons physiques qui restreignent puissamment la possibilité de semblables éruptions. Si l'on suppose en effet qu'il existe un bain en ignition au-dessous de la croûte solidifiée du globe, il ne saurait être qu'à une distance notable de la surface habitée, à 20 lieues peut-être, si l'on calcule sur la température nécessaire à la fusion de toutes les laves. Or je ne sais si l'on a jamais assez sérieusement réfléchi à l'énormité de la puissance nécessaire pour soutenir et pousser dans les cheminées volcaniques une pareille hauteur liquide. J'écarte en effet le principe systématique tiré de la contraction de l'enveloppe terrestre : bien qu'il soit appuyé abstractivement sur des données justes et ingénieuses, cette contraction est réellement trop peu sensible, d'après l'immense atténuation du refroidissement général, pour donner lieu à une exsudation du liquide intérieur, et l'intermittence des éruptions, dans les volcans même actifs, nous paraît être contre ce système un argument sans réponse. C'est donc dans le liquide lui-même que doit résider la puissance qui le soulève jusqu'à la surface du sol ; mais la force de gravitation retient toutes les molécules d'un fluide dans les limites d'une surface régulière, lorsqu'elles sont, comme dans le liquide interne, à l'abri d'une perturbation extérieure : ainsi l'eau de la mer, sans l'influence des vents ou l'action attractive de la lune, ne tend pas à s'élever par elle-même au-dessus de son niveau général. Il ne resterait donc que l'action chimique qui pût être regardée comme le principe de soulèvement si nécessaire, et l'on est amené ainsi à voir dans les gaz ou dans d'intermittentes dilatations, résultats de l'augmentation locale de température, l'élément de cette puissance soulevante. Mais

dans la supposition où cette puissance résiderait dans le liquide central il faudrait imaginer que depuis l'immense série des siècles ce liquide n'est pas parvenu encore à un état chimique permanent, ce qui n'est réellement point admissible; et quant aux gaz en particulier, comment penser qu'ils peuvent supporter et chasser devant eux une colonne liquide aussi énorme, équivalente peut-être au poids de 30.000 atmosphères, tandis qu'à la surface du sol, et il est vrai à nos températures habituelles, l'acide hydrochlorique devient liquide sous une pression de 40 atmosphères, l'hydrogène sulfuré sous celle de 17?

Les mêmes difficultés n'existent pas dans notre hypothèse d'une action des eaux superficielles, et la profondeur où s'exerce l'action chimique n'y est pas assez grande pour pouvoir annuler la puissance d'expansion des corps gazeux, ni rendre insensible la dilatation calorifique par la grandeur de l'espace à parcourir. Mais il existe une autre difficulté, c'est de savoir comment les gaz, qui se dégagent à l'ordinaire librement par l'orifice volcanique et se portent dès leur origine à la partie supérieure des liquides, peuvent par intervalle les pousser instantanément avec une aussi grande énergie. L'action seule de l'eau, éminemment progressive, éminemment perméable aux gaz, paraît donc laisser ici une lacune. La remarquable continuité du dégagement gazeux pendant et après l'éruption, dans la masse débordée elle-même, n'a point d'ailleurs ainsi d'explication satisfaisante. Aussi ai-je conçu qu'il existait dans ce phénomène de l'éruption lavique quelque chose de spécial, qu'il devait son énergie à une action particulière, et j'ai songé à demander à la chimie si l'on ne pouvait faire dériver du fait même de la formation des laves le gaz dont la force expansive doit les rejeter au dehors. C'est là en effet que j'ai cru rencontrer la véritable cause des éruptions instantanées et puissantes.

Concevons comme exemple qu'une chaleur suffisamment intense soit appliquée à un mélange d'argile humide et de sel marin : la tendance à la fusion devra porter la soude à se combiner avec la silice et l'alumine, laissant dégager à l'état libre le gaz hydrochlorique; il en sera de même du mélange de la

silice avec un carbonate ou un hydrosulfate. Si maintenant ce phénomène d'élimination s'effectue dans le sein de la terre sous une certaine pression, le gaz s'accumulant peu à peu finira par acquérir une force élastique assez grande pour rompre les obstacles qui l'emprisonnent, les soulever ou les projeter au dehors.

C'est dans une cause semblable que résiderait suivant nos idées le principe des éruptions volcaniques instantanées. Il est facile en effet de reconnaître que des phénomènes de ce genre doivent être les conséquences nécessaires des réactions chimiques que nous avons analysées en traitant des eaux minérales, lorsque la grandeur des masses agissantes porte jusqu'à une certaine limite l'intensité de la chaleur. L'eau de la mer ne doit plus agir aujourd'hui sur le noyau métallifère que par pénétration dans des cavités intérieures, ou du moins elle ne saurait arriver jusqu'à lui que par ces cavités : là le poids de la grande masse des eaux, agissant sur une base considérable, doit interdire aux gaz formés le retour par la même voie, et ils doivent tendre, avec la vapeur d'eau, à s'infiltrer dans les fissures du sol et à s'y frayer un chemin. Cependant nous avons vu, en traitant de l'origine des eaux minérales, que l'action chimique de l'eau sur la matière primitive ne devait produire qu'une médiocre quantité de gaz, et pour ainsi dire aucune proportion d'un des gaz volcaniques les plus abondants, l'acide hydrochlorique, puisque d'après l'énergie de cet acide tous les chlorures doivent se maintenir en dissolution et sont stables sous l'action de la chaleur. Ce qui doit se produire à l'ordinaire, comme nous l'avons vu, est un dépôt silicaté avec alumine et potasse, des chlorures et sulfures en dissolution, ou bien, s'il y a présence de l'air, des bicarbonates et des sulfates; et les seuls gaz dégagés pourraient être de l'azote, de l'hydrogène carboné, peut-être de l'hydrogène sulfuré et de l'acide carbonique; point de chlore. Mais supposons que par l'agrandissement subit d'une cavité ou par la pénétration de l'eau vers une partie nouvelle du noyau métallifère, l'action chimique se trouve subitement développée dans une proportion plus considérable : l'expansion de la vapeur d'eau et des gaz s'exerçant alors de toutes

parts, avec l'énergie locale que lui donne comme on sait l'instantanéité, pourra refouler la masse des eaux, tout en exerçant son effort sur les roches solides ou liquides encaissantes, et isoler ainsi momentanément un certain espace du contact direct de la mer. L'eau vaporisée doit abandonner dans ce cas les matières qu'elle tenait en dissolution, composées de chlorures, sulfures, cyanures, et quelquefois de carbonates et sulfates; le dépôt argileux, longuement formé au fond des cavités à la manière de l'élément des granits, va donc se trouver en contact avec ces corps sous l'influence d'une haute température, et par conséquent se combinant avec leurs bases, il formera ces silicates fusibles que l'on nomme les laves, violemment poussées au dehors par la force expansive des gaz qu'élimine leur formation même, savoir les composés hydrogénés du chlore, du soufre, du cyanogène, et selon les cas l'acide carbonique des carbonates. Les matériaux du noyau intérieur lui-même, naturellement fusibles, volatils même, doivent s'y mêler d'ailleurs et parvenir, combinés ou non, à la surface du sol, où ils se transforment par la combustion; et de là suivant toute probabilité la cause de cette énorme durée de la chaleur des laves et du dégagement des gaz qui s'y produit. A la sortie d'ailleurs de l'orifice volcanique, les gaz combustibles, c'est-à-dire les composés hydrogénés du soufre et du cyanogène doivent brûler en produisant de l'eau, de l'acide carbonique, de l'azote, de l'acide sulfureux et quelquefois du soufre pur : de là les flammes des volcans, de là les sublimations sulfureuses des solfatares et l'acide carbonique de leurs grottes.

N'y a-t-il point là, dans ce rapide exposé, toutes les circonstances capitales de l'éruption volcanique au point de vue de la nature chimique de ses produits? On remarquera sans doute combien la considération nouvelle des cyanures donne de force et de précision à ce système, car l'acide carbonique des volcans n'avait pas encore reçu d'explication, et certes on ne pouvait penser qu'il provint de la décomposition des calcaires, puisque c'est sur les massifs granitiques que sont entés pour la plus grande partie les cônes volcaniques à éruption.

La nature des produits scoriaqués des volcans mérite toutefois

d'autres réflexions encore, car ses distinctions sont importantes, et si cette nature est variable elle l'est régulièrement et suivant une sorte de loi. Deux produits principaux se distinguent parmi la masse des laves, ce sont les *trachytes* et les *basaltes*; on pourrait y ajouter ce que l'on nomme les laves modernes, mais qui se rapprochent beaucoup de la nature du basalte, tandis que le trachyte s'en distingue notablement par la nature des composés élémentaires, en particulier par l'abondance de la silice, celle de la potasse et l'absence générale du fer. Les trachytes et les laves basaltiques me paraissent en effet deux produits tout-à-fait distincts d'un même phénomène, et il existe entr'eux quelque chose qui approche de la distinction que nous avons établie entre le granit et les autres produits de l'action des eaux.

Si en effet pendant une longue période de tems l'action chimique des eaux s'est exercée dans de vastes cavités souterraines ou sur les côtes de la mer, le fond sur lequel s'étendait cette eau a dû se couvrir d'un dépôt formé en grande partie, comme celui du granit, de silicate d'alumine et de potasse, ainsi que de fluosilicate, mais mêlé avec des produits sodiques et calcaires à cause des évaporations fréquentes que la chaleur amène et qui doivent précipiter par intervalles quelques unes des matières en dissolution. Cette masse de sédiment chimique, qui peut s'accumuler pendant des tems immenses, deviendra donc une sorte de *granit volcanique*, que l'influence d'une vaste et énergique chaleur doit transformer comme lui en matière fondue, principalement en feldspath à base de potasse et de soude, avec amphibole et mica ¹ lorsqu'il s'y mêlera des composés de chaux ou de magnésie, et enfin quelquefois avec quartz libre.

La source de chaleur dont je parle est, on le pressent bien, ce creusement ou cet approfondissement subit des vallées à chaque révolution du globe, lesquels doivent soumettre instantanément à l'action des eaux de vastes portions de son noyau intérieur.

¹ Nous verrons plus loin que l'absence générale du mica ou du composé fluoré dans les trachytes tient au mode de soulèvement même.

Nous reviendrons sur les conséquences de ce fait en parlant du granit et de son soulèvement.

Quant au basalte, quoique sa formation doive se rattacher aussi en définitive à ce phénomène instantané du creusement des vallées, les circonstances de sa production sont tout autres; il ne provient plus comme le trachyte d'un dépôt insoluble longtemps accumulé, il provient de l'action immédiate des eaux et par conséquent de la scorification des matières solubles, ou du moins de tous les éléments ensemble, ainsi que nous l'avons exposé en parlant de l'éruption actuelle. De là la différence de nature chimique; dans l'un l'abondance de la silice, de l'alumine et de la potasse, dans l'autre celle de la chaux, de la soude et de la magnésie; le trachyte ne contient en effet que des *trisilicates*, le basalte au contraire est formé en grande proportion de *bisilicate*, par le pyroxène, et même de silicate simple par le péridot; la soude, la chaux, la magnésie sont dominantes dans les éléments du basalte¹ (pyroxène et labrador), tandis que les trachytes en sont généralement dépourvus.

Le dépôt primitif de ces dernières roches peut d'ailleurs se produire non-seulement par le phénomène volcanique même, mais encore par l'action longtemps continuée des eaux minérales, c'est pourquoi il paraît si souvent former la base des massifs volcaniques à éruption; néanmoins à chaque grande révolution géologique qui détermine le creusement ou l'approfondissement des vallées dans les régions volcaniques, une vaste production de lave scoriacée analogue au basalte est rendue comme inévitable par la subite action des eaux sur les parties internes mises à nu: de là suivant toute apparence ces grandes nappes basaltiques, qui vont s'étendant au loin et

¹ La présence, au milieu du basalte, de vacuoles amygdaloïdes en partie remplies soit par des zéolites, (silicates *aquifères* d'alumine, de chaux et de soude), soit par du carbonate de chaux, desient facile à concevoir dans la théorie que je donne de la formation de cette roche; tandis que ce fait doit être regardé comme incompréhensible encore dans la théorie exclusivement ignée. On peut dire d'ailleurs avec assurance que le remplissage des vacuoles scoriacées *postérieurement* à la formation des laves est un fait impossible, et ne saurait être donné comme explication.

de niveau, comme si elles eussent appartenu à un vaste lac incandescent. C'est alors aussi le moment de l'élevation des grandes masses de trachytes, comme nous le dirons bientôt.

Quant aux laves modernes, elles ne sont que la continuation, sur une moindre échelle, des phénomènes qui ont donné lieu au basalte; et il est évident d'ailleurs que bien que les grandes masses de trachytes, tels que ceux des Andes par exemple, et probablement aussi les grandes nappes de basalte, me paraissent avoir surgi spécialement aux époques des cataclysmes géologiques, les déflagrations intérieures et intermittentes peuvent de nos jours ramener des coulées qui se rapprochent alternativement de la nature du trachyte et du basalte, ce phénomène étant soumis à une infinité de variations accidentelles ou locales, dont une théorie générale ne saurait tenir compte.

Les considérations qui précèdent et surtout l'assimilation de l'origine des trachytes à celle des véritables granits, nous conduisent directement à la question du *soulèvement* des volcans. On a beaucoup discuté dans ces derniers tems sur la question de savoir s'il y avait eu soulèvement dans les cratères volcaniques, ou bien une simple accumulation de laves épanchées. Ce qui a contribué à obscurcir cette question, c'est qu'elle est en réalité plus complexe que ne le comportent les termes où on l'a posée. S'agit-il de savoir si la force de l'éruption lavique actuelle est en effet capable de soulever du sein de la terre ces vastes ballons trachytiques qui forment la masse des Andes ou de Ténériffe; s'agit-il de savoir si par une simple éruption telle que celles qui se préparent actuellement dans les laboratoires souterrains, la cime de l'Ethna s'est élancée d'un seul jet à 10.000 pieds au-dessus du niveau des eaux? Je dis qu'alors il y a doute en effet, car rien de nos jours n'est apparu de comparable; rien ne peut même, disons-le, donner idée de semblables effets. Mais lorsqu'on se demande seulement si ces masses ont été réellement soulevées, ou si elles ne sont qu'une accumulation de laves épanchées par un orifice et se stratifiant sur des pentes de plus en plus inclinées, cette question je ne la comprends plus. Pour qui a vu seulement le Vésuve et les escarpements circulaires de la Somma où se

dressent, en convergence vers le centre, d'épaisses couches laviques *inclinées de plus de 30°*, comment nier la nécessité d'un soulèvement? Soutienne qui voudra que des laves liquides ont pu s'arrêter sur de pareilles pentes et former ainsi des couches régulières; soutienne qui voudra que le tuf ponceux coquiller qui entoure les pentes du Vésuve à 1900 pieds au-dessus du niveau de la mer, n'a pas été soulevé hors des eaux; soutienne qui voudra que l'Ethna n'est qu'une accumulation de coulées, lorsque depuis deux mille ans les éruptions si fréquentes n'en ont point d'une manière permanente élevé la sommité principale; que l'on conteste enfin le gonflement subit du monte Nuovo près de Naples, du Jorullo au Mexique : pour moi cette question est résolue, elle l'est par les faits, par l'évidence¹.

A mes yeux chaque volcan, pris à la proportion des grandeurs terrestres, représente une bulle, une boursouffure, comme elle serait produite par le dégagement d'un gaz à travers une enveloppe amollie; quant au cratère, il n'est que l'affaissement de cette bulle demeurée vide, non pas son déchirement, car les traces de déchirement n'existent point dans le contour continu de ces vastes coupes volcaniques. Je crois donc qu'en réalité la puissance soulevante est la force du gaz, favorisée par le rammollissement dû à la chaleur. Mais les vraies causes de ces grands effets, dans ce qu'ils ont de plus puissamment développés, les connaît-on? Les a-t-on déjà signalées? Je ne le pense point.

Tout en admettant en effet le principe de soulèvement dans toutes les circonstances de l'éruption volcanique, si l'on vient à comparer les plus puissants de ses résultats dont l'histoire nous ait conservé le souvenir, avec les phénomènes dont l'observation du globe nous fournit l'étude, une immense disproportion vient apparaître. Les plus puissants produits du soulèvement dans les volcans encore actifs sont des collines, ou bien des cônes

¹ On ne peut citer de meilleure argumentation pratique en faveur du soulèvement des volcans, que les beaux mémoires de MM. Elie de Beaumont et Dufrénoy sur l'Ethna et le Vésuve.

parasites qu'une secousse suffit à détruire : les volcans eux-mêmes sont des montagnes, et qui comptent parmi les plus hautes de la terre. Que voyons-nous aujourd'hui de comparable à de tels faits, à ces faits monumentaux dans l'histoire du globe ? A bien dire même, la forme des plus vastes masses volcaniques n'a qu'un médiocre rapport avec l'éruption telle qu'elle se présente à nous : ce sont comme de vastes cloches, souvent sans cratère terminal, ou pour lesquelles les effets cratériques sont comme imperceptibles relativement à la masse totale.

Nous pensons donc en résumé qu'il y a quelque chose de particulier dans les causes du soulèvement de ces grandes masses ; non seulement ces causes nous paraissent relever d'une énergie d'action inusitée, mais d'un principe de mouvement tout spécial, inhérent à la nature même des roches, je veux dire à leur nature première. C'est par l'assimilation que nous avons faite de l'origine du trachyte à celle du granit même, que nous croyons pouvoir remonter à ces causes ; il nous faut donc quitter un instant la théorie des volcans pour revenir à celle de cette roche primitive, du granit, aux causes de son éruption et de son influence sur la nature des terrains qui l'environnent.

On a vu au commencement de ce chapitre par quelles considérations nous avons été amenés à penser qu'à l'origine des réactions chimiques qui se sont exercées à la surface du globe, ce corps si remarquable par l'énergie de ses affinités, le fluor, avait dû se trouver tout entier précipité dans le dépôt insoluble, avec la silice et la potasse. La présence du fluor dans les micas, et sa concentration dans les roches les plus anciennes nous autorisait à cette hypothèse, justifiée d'ailleurs par les

¹ Lorsqu'observant encore debout au pied du cône culminant de l'Ethna la chétive construction grecque ou romaine nommée *Torre del Filosofo*, M. Elie de Beaumont en tire cette ingénieuse déduction, que depuis 1500 à 2000 ans l'accumulation des laves n'a pas fourni le moindre accroissement à la hauteur de la masse principale de l'Ethna, ce savant géologue donne là en effet un argument puissant en faveur du phénomène primitif de soulèvement, mais cela n'est d'aucun secours pour prouver que les moyens actuels ont été capables de ce soulèvement même.

considérations de la chimie. Or c'est dans ce seul fait que résident pour nous la plupart des propriétés géologiques du granit. Nous avons indiqué déjà en effet comment la volatilité de l'acide fluosilicique et du fluorure de potassium avait pu, sous l'action d'une chaleur instantanée, porter dans les terrains avoisinants le mélange intime du quartz, de la potasse et du fluor; et nous reviendrons bientôt sur ce sujet. Mais ce que nous n'avons point dit encore, c'est que là aussi est le principe du soulèvement granitique, soulèvement qui ne saurait être contesté. Il dérive d'ailleurs des mêmes causes accidentelles auxquelles nous avons attribué les grandes phases du phénomène volcanique, savoir à la dénudation du noyau intérieur du globe sur de vastes étendues par l'effondrement ou l'approfondissement des grandes vallées à chaque cataclysme géologique; mais ici c'est la chaleur seule développée par les conséquences chimiques de ce phénomène, qui exerce ses effets puissants sur le granit. Le dépôt qui lui a donné naissance repose en effet immédiatement sur la matière primitive oxidable, et la chaleur produite par l'action instantanée de l'eau ou de l'air sur elle pénétrera tout d'abord ce dépôt et y concentrera en quelque sorte sa première intensité. Or quel devra être l'effet de cette pénétration de la chaleur, par les parties basses, dans toute la masse du dépôt granitique? Sous son action expansive les composés fluorés volatils dispersés dans tout l'ensemble doivent tendre à s'échapper, et par la pénétration continue et croissante de la chaleur cette force élastique s'accumulant dans l'intérieur des masses, doit en venir au point de soulever la matière amollie et de faire surgir par une sorte de boursoufflement ces puissantes saillies granitiques, si souvent arrondies en forme de cônes surbaissés, soulevant les terrains de toutes parts ou s'élançant en hautes sommités au-dessus d'eux. A la suite d'une semblable éruption, le dégagement des gaz et aussi le refroidissement faisant évanouir les causes de cette intumescence, il a pu se produire enfin de grands affaissements au pourtour de ces masses, lesquelles retombant sur les schistes ou les calcaires amollis, peuvent quelquefois les avoir renversés et les surplomber

de toutes parts; forme en effet assez habituelle dans les hautes sommités granitiques¹.

Ainsi c'est en lui-même que le granit élémentaire renferme, pour ainsi parler, un principe d'explosion, développable par l'action de la chaleur. C'est la même cause qui selon nous donne lieu encore au surgissement des trachytes, dont l'origine et la composition est à peu près semblable : avec cette différence essentielle toutefois, que le granit ancien ayant ordinairement supporté dans son soulèvement igné une grande épaisseur d'eau ou de terrain, la pression qui en est résultée a dû en grande partie retenir à l'intérieur de ses masses les composés fluorés volatils et par conséquent charger cette roche en mica; le trachyte au contraire étant un dépôt superficiel, littoral et souvent sans recouvrement, doit se tuméfier avec une facilité beaucoup plus grande, s'élever par conséquent davantage en affectant des formes plus régulières, et enfin destitué presque entièrement, par le facile échappement des gaz, de son élément micacé et d'une partie même de son élément quarzeux, se réduire à une masse feldspathique, qui présente même parfois les apparences terreuses du kaolin².

Les mêmes causes de chaleur qui ont agi sur les roches granitiques aux diverses époques de cataclysmes, ont dû porter aussi leur influence jusqu'aux terrains sédimentaires les plus rapprochés du noyau oxidable : de là bien des phénomènes peu expliqués encore, tels que la transformation des calcaires en marbre par leur fusion sous le poids des terrains superpo-

¹ Il paraît néanmoins plus juste d'attribuer cette forme à un refoulement ultérieur, comme je l'ai dit, p. 77.

² Le kaolin, pour le dire en passant, n'est point à nos yeux l'effet de l'altération des feldspaths par l'action de l'eau et de l'atmosphère : les granits désagrégés et réduits en sable par l'action atmosphérique ne donnent point de kaolin. Le kaolin n'est autre que le silicate d'alumine du dépôt primitif, auquel la soustraction de la potasse par le dégagement abondant du fluorure n'a pas permis de se transformer en feldspath; en étudiant son gisement on peut voir que ce n'est pas un accident simplement superficiel, c'est une roche véritable, presque toujours dépourvue entièrement de mica et de quartz, mais de mica surtout. Les conséquences de ce fait sont trop faciles à coordonner avec nos idées, pour qu'il soit nécessaire de m'y arrêter.

sés, et leurs ploiemens si remarquables sans déchirures, sous l'influence des grandes forces horizontales qui n'ont dû agir en effet, comme nous l'avons vu, qu'après la formation des vallées. Mais cette haute température ne pénétrant en général les terrains que par l'intermédiaire du granit, l'influence purement physique de la chaleur est modifiée à un haut degré par l'influence chimique, et ce sujet mérite aussi quelques réflexions, car il y a là, je pense, des conséquences géologiques nouvelles et importantes à déduire des principes que nous avons établis.

Ce qui se présente en premier lieu, c'est l'influence immédiate du granit sur les roches qui l'environnent ou qu'il pénètre de ses ramifications. A son contact les schistes tantôt deviennent micacés et s'imprègnent de divers minéraux tels que mâcles, amphibole, tourmalines, grenats; tantôt et le plus souvent ils deviennent durs, quarzeux, feldspathiques, pénétrés intimement de silice et passant même à l'état de jaspe rubané. Pour n'en citer qu'un exemple bien connu, le massif de granit qui constitue le plus haut sommet du Harz, le Broken, perce à travers une formation de schiste et grauwacke qui l'enveloppe comme un manteau: or sur tout le pourtour, le contact est marqué comme par une auréole d'une roche dure, partie feldspathique, partie quarzeuse, nommée Hornfels (roche cornée), qui provient avec évidence de l'altération du schiste. On peut observer le même fait autour des trois grands massifs granitiques des Pyrénées, le Vignemale, la Maladetta, Néouvielle; il a été signalé autour du granit du Cornouailles, de l'Ecosse et dans mille autres localités.

D'autre part les grès siliceux, près du granit ou du gneiss, tantôt sont rendus jaspoïdes, simple effet de chaleur; mais tantôt aussi ils sont pénétrés d'un ciment de quartz ou de feldspath, et çà et là de nodules métallifères ou barytiques: modifications signalées surtout et si bien décrites par M. de Bonnard, qui a donné à ces grès altérés le nom d'arkôses; dans la belle description que ce savant a donnée de ces accidents géologiques, il a prouvé qu'ils étaient solidaires du contact du granit et par conséquent dus à son influence.

Dans les mêmes circonstances de contact, le calcaire devient souvent cristallin, il perd plus ou moins ses fossiles, s'imprègne de grenats, de pyrites, de fer oligiste, de spath fluor, de barytine, de galène, de tourmaline. Depuis longtemps M. de Bonnard a signalé les imprégnations quarzeuses, fluorées et métallifères dans le calcaire jurassique de Bourgogne au contact du granit; M. Elie de Beaumont a reconnu des faits analogues en Oisans, dans le calcaire liassique en contact avec la grande masse granitique du Mont Pelvoux, et les observations de ce genre faites dans les Alpes, les Pyrénées, la Hongrie, l'Oural, les Etats-Unis d'Amérique etc., sont innombrables. On peut voir dans un des meilleurs écrivains géologiques, M. Lyell, la description des altérations que fait subir le contact du granit aux couches fossilifères (schisteuses ou calcaires) des environs de Christiania¹; c'est le meilleur développement des faits dont il est ici question.

Mais ce n'est point là, selon nous, que se borne l'influence chimique du granit; bien des produits ignés qui sont regardés comme dérivant du foyer intérieur et comme ayant une individualité distincte, me paraissent relever directement de cette influence, et à ce sujet quelques réflexions générales sont d'abord nécessaires.

Lorsque l'on envisage géologiquement l'ensemble des roches plutoniques qui se rencontrent au milieu des terrains, on ne peut s'empêcher de remarquer que pour un certain nombre d'entr'elles il existe une sorte de solidarité avec certaines natures de roches sédimentaires auxquelles elles se trouvent le plus habituellement associées. L'association des serpentines avec les schistes talqueux, des porphyres avec les grès et les grauwackes, des eurites avec les schistes argileux, des grünstein avec les terrains calcaires, est aussi connue des géologues que celle des granits avec les gneiss. Cet ordre de faits n'avait point échappé aux profonds minéralogistes de l'Allemagne, et ces roches étaient classées par eux concurremment avec les terrains; l'influence des idées de Hutton, en portant

¹ Lyell. *Eléments de géologie*, traduc. franç., pag. 278.

à faire considérer toutes les roches ignées comme injectées de l'intérieur du globe, tendait au contraire à effacer de la science ce trait remarquable des associations caractéristiques.

Cependant la théorie du métamorphisme des roches sédimentaires par l'influence ignée, autre dérivation moderne des idées huttoniennes, paraît avoir ramené les observations vers cette voie ; mais il nous semble que cette théorie, bien que trop largement étendue à une certaine classe de faits, ainsi que nous l'avons indiqué en parlant du gneiss, a d'autre part été trop restreinte relativement à un autre ordre de phénomènes, relativement aux roches ignées accidentelles attachées d'une manière caractéristique à certaines natures de sédiments ; ou plutôt le rôle du métamorphisme a été là complètement interverti, et c'est à tort que l'on a pu considérer ces roches comme des *causes* de modifications, tandis qu'elles ne sont que des effets.

Il faut remarquer d'abord que les roches ignées qui sous les noms d'ophites, spilites, grünstein, variolites, eurites, porphyres etc., semblent accider capricieusement les terrains, sont liées dans leur ensemble aux masses granitiques, comme elles le sont individuellement avec chacune des natures spéciales de sédiment. Ce sont comme des roches parasites, qui semblent placées par intervalles entre le granit et les divers sédiments contigus, et qui indiquent toujours si ce n'est le contact absolu, du moins le voisinage d'une masse granitique. J'ai retrouvé ce phénomène partout où il m'a été donné d'observer les roches dont je parle ; il est très sensible pour la plupart des ophites amphiboliques ou pyroxéniques des Pyrénées, que l'on retrouve autour des principaux massifs granitiques, sur le versant français ou espagnol ; il l'est pour les amphibolites et les serpentines du centre de la France ; il l'est pour les variolites distribuées autour du granit de l'Oisans, et j'ai tout lieu de croire que c'est là un fait général. Mais lorsqu'après avoir enregistré ce fait d'ensemble, on descend maintenant aux détails, on voit la roche ignée changer de nature autour du même massif selon que change la nature du terrain où elle vient pénétrer. En contact avec les calcaires l'ophite des Pyrénées

par exemple ne présente guère autre chose que de l'amphibole ou du pyroxène ; au milieu des schistes sa nature est différente et tantôt alors elle approche beaucoup de celle de l'eurite, roche formée d'une pâte feldspathique, tandis qu'elle passe d'autre part à des roches quarzeuses que nous avons signalées comme modification ordinaire des schistes au contact du granit : or entre ces deux natures d'ophite il existe une autre différence bien essentielle, c'est que la dernière, l'eurite quarzeuse, est intercalée aux schistes argileux d'une manière pour ainsi dire concordante, tandis que les ophites amphiboliques ou associées aux calcaires semblent presque toujours accompagnées de quelques dislocations du terrain, avoir produit enfin un *soulèvement* local.

Toutes ces observations réunies concourent vers un même résultat, et mènent ensemble à cette idée fondamentale pour la théorie des roches ignées : que parmi ces roches toutes celles qui ne sont ni volcaniques ni granitiques, et qui percent toujours à travers les terrains sédimentaires, proviennent de *l'altération de ces terrains* ¹ par les évaporations intérieures, en particulier par celles que doit produire la transformation du granit ou du trachyte. La théorie nous mène enfin à concevoir que les éruptions même de ces roches, les soulèvements locaux qu'elles produisent dans les terrains, dérivent encore du même principe. C'est ce qu'il nous sera facile d'indiquer.

Nous avons annoncé en effet que l'application de la chaleur à la matière élémentaire du granit devait avoir pour conséquence nécessaire, lorsque la pression le permet, le dégagement du gaz fluorique silicé et aussi, suivant le degré de température, celui du fluorure de potassium : de là selon nous toute la théorie du

¹M. Scipion Gras, ingénieur des mines, a déjà émis l'opinion que les *spilites* des Alpes occidentales, mêlées intimement à la stratification du calcaire, étaient des roches métamorphiques, et la production des porphyres par la transformation des grès est aussi une idée connue ; mais je ne sais pas que l'on ait essayé une explication théorique de ces faits ni qu'on les ait généralisés en cherchant à les rattacher à un principe normal et uniforme.

métamorphisme, de là aussi la production des roches ignées dont il vient d'être question. L'acide fluosilicique pénétrant à travers un terrain argileux ou calcaire, qui contient toujours un peu d'eau, s'y décomposera instantanément, avec dépôt de silice, et sans doute aussi avec production de fluat de chaux ou de fluorure alcalin ou ferrugineux selon que la roche est calcaire ou argileuse. De là ces imprégnations siliceuses ou fluorées qui transforment les schistes en roches quarzeuses ou en micaschistes, les grès en arkôses, imprègne les calcaires de quartz et de spath fluor. Mais comme souvent à cette pénétration se joint l'influence d'une température élevée, soit par le voisinage du granit soit par les gaz mêmes, il est évident alors que la silice déposée dans les roches va se combiner avec les bases (chaux, magnésie des calcaires; alumine, fer, potasse des argiles ou du fluorure), et former avec elles ces silicates, composans ordinaires des roches ignées, savoir : l'amphibole, le pyroxène, le feldspath, la tourmaline, le grenat etc.; quant au fluor il pourra bien passer en partie à l'état de spath fluor, ou entrer dans quelques uns de ces silicates mêmes, tels que l'amphibole et la tourmaline qui en contiennent quelque peu; mais presque toujours volatisé à l'état d'acide hydrofluorique ou de fluorure alcalin ou ferreux, c'est plus loin, c'est hors du siège de la fusion la plus énergique qu'il doit aller déterminer ses réactions, et transformer les schistes argileux en micaschistes.

Mais de la réaction de la silice sur les bases et de leur scorification dérive une autre conséquence très importante : c'est que l'acide carbonique des calcaires, forcément éliminé de sa combinaison avec la chaux et la magnésie, et tendant à s'échapper au dehors avec tout le ressort que lui donne la température, va produire une *force soulevante* énergique, origine des dislocations et des éruptions locales qui signalent le passage des ophites et autres masses ignées à travers des calcaires ou au travers des roches qui en ont renfermé.....

Ce procédé de transformation appliqué à divers terrains peut servir à expliquer et les ophites amphiboliques ou pyroxé-

niques, et les divers porphyres, et la serpentine même, que je regarde comme un cas particulier très intéressant de ce phénomène général, quelque étrange que puisse paraître une semblable opinion. Supposons la vapeur quarzifère et potassée du granit pénétrant, avec une forte température, à travers un terrain de calcaire ou de dolomie, on voit immédiatement que la scorification y produira les variétés de pyroxène, amphibole, feldspath, dont le mélange constitue les ophites; si cette vapeur pénètre à travers une argile ou un grès à ciment argileux, il en résultera la formation d'un porphyre uniquement feldspathique ou bien quarzifère selon la nature du grès, et dont les arkôses ne paraissent être qu'un cas particulier, un cas d'atténuation. Maintenant si nous considérons en particulier les dolomies, nous savons que ces formations dolomitiques sont souvent accompagnées d'argiles salifères et gypsifères: or n'arrivera-t-il pas que dans de tels amas la soude s'unissant à la chaux en grande porportion, formera un silicate beaucoup plus fusible qui se séparera par écoulement du silicate de magnésie surexcédant, lequel est en effet réfractaire? Il en résulterait d'une part de la serpentine ou du schiste talqueux qui resteraient en couches ou en monticules de soulèvement; d'autre part au bas de ces massifs ou dans les fissures du sol viendraient couler ou s'injecter ces mélaphyres ou porphyres noirs, toujours dépourvus de quartz et caractérisés par le pyroxène, le labrador et l'albite, c'est-à-dire par la *soude* et la *chaux*, à la différence de tous les autres porphyres. Les minéralogistes apprécieront, je l'espère, la lucidité de ces résultats: ils montrent comment le porphyre pyroxénique dont venons de parler est intimement lié soit au porphyre rouge quarzifère, soit à la serpentine; comment celle-ci repose toujours sur d'autres terrains, sur des grès principalement, dont les couches plongent au-dessous d'elle, et d'autre part se relie à des gneiss ou à du granit; ils montrent enfin comment le porphyre rouge est toujours lié au grès rouge ainsi que le mélaphyre à la dolomie. Les masses de dolomie ne seraient donc point des roches de transformation, comme l'a pensé un illustre géologue allemand, ce seraient elles au con-

traire dont la transformation aurait en partie produit la roche ignée¹.

Il serait superflu d'entrer dans de plus longs détails ; dans ces considérations sur l'origine des roches ignées je n'ai voulu que jeter en avant quelques principes, dont le résultat principal est de faire voir comment tous les phénomènes de chaleur dont la trace se montre à la surface du globe dérivent uniquement

¹ Notre théorie fera facilement concevoir comment la serpentine (silicate hydraté de magnésie) peut retenir de l'eau en combinaison : c'est un fait analogue à l'eau des zéolites dans le basalte ou dans le mélaphyre, et ce fait est absolument inexpliqué dans les théories qui ont fait dériver les roches ignées de l'intérieur du globe. Le mélange du calcaire et du jaspe à la serpentine est encore une déduction toute naturelle. On concevra parfaitement enfin comment de petites masses d'ophite, ovoïdes ou irrégulières, peuvent se trouver enveloppées dans des couches calcaires sans que l'on puisse imaginer où est l'ouverture par où elles y auraient pénétré : c'est que tout se réduit ici à la pénétration et à la sortie d'un gaz, qui peuvent se faire par de simples fissures de la roche.

Quelques mots en dernier lieu sur les gypses métamorphiques et les dolomies associées. Supposons qu'une masse de gypse sédimentaire, enclavée dans un terrain, se trouve soumise au phénomène de scorification que nous avons indiqué : l'acide sulfurique éliminé par la silice et se dégageant à travers les fissures du terrain attaquera les calcaires sur son passage, et de là régénération de gypse, qui pourra être souvent *anhydre*. Ainsi j'expliquerais parfaitement l'union des gypses avec les spilites, ophites etc. dans certaines contrées ; l'état caverneux des calcaires en contact devient un effet tout naturel. Je crois enfin que l'association de la dolomie à ces roches et sa concentration à leur voisinage est susceptible aussi d'une explication beaucoup plus simple que tout ce que l'on en a dit jusqu'à ce jour. Nous avons vu que les formations gypseuses, ordinairement lacustres, devaient être abondantes en dolomie sédimentaire ; ce composé s'y trouve en général plus ou moins divisé, dispersé dans la roche calcaire et mêlé au carbonate de chaux pur. Mais on sait que le carbonate de chaux simple est beaucoup plus facilement attaqué par les acides que le carbonate double de chaux et de magnésie ; ainsi sur le passage de l'acide sulfurique c'est le premier qui sera attaqué de préférence, laissant pour ainsi dire un squelette dolomitique, dont les éléments pourront même, par une exaltation ultérieure de la chaleur sous une forte pression, être rapprochés et ressoudés ; cependant le plus souvent la dolomie devra garder l'empreinte de ces altérations et de là sans doute les fissures et les lignes cavernueuses dont elle est traversée.

d'une action superficielle et ne sont que d'imperceptibles accidents, qui n'indiquent à eux seuls aucune perturbation dans l'équilibre des grandes masses intérieures, quoiqu'ils doivent se rattacher en définitive aux grandes catastrophes qui périodiquement sont venues elles-mêmes changer l'équilibre de ces masses. Nous terminerions donc ici ce long chapitre, si les considérations précédentes ne nous conduisaient encore à jeter un coup-d'œil sur la formation des substances métallifères, sujet plein d'intérêt par ses conséquences utiles et comme application de la science chimique, mais que nous ne ferons qu'effleurer ici, parce qu'il n'occupe qu'une bien petite place dans l'ordre général, et semble disparaître au milieu des grands mouvements qui font l'objet spécial de notre étude.

Ce qui frappe particulièrement dans la distribution des matières minérales qui constituent les filons, c'est que malgré leur liaison ordinaire avec des roches ignées, elles sont généralement groupées et combinées suivant les affinités de la voie humide, je veux dire suivant l'ordre d'insolubilité dans l'eau. Qu'y a-t-il de moins soluble que le quartz, la baryte sulfatée, le spath fluor, la chaux carbonatée, et les sulfures métalliques? Et il est à remarquer que tous ces corps sont ou infusibles dans les limites ordinaires de température, ou sans volatilité, ou enfin même altérables par la chaleur; de sorte que sans les associations dont j'ai parlé, on pourrait croire que la matière des filons est tout-à-fait étrangère aux phénomènes calorifiques.

non
Mais non-seulement les matières des filons ont été formées dans l'eau, elles ont de plus été formées sur place et de toutes pièces; je m'explique. Le sulfate de baryte par exemple étant absolument insoluble, et l'acide sulfurique ne pouvant se trouver dans la même eau que la baryte sans se précipiter, il est évident que l'oxidation de ces deux corps a dû avoir lieu dans l'eau même ou dans la vapeur d'eau où ils se sont rencontrés; il en est de même de la silice si abondante dans les filons; et l'on arrive ainsi à notre considération fondamentale des matières non oxidées de l'intérieur du globe, considé-

ration qui doit s'étendre en effet à tous les phénomènes qui se distinguent des faits ordinaires de la stratification.

C'est dans la pénétration des vapeurs souterraines, tant volcaniques que granitiques; et en général dans leur action de contact avec l'eau ou sa vapeur, que nous croyons pouvoir trouver la véritable théorie des filons. Une portion de leur remplissage est déjà rendue évidente par les considérations que nous avons émises sur le dégagement de gaz fluorés dans la fusion du granit ou du trachyte : c'est en effet dans les filons et dans la vapeur d'eau qu'ils devaient contenir au voisinage des masses incandescentes, que le fluorure de silicium dégagé du granit a dû venir déposer la plus grande partie de sa silice et c'est là, je pense, une raison d'origine dont on appréciera l'opportunité, la liaison des filons avec les masses ignées ¹ étant un des faits les mieux constatés dans les applications de la géologie à l'étude minérale.

Mais ce n'est pas assez d'expliquer la production du quartz des filons, il faudrait trouver la provenance de tous les autres matériaux et des métaux en particulier. Cette question est délicate, car nous n'avons guère à ce sujet d'autres données que des résultats, et les résultats de réactions sans doute compliquées; mais je dois indiquer au moins le principe général auquel je rattache la formation définitive et la disposition locale de ces substances. Dans mes idées, qui rencontreront peut-être la défaveur ordinairement attachée aux opinions nouvelles, ce seraient les roches de sédiments elles-mêmes qui auraient fourni la plupart des matières caractéristiques des filons, la silice à part; les roches ignées (et par là j'entends seulement les roches granitoïdes ou volcaniques) n'auraient fourni que le véhicule, savoir les gaz vaporisateurs, et les métaux des filons ne seraient que la concentration d'une matière auparavant disséminée dans les terrains, mais surtout dans les plus anciens. Je vais expliquer rapidement cette opinion.

¹ Pour le dire en passant, on ne saurait se refuser à voir dans le soulèvement même du granit une des causes de l'élargissement des failles qui l'avoisinaient et de leur passage par conséquent à l'état de filons.

Les métaux, le fer en particulier, existent partout, dans toutes les roches, *excepté dans le granit*; c'est un résultat fort important et qui d'abord vient confirmer ce que j'ai indiqué ailleurs, qu'à l'origine les métaux se sont trouvés entraînés dans la dissolution primitive, d'où ils ont été précipités peu à peu par des réactions que je ne saurais préciser exactement, mais auxquelles toutefois le soufre ni le carbone ne peuvent être demeurés étrangers. Sans doute une partie des métaux a dû se déposer en sulfures dans la première période de sédimentation, partie peut-être en oxides ou en carbonates. Quoiqu'il en soit, tous les métaux renfermés dans les matières attaquées par les premières eaux, ont dû se trouver disséminés dans les premiers dépôts de sédimentation progressive, au-dessus du granit, principalement dans l'élément futur des gneiss. Maintenant à chaque mouvement igné du granit ou du gneiss lui-même, l'effet évident de l'acide hydrofluorique qui doit devenir libre, comme nous l'avons vu, dans la fusion de ces roches et dans leur réaction sur les terrains avoisinants, est de les dépouiller de leurs métaux, que ce gaz entraîne à l'état de fluorures. Dans les fissures ou filons où ils se rendent, ces fluorures doivent rencontrer des vapeurs analogues à celles de nos volcans, puisque nous avons vu que c'est l'action volcanique, ou si l'on veut l'action chimique des eaux, qui détermine par l'élévation de température tous ces phénomènes granitiques; les fluorures rencontreront donc en particulier de la vapeur d'eau et de l'hydrogène sulfuré, et tandis que la première précipitera la silice du fluorure de silicium, l'autre va précipiter tous les métaux en sulfures, dont l'état cristallin est suivant toute probabilité le résultat de la précipitation au moyen et au milieu des vapeurs.

Tel est le cas le plus général, le plus ordinaire même dans les roches sédimentaires anciennes, comme le gneiss en particulier, mais ces réactions sont susceptibles de bien des variations suivant les métaux et suivant les roches; nous en citerons quelques-unes.

Le fer est le métal de beaucoup le plus commun, le plus répandu dans les terrains, c'est donc lui qui sera enlevé le plus

ordinairement par l'acide fluorique dans son passage à travers les argiles, les grès et les calcaires argileux ; comme cet acide aura abandonné sa silice à la scorification des terrains, il peut et doit se trouver souvent à l'état de fluorure de fer pur : telle sera l'origine¹ des mines de fer ordinaires, car le fluorure sera toujours décomposé et le fer passera plus ou moins rapidement à l'état d'oxide si l'eau est pure ou en vapeur, de fer carbonaté lorsqu'elle renfermera des carbonates. Quant à l'oxide il pourra être hydraté ou anhydre selon la température et la quantité de l'eau, ou si l'oxidation se fait par l'air à une température considérable, il peut se produire même de l'oxide magnétique. Cette manière de voir fera facilement comprendre pourquoi les filons ferrifères sont quarzeux au milieu des schistes argileux, et dépourvus de quartz au contraire au milieu des calcaires : c'est que dans ceux-ci la silice a été employée à la scorification de la chaux et à la production des roches pyroxéniques ou amphiboliques, elles-mêmes ferrifères ; ou plus exactement c'est que dans les parties où la silice se trouve réunie à l'oxide de fer et à la chaux, elle a pu s'y combiner sous l'action d'une médiocre température, ce qui n'a pas lieu dans les argiles où le fondant, la chaux, n'existe point ; dans ce cas en effet tous les éléments demeurent séparés sous l'influence d'une chaleur même assez forte, seulement l'oxide de fer doit passer souvent à l'état d'oxide rouge ou anhydre, ce qui n'a lieu que bien plus rarement dans les terrains calcaires et là seulement où la silice manque.

Les métaux dont les fluorures peuvent être décomposés im-

¹ On peut remarquer au sujet et à l'appui de cette théorie des mines de fer, que les calcaires en contact avec les roches ignées accidentelles, comme les ophites des Pyrénées par exemple, sont ordinairement décolorés et d'un blanc parfait ; ceux qui renferment les mines de fer de ces montagnes sont blancs aussi ; ces mines de fer sont d'ailleurs éminemment liées aux ophites et par conséquent au granit, dont celles-ci sont toujours voisines dans les régions où le granit est apparent. On a remarqué aussi dans les grès rouges d'Allemagne que partout où l'oxide de fer se concentrait en filons ou en nodules, le grès avoisinant blanchissait ; l'instrument de cette décoloration n'est pas autre pour nous que le fluor dégagé des granits ou des gneiss.

médiatement par la chaleur en oxi-fluorures, comme l'étain, le molybdène, le tungstène, le titane, le tantale, etc., doivent former dans notre théorie une classe à part : ils doivent en général se concentrer dans le voisinage des roches granitiques, points de départ du gaz, et s'y trouver réunis ensemble, en oxides et non pas en sulfures, parce que se déposant au milieu des roches et non plus ordinairement dans les fissures, ils n'ont pu être atteints par l'hydrogène sulfuré et leurs conditions de décomposition chimique ont été ainsi toutes différentes. Tels sont en effet les résultats remarquables que l'observation nous indique, en nous montrant la réunion ordinaire de l'oxide d'étain avec le wolfram et avec les divers minerais de titane, de tantale, de molybdène.

On a remarqué¹ aussi que ces mêmes substances étaient ordinairement mêlées à des minéraux très fluorés, tels que micas, topaze, picknite et apatite, et l'on en a conclu que le fluor avait joué un rôle important dans la production des minerais d'étain en particulier. Je crois que ce rôle n'est point propre à l'étain, et la formation de ses minerais n'est qu'un cas particulier de l'action générale du fluor dans les masses voisines du granit et surtout dans les gne'ss qui leur sont immédiatement postérieurs. La concentration du fluor, dans ce cas particulier, au voisinage des minerais même, tandis qu'il n'est ordinairement que disséminé dans les micaschistes plus ou moins voisins, cette concentration tient sans doute soit à la formation des *oxifluorures* métalliques, qui retiennent du fluor dans leur voisinage, soit surtout à ce que les minéraux mêmes dont il est question, en grande partie formés de fluosilicates, ont pu tendre à se former dans les mêmes conditions que les oxifluorures, et y demeurer maintenus sous l'influence d'une pression considérable.

J'ajoute, comme considération générale, à tous les résultats précédents, que d'après la disposition originaire que nous donnons aux métaux, savoir leur dissémination dans le dépôt

¹ M. Daubrée, ingénieur des mines, a écrit un mémoire sur ce sujet. Ann. des mines 3^e série, tom. XX.

qui devait plus tard former le gneiss, et de plus d'après la nature fluorée, granitoïde, de ce terrain, il n'est pas surprenant que le *gneiss* soit de toutes les roches la plus métallifère; le contact du granit n'y est d'ailleurs nullement nécessaire pour la production du fluor.

Nous terminerons ici les considérations sommaires que nous avons à émettre sur ces grands faits de la répartition originelle et des transformations ultérieures des matières minérales à la surface du globe. En renfermant un sujet si vaste dans un cadre aussi restreint, sans doute bien des détails nous ont échappé, soit malgré nous, soit à dessein : car nous n'avons voulu que poser des principes et non analyser tous les faits. Nous faisons vœu pour que l'on nous tienne compte, dans l'appréciation de cet ouvrage, non point de ce que nous laissons encore à faire mais de ce que nous avons apporté et de ce qui nous est propre. Bien des principes nouveaux sont renfermés dans ces quelques pages; puissent les savants juger qu'ils sont dignes, sinon de leur assentiment immédiat, du moins de leur examen et de leur intérêt. L'objet en est à certains égards tout spécial et uniquement chimique; cependant ils se rattachent par quelque côté au point de vue général de cet ouvrage. On peut déduire en effet les deux conséquences suivantes :

1^o Que tous les soulèvements locaux, volcaniques ou granitiques, ont pour cause une action extérieure, étrangère à la chaleur interne du globe.

2^o Que ces phénomènes doivent se rattacher par *l'alignement des masses* aux grands cataclysmes qui ont marqué les âges géologiques et aux directions de fractures caractéristiques des divers terrains.

Les causes qui ont déterminé périodiquement les directions linéaires des vallées et des montagnes, ont présidé aussi à l'alignement des volcans et des granits; elles dominent toute la géologie chimique, comme nous avons vu qu'elles dominent déjà toutes les révolutions physiques étendues à l'ensemble du globe.

CHAPITRE X.

RECHERCHE ET ÉTABLISSEMENT CHRONOLOGIQUE DES ÉQUATEURS SUCCESSIFS DE LA TERRE.

Les principes théoriques étant épuisés, il est temps d'en faire l'application systématique, et de rechercher sur la surface de la sphère terrestre l'empreinte et l'âge de ses anciens mouvements. Cette étude en effet pouvait seule faire reposer notre système sur des fondements réels, et décider enfin s'il lui était donné de s'élever du rang des simples conjectures à celui d'une haute vérité scientifique. Faire entrevoir par des données positives la possibilité du succès eût été déjà beaucoup, vu l'exiguité de nos connaissances générales en géographie géologique; et l'opportunité des explications théoriques que nous avons exposées rendait, je crois, cette seule indication précieuse; un ensemble complet, une coordination rigoureusement précise et dont toutes les parties tendraient à se vérifier mutuellement, était donc plus qu'on ne pouvait raisonnablement espérer d'une question aussi générale. Nous croyons nous être approché de cette précision inattendue: confiant dans ce résultat parce qu'il est pour moi l'indice de la vérité, et qu'il atteste l'éloquence des faits, non point le mérite de mes recherches, je le présente donc au jugement des savants; espérant du reste en leur secours, en celui du temps, pour compléter ou rectifier ce que ce résultat doit avoir d'imparfait ou de défectueux.

Deux genres d'accidents linéaires nous étaient donnés par la théorie comme moyens d'investigation dans cette recherche des positions successives de l'axe terrestre: ce sont les vallées et les montagnes, dont nous avons vu que pour chaque époque la

direction devait être parallèle à celle du mouvement même de la terre. Mais les indications qu'elles nous fournissent ont une valeur fort inégale. Les vallées ou plutôt les fractures qui leur ont donné lieu, n'étant point soumises autant que les strates mêmes des terrains à la perturbation des mouvements ignés ou à la superposition des efforts de soulèvement, donnent souvent sur un petit espace des indications plus précises : mais en raison de leur dispersion sur toute la surface de la terre et du genre particulier de dislocation qu'elles déterminent, la multiplicité des croisements met obstacle à ce que leur indication se prolonge d'une manière continue sur de grands espaces. Pour les montagnes au contraire les inégalités, les perturbations de détail s'effacent dans la longueur du parcours et se confondent dans l'alignement d'ensemble ; au lieu de se disperser d'ailleurs autant que les vallées, elles se concentrent, et non pas même seulement sur une région, mais en quelque sorte sur une ligne : cette ligne est l'équateur, dont l'empreinte ainsi formée doit matérialiser pour ainsi dire la trace du mouvement du globe à chaque époque. C'est donc là le grand, l'inappréciable résultat, et c'est à lui qu'il faut avant tout nous attacher.

La recherche des équateurs et la détermination de leur âge réel ne pouvait toutefois s'effectuer par un simple tâtonnement géographique et en livrant pour ainsi dire au hasard d'une investigation empirique le tracé de toutes les lignes montagneuses circulaires que l'on peut parvenir à indiquer sur le contour de la sphère terrestre. Ce n'est point ainsi, c'est géologiquement que nous avons entrepris cette recherche. Dans l'Europe occidentale, spécialement explorée par les géologues, les formations successives sont soulevées ou fracturées suivant certaines directions caractéristiques ; chacune d'elles est venue se déposer horizontalement sur la tranche des couches relevées des formations précédentes, et la dernière direction des mouvements antérieurs est, pour chaque époque, celle du mouvement même de la terre : c'était donc là, c'était dans le parallélisme avec les directions caractéristiques connues qu'il fallait placer le véritable guide de nos recherches,

et c'est la voie en effet que nous avons suivie. Déjà un classement chronologique des montagnes de nos contrées, basé sur ces principes de discordances dans les stratifications des terrains successifs, avait été le résultat des grandes recherches de M. Elie de Beaumont, et sous ce point de vue les fondements de notre étude étaient posés. Cependant la différence des principes théoriques et la direction particulière de nos idées et de nos observations nous ont porté à introduire dans cette chronologie des directions européennes des modifications tout à fait essentielles, que j'indiquerai progressivement, avec les données sur lesquelles je crois devoir les établir.

Les bases une fois fixées par l'étude pratique des directions, la détermination de la place réelle des équateurs sur la sphère demeurerait encore très complexe, à cause des récurrences d'alignements parallèles que des grands cercles équatoriaux très éloignés l'un de l'autre peuvent produire dans une contrée restreinte; on verra toutefois qu'il existe dans chaque cas particulier des moyens de fixation qui ne paraissent rien laisser d'arbitraire. Cette détermination, bien que ses résultats définitifs soient simples et nettement tranchés, a donc dû exiger une étude longue et sérieuse; mais je me garderai de faire assister le lecteur à ce travail quelquefois informe de l'esprit qui cherche et combine, je n'en exposerai que le dernier résultat, avec ses vérifications les plus générales.

De ce qui a été exposé dans le chapitre sixième, il résulte que les lignes montagneuses ne doivent pas former un contour continu sur la sphère, et la position même des montagnes sur ce contour doit devenir un précieux indice chronologique, un moyen puissant de vérification. Mais à cette inégale dispersion des ridements, dont en définitive le résultat est heureux pour la science, viennent se joindre deux difficultés particulières: l'une est l'imperfection de nos connaissances géographiques, particulièrement sur l'intérieur des quatre grandes étendues continentales, dont le libre accès est demeuré jusqu'ici fermé aux plus aventureux des voyageurs d'Europe; le second obstacle est ce voile des mers étendu sur une si grande portion de la surface du globe, et qui peut recouvrir même de puissants

accidents de cette surface, en raison de l'inégale profondeur des portions soulevées du lit des eaux : il n'y a donc rien à conclure de réellement négatif des portions ainsi cachées. Par compensation la direction des côtes, généralement identique avec celles des grands mouvements du sol, et la direction bien caractérisée aussi de certains archipels, entreront comme indication précieuse dans nos classements.

La connaissance des équateurs entraîne avec elle celle de plusieurs autres éléments de chaque station spéciale de l'équilibre terrestre, en particulier celle des pôles à chaque époque; et cette considération ne sera pas une des moins heureuses pour le classement chronologique, à cause des traces remarquables que de longs abaissements de température ont laissés à diverses époques dans des contrées connues. Mais ce n'est pas tout, et le tracé des équateurs peut fournir un autre élément climatérique plus général, par l'évaluation approximative de leur inclinaison sur l'écliptique. Malheureusement cette indication si précieuse pour l'histoire organique du globe n'est pas toujours susceptible d'une rigoureuse précision, et ne saurait recevoir qu'une limitation plus ou moins vague, sauf dans certains cas spéciaux où les limites sont suffisamment resserrées. La position de chaque point du contour de notre équateur relativement au plan de l'écliptique est en effet fictive, elle varie dans toute la durée du mouvement de rotation : ainsi selon la position particulière qu'avait la terre au moment de chacun des chocs et pour ainsi dire selon l'heure du jour où il a eu lieu, les inclinaisons ont dû être variables, et la place des équateurs sur la sphère ne nous donne rien d'absolu dans leur relation avec le plan de son orbite. Cette variation a toutefois des limites, que l'on peut obtenir en imprimant à notre équateur actuel, sur une sphère mobile, son mouvement complet par rapport à un plan figuratif de l'écliptique et maintenu fixe dans son inclinaison de 23° . Le plus grand et le plus petit angle que formera chaque équateur ancien avec le plan fixe, dans cette révolution complète, seront les deux limites extrêmes de son inclinaison; j'indiquerai ces limites dans chaque cas, et elles nous conduiront à des conséquences importantes.

Enfin je ne veux pas terminer ces préliminaires sans une réflexion que je crois essentielle sur la valeur à donner aux observations pratiques de directions, qui doivent former en définitive la base des classifications générales. Les ridements des terrains et leurs directions ayant eu pour cause efficiente des forces de compression horizontales agissant sur l'universalité du globe, doivent avoir éprouvé beaucoup de déviations accidentelles provenant de la superposition de ces divers efforts à des époques distinctes, et aussi du soulèvement limité et sinueux des roches ignées. Ces accidents, nécessairement d'une médiocre étendue, s'éteignent sans aucun doute lorsque l'on peut embrasser par les observations une étendue suffisante, mais cette étendue est nécessaire pour être sûr que l'on n'a point pris l'anomalie pour la loi. Il y a même des gradations et des subdivisions dans ces irrégularités apparentes : souvent dans un petit espace il semble, si l'on s'arrête aux détails, que l'on voie apparaître dans les terrains un dédale de directions et de sinuosités ; et cependant lorsque l'on considère l'ensemble on trouve que les déviations partielles ramènent par groupement à des moyennes régulières. Les petits bassins houillers, soumis aux irrégularités des terrains environnants et aux soulèvements granitiques locaux, donnent beaucoup d'exemples de ces sortes d'anomalies ; sur une plus grande échelle elles doivent se représenter encore. Bien que l'exactitude des observations de détail soit au plus haut point précieuse, il faut donc cependant grouper et réunir beaucoup, pour arriver à la vérité en géologie, et il ne faut pas non plus se laisser toujours arrêter court par des anomalies partielles qui ne proviennent même quelquefois que d'une observation incomplète : je dis ceci pour quelques géologues, toujours disposés à chercher dans un ensemble l'imperfection d'un détail, et qui croient briser une loi par son exception. J'ai déjà cité ce mot qu'écrivait Saussure dans la pittoresque naïveté de son style : « Il ne faut pas observer les montagnes avec un microscope. » C'est là une haute maxime en géologie ; par malheur quelques uns ont le verre grossissant placé dans la vue même, et rien de plus fâcheux pour l'avancement des sciences que ces regards à court foyer. Je le

répète encore, ce n'est point l'irrégularité qui doit fixer les yeux et exercer les forces de l'esprit, c'est la loi.

L'ensemble de mes recherches m'a signalé un autre genre de superposition dans les mouvements, c'est celle des mouvements parallèles : circonstance très importante, qui peut déterminer des soulèvements d'une remarquable hauteur à des latitudes assez élevées cependant au-dessus de l'équateur de chaque époque. Lorsqu'en effet par suite de fractures et des phénomènes ignés qui en ont été la suite, un terrain a éprouvé déjà un mouvement aligné dans une certaine direction, ce soulèvement même tend à former dans les profondeurs un vide ou quelquefois seulement un ramollissement qui constitue dans cette direction particulière une ligne de moindre résistance aux efforts horizontaux tendant à produire des ridements semblablement dirigés ; il peut donc en résulter de grands phénomènes de soulèvements et de ridements, capables de tromper sur la proximité ou l'âge d'un équateur, si l'on n'avait pour l'établir des points de repère plus sûrs encore. J'appelle dès maintenant l'attention sur ce point délicat, dont les exemples ne manqueront pas dans le cours de notre recherche.

Nous devons dire enfin quelques mots sur la manière d'apprécier d'après la position de l'équateur les variations dans la vitesse de rotation, ou du moins le sens de cette variation. Chacun des mouvements de rotation qu'a subis la terre étant la *résultante* du mouvement de rotation antérieur combiné avec le choc, la direction de ce dernier peut être approximativement recherchée par les lois ordinaires de la composition des forces. De là une approximation plus ou moins précise, suivant l'angle que forme chaque équateur avec le précédent : si cet angle approche de 45° , il n'y a aucun doute qu'il ne soit le résultat d'un croisement plus ou moins obtus des deux directions de forces, c'est-à-dire de leur antagonisme; comme d'ailleurs la vitesse qu'a la terre au moment du choc doit être en général égale ou supérieure à celle qui lui serait communiquée par le choc seul, il s'ensuit que cette circonstance indique presque toujours une diminution, un ralentissement. Lorsque l'angle est aigu au contraire, cela doit indiquer *en général* une augmentation de

vitesse, quel qu'ait été le sens du mouvement, si ce n'est le cas où le choc étant contraire son impulsion serait notablement moins grande que celle du mouvement primitif. On voit donc qu'il ne saurait y avoir ici une certitude absolue; néanmoins la relation de la disposition des montagnes avec les grands mouvements des eaux connus par nos successions de terrain, pourra nous fixer dans la plupart des cas, et la concordance de ces deux effets nous fournira des vérifications satisfaisantes.

Ces préliminaires posés et ces réserves prises, j'entre dans le détail de nos classements ¹.

I. SYSTÈME DE L'HIMALAYA ORIENTAL ET DU BRÉSIL.

II. SYSTÈME DE L'ÉCOSSE ET DES MONTS DOVRE (NORWÈGE).

Terrains anciens et de transition.

La constance des directions E. 25 à 45° N. (hora 3-4) qu'affectent dans nos contrées européennes les terrains primaires stratifiés et la partie la plus ancienne des terrains de transition, est un fait bien reconnu des géologues. Les Alpes dans les massifs du Saint-Gothard et du Mont-Blanc; les Pyrénées dans le massif du Canigou, la montagne Noire; les terrains schisteux de la Bretagne, des Vosges, des Ardennes; l'Alle-

¹ J'ai résumé dans un tableau, placé à la fin de ce chapitre, le nom et l'âge des équateurs successifs, avec l'indication des teintes qui les caractérisent sur la mappemonde. Ces teintes sont autant que possible en conformité avec celles qui sont généralement adoptées dans la géologie graphique et qui ont été employées pour la coloration de la carte géologique de France, à quelques modifications près provenant de la nécessité d'indiquer tout par des couleurs. Cette coloration est divisée par groupes: la teinte carminée appartient à la première époque; les teintes brunes et noires aux terrains de transition et intermédiaires; le bleu au terrain jurassique; les nuances de vert et de jaune aux périodes crétacées et au tertiaire inférieur; les variations du violet au rouge de vermillon, au reste du terrain tertiaire.

C'est par erreur d'ouvrier que les teintes de seppia et de bistre, qui devaient caractériser les époques de transition supérieure et du trias, ont été transposées.

magne dans ses régions métallifères; le sud de la Norvège, la Finlande et le nord de la Russie; l'Angleterre dans le Westmoreland, le Cornwall et le pays de Galles; le nord de l'Irlande; l'Ecosse enfin dans le massif des Grampians et dans toutes les zones parallèles de ses montagnes, présentent cette direction du N.E. ou de l'E.N.E. partout reproduite dans les terrains anciens en discordance avec les dépôts supérieurs.

Les premières observations relatives à cet ordre de faits sont dues à M. de Humboldt, qui frappé de la généralité des directions N.E. que l'on rencontre dans les terrains anciens depuis le golfe de Gènes jusqu'aux plaines septentrionales de l'Allemagne, et retrouvant la même fréquence de direction identique dans la région équatoriale de l'Amérique (chaînes de la Parime, de Venezuela et de Caracas) avait cherché à relier à une grande vue théorique ce qu'il appelait ce *loxodromisme* des couches. Plus tard cet illustre géologue a renoncé, d'après des observations plus complètes, à ce qu'il y avait de trop absolu dans ses premières opinions; mais il n'en avait pas moins éveillé l'attention et tourné les regards du monde savant vers un des plus beaux points de vue de la géologie, et ce premier aperçu d'une grande loi cosmogonique appartenait dignement en effet au savant qui a utilement visité une si grande portion du monde connu. Plus tard d'autres géologues, étudiant avec détail les terrains anciens de l'Ecosse et de l'Angleterre, y ont retrouvé la même orientation partout où ils en ont une exclusive. Lorsqu'enfin M. Elie de Beaumont généralisant cette loi du parallélisme des directions contemporaines, conçut l'idée de caractériser chacune des formations, dans nos contrées, par une direction particulière, il dut prendre pour point de départ l'orientation hora 3-4 signalée par M. de Humboldt dans les terrains anciens: c'est en effet celle qu'il a donnée pour type de son plus ancien soulèvement dans l'Europe occidentale, sous le nom de système du Westmoreland et du Hundsrück; depuis il s'est arrêté¹ à la direction E. 25° N.; c'est ce soulèvement qui, d'après ce savant géologue, aurait séparé les deux

¹ Explication de la carte géologique de France, p. 60.

divisions principales du terrain de transition, reconnues il y a peu d'années en Angleterre et en France et désignées alors par MM. Sedgwick et Murchison sous les dénominations, un peu trop nationales peut-être, de terrain Cambrien et de terrain Silurien.

Dans les recherches de géographie géologique qui nous occupent, cette division pouvait n'être point suffisante : non-seulement en effet le terrain de transition ancien présentant des fossiles analogues à quelques mollusques de notre époque, indique un état de la terre analogue au nôtre ; mais il indique encore, par l'alternance des calcaires et des schistes, qu'il existait déjà, lors de son dépôt, quelques terres soulevées au-dessus du niveau des eaux. Or la première rotation du globe n'ayant dû produire aucun soulèvement, il y avait une grande probabilité qu'un changement au moins avait dû s'opérer entre l'état primitif de la terre et la période ancienne du terrain de transition.

Il y avait donc lieu de rechercher s'il n'existait pas un équateur antérieur à tout le dépôt de transition, ainsi qu'il devait en exister un entre les deux périodes de ce terrain. Comme il n'y a point du reste discordance de direction reconnue entre les couches primaires et les schistes les plus anciens, il fallait que ces deux équateurs fussent également parallèles à la direction N.E. ou E.N.E. de l'Europe occidentale, selon les latitudes.

Plusieurs grands cercles montagneux donnent en effet pour nous cette direction, mais diverses considérations nous ont porté à en distinguer deux comme appartenant spécialement à ces premières époques.

L'un passerait sur l'alignement oriental de la grande chaîne de l'Himalaya, qui s'étend de l'E. à l'O. au nord du Bengale, et sur les montagnes neigeuses du sud de la Chine; suivant, d'autre part, la chaîne qui court au sud de la Perse, il traverse l'Afrique parallèlement à une portion des montagnes de Kong et de la côte de Guinée, et vient enfin s'étendre sur la grande ligne montueuse qui divise tout le Brésil, en se rattachant aux chaînons transversaux des Andes du haut Pérou. Nous le nommons *Système de l'Himalaya oriental et du Brésil*.

L'autre grand cercle partant du nord de l'Irlande et de l'alignement des monts Grampians en Ecosse, suit la forte déviation de la chaîne de Norvège, aux monts Dovre, traverse la Finlande, la Russie et vient passer sur la grande chaîne transversale des monts Altaï au centre de l'Asie; de là, s'adaptant à l'allongement des Philippines, il traverse dans une de ses grandes longueurs le continent encore inconnu de la Nouvelle Hollande; atteignant enfin l'Amérique méridionale il la parcourt sur une grande étendue, en suivant d'abord la déviation des Andes du Chili, entre Valdivia et Santiago, puis la chaîne peu connue qui sépare le Brésil du Pérou; et il semble ainsi former comme l'axe central, de part et d'autre duquel le triangle allongé de ce continent Américain a dessiné sa forme caractéristique. La difficulté de donner une désignation complète à cette chaîne si disséminée, et dont les ridements sont d'ailleurs peu apparents, me l'a fait nommer simplement *Système de l'Ecosse et des monts Dovre*.

Les deux lignes que nous venons d'indiquer correspondent également à la direction E.N.E. en France, N.E. en Ecosse, mais leur parallélisme n'existe plus en Asie ni en Amérique, où l'on se rapproche des points de rencontre. Examinons, autant que nos connaissances le permettent, la nature géologique des terrains qu'elles parcourent, afin de constater et de distinguer leur âge.

Considérant d'abord l'ensemble de ces deux lignes et avant toute distinction de priorité, qui ne remarquera la concentration singulière des terrains anciens sur les deux zones qu'elles embrassent? Circonstance que les données de la géographie géologique, quelque imparfaites qu'elles soient, font connaître avec toute évidence. Qu'y a-t-il de plus connu en effet que l'immense développement des gneiss et des schistes anciens sur la couronne boréale du globe et spécialement dans toutes les terres septentrionales de l'Europe et de l'Asie: la Norvège et la Finlande, l'Ecosse, la Russie du nord, la Sibérie? Si nous passons à la zone tropicale, quoi de plus connu encore que le développement du granit sur la surface du Brésil et de l'Inde? Ainsi d'un seul coup-d'œil nous saisissons déjà qu'un grand ensemble

ble de faits géologiques vient se coordonner, à notre classement ou plutôt vient se présenter de lui-même et tracer spontanément le relief des premiers équateurs. Quel sera entre eux maintenant le choix de priorité?

Le système de l'Himalaya oriental et du Brésil me paraît être le premier équateur qui ait laissé sa trace sur le globe, et c'est par conséquent celui qui correspondrait à sa seconde rotation, au moins depuis la solidification de l'enveloppe terrestre. La nature des terrains relevés sur les principaux points de son contour mène en effet directement à cette conclusion. Tous les voyageurs qui ont parlé de la géologie du Brésil nous montrent la masse principale de ce pays formant une vaste protubérance de granit grossièrement stratifié et dont les couches sont dirigées au N. E. un peu E., exactement comme le grand cercle dont nous avons indiqué le contour; c'est aussi le même alignement qu'affectent et la côte méridionale du Brésil et la longue croupe montueuse qui en relie les côtes orientales avec les rameaux des Andes, dans tout le travers du continent. Ces mêmes ramifications des Andes seraient composées aussi de roches granitoïdes, d'après les observations de M. d'Orbigny. Au nord de ces régions, dans la Sierra Parime, M. de Humboldt a rencontré encore une immense formation de granit stratifié, qui s'étend sur 180 lieues de longueur et présente dans ses strates la même orientation au N. E.; il est bon d'ajouter que ce granit n'a point offert à l'illustre géologue une seule de ces couches calcaires si fréquemment intercalées en général au gneiss de l'Amérique équinoxiale.

L'intérieur de l'Afrique, que traverse notre première ligne, n'est nullement connu, et il est probable d'ailleurs, comme nous l'indiquerons en parlant de la disposition des montagnes sur chaque équateur, qu'il n'y a point eu de ridements considérables dans cette région. La presqu'île de l'Inde, où ce système a fortement marqué au contraire, est mieux connue aussi, non seulement en géographie, mais encore au point de vue géologique. Or l'abondance du granit dans cette partie de l'Asie est un fait attesté par des observations nombreuses; on le retrouve encore dans la partie connue du sud de la Chine,

et, d'après les relations, il formerait tous les environs de Canton. Dans cette partie méridionale de l'empire chinois, la ligne E.O. de l'Himalaya est prolongée aussi par une chaîne neigeuse et par conséquent fort élevée, vu la latitude; elle est nommée chaîne du Nanling (monts du midi), mais sa nature n'est pas connue.

Nous ne connaissons pas non plus la nature des hauts sommets de l'Himalaya oriental, cependant leurs abords ont été parcourus, et dans les points que l'on a visités on a trouvé le granit vers les pentes moyennes; ce qui donne une grande probabilité qu'il s'étend jusqu'au faite. Il y a quelques années une expédition envoyée de Calcutta dans l'Assam supérieur, à l'extrémité orientale de la chaîne, a trouvé vers le noyau de ces montagnes, une formation de granit et syénite, supportant seulement sur ses pentes basses le terrain tertiaire; cette dernière circonstance semble attester elle-même le surgissement ancien de cette masse granitique. En consultant le journal de voyage de Victor Jacquemont, enlevé si prématurément à la science dans ces mêmes contrées, j'ai trouvé que les directions E.O. que ce géologue a relevées en allant de Calcutta à Cachemir, appartiennent spécialement au terrain de gneiss; et ce qui limite extrêmement la date de ce relèvement, c'est qu'on y voit le gneiss très incliné et orienté suivant cette direction, supporter (entre Burdwan et Lalghœur) des grès houillers en couches presque horizontales; les directions N.O. n'affectent dans l'Himalaya occidental que des terrains beaucoup plus modernes, néanmoins le granit y forme encore l'axe central.

On pensera sans doute que ces données sont suffisantes pour classer avec quelque probabilité l'équateur qui nous occupe comme le plus ancien de ceux au moins qui ont pu laisser leur trace sur le globe. Il est du reste nettement marqué sur la sphère par la direction des montagnes, des côtes et des vallées, et les deux principaux groupes montagneux qui lui appartiennent (l'Inde orientale et le Brésil) présentent déjà ce caractère si remarquable, d'être situés aux deux extrémités d'un même diamètre.

L'inclinaison de cet équateur sur le plan de l'écliptique n'a pu varier qu'entre 5 et 30° : cela indique nécessairement très peu de variation locale dans les saisons et la température, et par suite peu de mouvement dans les eaux superficielles; ce qui nous paraît expliquer pourquoi le terrain de transition ancien est si essentiellement schisteux et si peu abondant en roches fragmentaires ou arénacées, à la différence des terrains immédiatement subséquents. Il est facile aussi de s'expliquer, d'après nos théories, pourquoi les gneiss calcarifères appartiennent plus spécialement, selon les observations de M. de Humboldt, à la partie équatoriale de l'Amérique, laquelle formait alors le pourtour du premier grand soulèvement, et occupait comme aujourd'hui le voisinage de l'équateur.

Le système équatorial que nous plaçons au second rang d'ancienneté, est celui qui a fait sentir la première grande influence de soulèvement aux latitudes actuelles de l'Europe, et surtout de l'Europe septentrionale et centrale. C'est celui qui a relevé si fortement les gneiss et les schistes anciens de la Norwège, de la Finlande, de l'Écosse, de l'Angleterre, d'une partie de la France et de la Suisse, avec la direction du N.E. ou de l'E.N.E. selon la position des contrées en longitude et en latitude. La direction E.N.E. est bien connue comme caractéristique des schistes anciens en France, d'après les recherches de MM. de Beaumont et Dufrénoy, celle du N.E. en Angleterre d'après les observations de M. Sedgwick, comme elle était déjà signalée pour l'Allemagne par M. de Humboldt. Cette orientation se soutient dans les contrées septentrionales, où elle est plus prononcée peut-être encore : en Écosse, elle appartient à tous les districts granitiques et schisteux; au nord de l'Irlande, les micaschistes avec granit et quartz se dirigent au N.E., ayant à leur pied des grès pourprés plongeant au sud. En Norwège, près de Christiania, les gneiss et schistes cristallins associés au granit plongent avec une grande constance au N. N. O. et sont fortement inclinés sous les grès et calcaires à orthocères associés aux porphyres, qui sont presque horizontaux et plongent généralement au sud, (d'après

MM. de Buch, Keilhau), et la direction principale des schistes anciens en Finlande est aussi l'E.N.E., suivant les observations de M. Böhlingk.

Toutes ces directions sont celles que marque notre grand cercle en coupant ces divers méridiens; si l'on passe d'Europe en Asie, cette direction se transforme complètement et court au N.O. : or c'est précisément celle que nous retrouvons, d'après les observations des géologues et des voyageurs, dans les terrains anciens de l'Oural et de l'Altaï. C'est ce que l'on peut vérifier dans les écrits de Pallas, dans le voyage récent de MM. de Humboldt et Gustave Rose, et dans les mémoires des officiers des mines russes : on y voit que près d'Ekatherinbourg dans l'Oural, la direction des schistes les plus anciens est celle du N.O., bien que le principal alignement des montagnes soit N.S.; qu'à Tomsk et au Schlangenberg, dans l'Altaï, elle est hors 6-9. M. le colonel Helmersen, nous apprend, en outre, et c'est une observation très importante, que le terrain houiller se trouve en couches horizontales sur la pente des chaînes du Salaïr et de l'Alataou, deux branches de l'Altaï central dirigées du N.O. au S.E. : ces montagnes renferment du granit, du micaschiste, des calcaires et schistes de transition, résultat bien conforme à notre classement. Nous ne parlerons pas des directions N.-O. des grauwackes de l'Himalaya, cette chaîne ayant dû éprouver plusieurs relèvements dans cette même direction.

Nous n'avons point de données géologiques pour suivre à travers le reste de l'Asie et l'Océanie le système qui nous occupe. En pénétrant en Amérique, sa direction tend fortement vers le N.S., et je pense que l'on peut rationnellement lui attribuer l'élévation de ces chaînes méridiennes, formées de schistes cristallins et quarzeux qui, suivant M. d'Eschwege, sillonnent le grand plateau brésilien, tandis que la formation intermédiaire paraît s'étendre presque horizontalement à leur pied. Ces soulèvements avec transformation des terrains sont probablement dûs à ses fractures parallèles formées dans le plateau granitique, d'après les principes que nous avons exposés au chapitre précédent.

L'inclinaison de ce cercle équatorial sur l'écliptique est bien différente de celle du système précédent : elle a dû être nécessairement considérable, puisqu'elle n'a pu varier que de 42 à 90°. Telle est, selon nous, la cause qui a pu donner aux terrains formés pendant cette époque une différence si tranchée avec les dépôts de l'âge précédent. Ici commencent en effet les grès et les couches de charbon, indiquant l'abondance et les mouvements des eaux courantes et le développement considérable de la végétation aquatique : nous avons vu au chapitre VII que telle est en effet la conséquence locale d'une forte inclinaison de l'équateur sur l'écliptique. Le terrain de cette époque doit donc avoir bien des rapports avec le véritable terrain houiller, qui lui est immédiatement supérieur ; il a été en effet et il est probable qu'il est encore confondu en plusieurs points avec lui. Déjà les houilles des bords de la Loire ont été rapportées par M. Dufrenoy à cette époque de transition, celles du sud de l'Irlande l'ont été de même par M. Weaver, et sans doute le cercle de ces observations s'agrandira. Mais nous verrons mieux d'ailleurs ces résultats en traitant du système suivant, qui a relevé tous ces terrains. Les houilles nous paraissent appartenir à quatre époques principales, où l'inclinaison de l'équateur a dû être considérable ; nous les désignons chemin faisant.

III. SYSTÈME DES GATES, DU BOLOURDAGH ET DES MONTAGNES ROCHEUSES DU MEXIQUE.

Epoque du terrain houiller.

La ligne équatoriale qui vient se placer ici suivant l'ordre des dates est l'une des mieux accusées sur la sphère, et elle appartient à un des systèmes de protubérances les plus remarquables de la surface du globe. M. de Humbolt a déjà signalé ce grand trait caractéristique de la partie Occidentale de l'Asie, d'être sillonnée sur 1000 lieues d'étendue du nord au sud par une série de chaînes *méridiennes* qui dans toute la longueur

de ce continent s'échelonnent par ressauts comme le feraient les rejets d'un vaste filon, l'une commençant à la latitude précise où finit l'autre. Ces chaînes sont l'Oural d'une part, s'élevant sans discontinuité sur 400 lieues de longueur, et de l'autre un système discontinu mais non moins largement développé dans son ensemble, qui sous les noms de Gates, de Monts Soliman et de Bolourdagh, s'étend de l'Inde méridionale au centre du Turkestan, et jusqu'en Sibérie; cette longue bande montagneuse est même prolongée vers le Sud par l'alignement remarquable des îles Laquedives, Maldives et Chagos.

Mais cette disposition méridienne s'étend beaucoup plus loin, et j'en sache pas qu'on l'ait encore signalé : il est du plus grand intérêt d'observer en effet que l'ossature de l'Amérique du nord, dans sa partie montagneuse centrale et occidentale, est, sur une moindre échelle, d'une constitution tout-à-fait analogue à celle de la portion correspondante de l'Asie : de l'extrémité sud du Mexique une série de chaînes méridiennes s'avance par ressauts jusqu'au cercle polaire; elles sont comprises pour la plupart dans la vaste Cordillère des Rocheuses.

Or ce qu'il y a d'éminemment remarquable, c'est que ces deux immenses systèmes de chaînes méridiennes, si on les groupe largement en une seule zone, dessinent ensemble un demi grand cercle de la sphère terrestre. Non que toutes ces chaînes s'étendent mathématiquement sur une ligne circulaire, mais toutes s'y coordonnent par rapprochement et parallélisme, et la plus grande partie d'entre elles se trouve comprise sur un seul grand cercle qui des îles Maldives et de la pointe sud de l'Indostan s'étend jusqu'à l'extrémité méridionale des Rocheuses, en passant sur la crête des Gates, sur celle du Bolour, et très près de l'Oural du nord. On remarquera sans doute la manière dont l'Amérique septentrionale paraît reposer sur ce cercle central comme sur un axe de support; partout l'on verra en effet la forme et les limitations des continents se coordonner à nos cercles équatoriaux.

Sous le point de vue géologique, ce cercle devrait être sans doute un de ceux qui présentent le moins de certitude directe, puisqu'il est situé presque tout entier en dehors du domaine

des libres observations. Mais il répond pour nos régions à des caractères tellement précis, tellement remarquables, qu'il devient impossible d'établir aucun doute sur sa place chronologique : c'est l'équateur du *terrain houiller*.

Son premier caractère, celui que j'ai hâte de signaler, c'est d'avoir été nécessairement presque perpendiculaire à l'écliptique, puisque son inclinaison n'a pu varier que de 65 à 90°. Il réalise ainsi dans toute son étrangeté cette anomalie remarquable que nous avons signalée au chapitre VII, et dont nous avons cherché à conjecturer les résultats. Ces résultats se rapportent en effet avec la plus grande apparence d'exactitude avec les caractères si particuliers qui sous le point de vue géologique ou botanique distinguent éminemment l'époque des houilles; ils consistent principalement dans les effets d'une grande humidité dans l'air et dans ceux d'une rapide et forte variation des températures atmosphériques : d'où le grand développement des plantes avides d'humidité¹, le déchaînement des torrents, suite des orages, des pluies et des neiges, par conséquent l'extrême abondance des sédiments arénacés.

¹ Il peut être bon de signaler ici une conséquence à déduire de la géographie actuelle des fougères en arbre, et qui nous a échappé dans les considérations générales. Nous avons rappelé (chap. III) que ces plantes ne se rencontrent en général que *sur les plateaux élevés* de nos îles tropicales, ce dont il faut conclure qu'elles se plaisent aux agitations de l'air, que cette agitation même est nécessaire à leur développement. Or, cette condition n'était-elle pas merveilleusement réalisée à l'époque houillère, où les grandes et rapides variations locales de température devaient entretenir dans l'atmosphère de continuel et violents mouvements? Je crois cette considération importante. Elle se retrouve encore au reste dans la nature des coquilles du calcaire carbonifère : on doit y remarquer en effet l'abondance des mollusques munis de tentacules ou muscles d'attache, tels que *productus*, *spirifers*, *térébra-tules*, *encrines*, comme cela peut convenir sur des rochers fréquemment et violemment battus par le mouvement des vagues que le vent agite. J'ajoute enfin, relativement à la production de la houille même à la façon des tourbes, que c'est le mouvement des eaux et non par leur stagnation qui convient à ce procédé, ainsi que l'a remarqué M. le vicomte d'Archiac pour les tourbières du département de l'Aisne, actuellement en voie de formation : l'eau y est toujours courante et limpide.

Mais ces considérations ne sont qu'une conséquence ; la véritable raison géologique qui détermine pour nous l'âge de cet équateur, est la direction à laquelle correspond son parallélisme dans nos contrées, celle de l'O.N.O. à l'E.S.E. Cette direction est en effet celle qui dans l'Europe occidentale caractérise les relèvements immédiatement antérieurs au terrain houiller ¹.

En France, M. Dufrenoy a montré en effet que le terrain de transition supérieur de la Vendée, de la Bretagne et de la Normandie est dirigé d'une manière très constante à l'O.N.O., en discordance avec le véritable terrain houiller dont la direction comme l'inclinaison est toujours différente. Cette orientation O.N.O. se reproduit aussi dans la partie du terrain de transition nommée terrain anthraxifère, des Ardennes et du Condros, antérieurement au terrain houiller de la Belgique dirigé E.O.

D'autre part, M. Elie de Beaumont a démontré par des considérations géologiques irrécusables que le système des ballons des Vosges, qui se dirige O.N.O. à E.S.E., avait été élevé antérieurement aussi au terrain houiller. La même direction se retrouve au centre et au sud de la France, dans les schistes anciens inférieurs à ce même terrain et en discordance avec lui. Sur la lisière méridionale du grand massif primaire du Limousin on relève fréquemment cette direction dans les micaschistes qui appartiennent au pays de montagne, tandis que le terrain houiller qui s'appuie seulement sur les pentes basses, a une orientation fort différente ; et il est de même sous les grands bassins houillers plus méridionaux.

Si nous recherchons les observations faites dans d'autres contrées, nous voyons qu'au sud de l'Irlande, d'après M. Weaver, le terrain de transition se dirige E.O., en discordance avec le terrain houiller qu'il supporte, bien que celui-ci soit dirigé de même. En Espagne, M. Leplay a reconnu la direction O.N.O. dans les terrains de l'Estramadure et d'une partie du sud de

¹ Il y a un autre équateur qui correspond à la même direction, celui des Pyrénées ; mais la nature des terrains qu'il a relevés sur son contour ne laisse aucun doute sur son âge beaucoup plus moderne.

l'Espagne relevés immédiatement avant le terrain houiller. Une partie des schistes de l'Erzgebirge ¹ et de la Saxe court N.O. à S.E., supportant les assises discordantes des psammites houillers presque horizontaux. Enfin dans la Morée, suivant MM. Boblaye et Virlet, les schistes du Taygète très relevés se dirigent N.O. à S.E. antérieurement au dépôt des calcaires secondaires cristallins qui reposent sur leur tranche. Toutes ces directions, si l'on a égard à la position des méridiens, sont exactement parallèles à notre grand cercle. C'est sans doute encore à ce système de ridements qu'il faut attribuer les directions N.O. assez fréquentes dans les schistes anciens de la Norwège et de la Finlande, suivant M. Robert et d'autres géologues. A l'île d'Arran en Ecosse ², MM. Sedgwick et Murchison signalent des schistes très inclinés vers le N.N.E., dans la dépression et sur la tranche desquels s'étend un grès intermédiaire presque horizontalement.

Dans le Donetz, selon le journal des mines de Russie, la direction des roches cristallines et de la grauwacke est au N.O., tandis que celle du terrain houiller et du calcaire carbonifère superposé est généralement au N.E.

L'équateur étant très voisin de l'Oural a dû exercer une grande influence sur les directions des terrains dans cette chaîne et sur sa structure. Il y est parallèle à la direction N.S. à N 15° O. qui paraît en effet s'y retrouver fréquemment. C'est en particulier celle que l'on a observée dans le schiste talqueux et dolomitique des environs de Bissersk par 61° de lat., lequel est le vrai gisement des diamants que l'on a trouvés dernièrement dans les alluvions de l'Oural, et probablement aussi celui de l'or. Telle est encore la direction des lignes granitiques des environs de Zlataoust et de Miask ³, par 55° lat.; et il y a tout à penser que c'est en effet par les soulèvements granitiques, résultat des fractures, que le système qui nous occupe a principalement influé sur la chaîne de l'Oural.

¹ M. de Bonnard. *Essai géognostique sur l'Erzgebirge*, pages 54, etc.

² *Geolog. transact.*

³ *Journal des mines de Russie*, 1838.

Dans cette même chaîne, l'orientation des schistes talqueux et chloriteux d'abord N.O. près Ekatherinembourg, selon MM. de Humboldt et Gustave Rose, passe au N.N.O. entre cette ville et Tobolsk, et la direction du terrain de transition superposé à ces schistes cristallins, est absolument la même.

Une remarque intéressante faite par les géologues qui ont parcouru l'Oural, notamment par MM. Murchison et de Verneuil, et par les officiers des mines Russes, c'est que le terrain de transition se trouve principalement répandu sur le versant oriental de cette chaîne, tandis que le calcaire carbonifère et le grès rouge en occupent la partie occidentale : ce fait vient bien à l'appui d'un relèvement des terrains anciens vers le méridien du Bolourdagh antérieurement au terrain carbonifère.

Les montagnes mêmes qui se trouvent sur la vraie direction du grand cercle qui nous occupe sont malheureusement peu connues; cependant les Gates et la chaîne N.S. qui les prolonge entre le Malwa et les bouches de l'Indus ont été étudiées : celle-ci est composée, outre le granit, de schistes cristallins ou argileux avec des calcaires de transition, des grès et de roches de quartz, le tout dirigé N.N.O. et N.S.¹; et ces résultats s'accordent bien avec notre classement chronologique. C'est au pied et sur les flancs de ces montagnes que s'étendent ces puissantes formations basaltiques horizontales si caractéristiques de cette portion de l'Inde, mais évidemment postérieures au relèvement des Gates.

On voit aussi dans le journal de voyage de Victor Jacquemont que vers le méridien d'Agra et de Delhi, ce naturaliste a trouvé des directions N.S. bien dessinées dans des schistes talqueux et des quartz grenus, relevés antérieurement au terrain houiller qui s'étend à leur pied.

Quant aux Montagnes Rocheuses, des reconnaissances imparfaites y ont signalé des roches d'apparence ancienne avec des grès sur le flanc oriental; et tout semble indiquer jusqu'ici que leur premier relèvement est antérieur au dépôt du terrain carbonifère. Faisons remarquer aussi que dans les Etats-Unis

¹ *Annales des sciences naturelles. Tom. 1.*

la direction parallèle à ce grand cercle est N. 25 à 30° E., qui paraît être celle des principales branches septentrionales des Alleghanis et des Montagnes Bleues, dont les sommets sont formés par le terrain de transition ; le relief des branches méridionales et celui du terrain houiller paraissant se rapporter à une époque beaucoup plus récente, comme on le verra par la suite.

Ici se borne tout ce que nous pouvons avoir à dire de général sur les mouvements du sol qui ont caractérisé l'origine de l'époque houillère et qui peuvent nous servir à retrouver la place de son équateur. Sans doute dans une matière aussi vaste beaucoup resterait à dire et à faire ; je laisse à de plus érudits, je laisse aux explorations futures à compléter ces premières données : l'essentiel ici du reste n'est pas de faire une cosmologie complète, mais de réunir des faits concluants. Pour moi l'âge réel de l'équateur qui nous occupe ne peut laisser aucun doute, et l'on en verra d'ailleurs plus tard des vérifications plus sûres encore, lorsque nous traiterons d'une manière générale la question de succession chronologique. L'équateur du terrain houiller était donc bien réellement perpendiculaire à l'écliptique, et les anomalies de cette époque cesseront ainsi d'être un problème : une base au moins est posée pour leur étude. Cette époque n'est point la seule au reste où la position des grands cercles indique que cette remarquable circonstance ait pu être réalisée, et cependant c'est celle qui a fourni, dans nos contrées du moins, les entassements charbonneux de beaucoup les plus considérables ; cela tient-il à ce que seule elle ait réalisé le terme extrême de l'inclinaison ; cela tient-il à l'abondance de l'acide carbonique pendant ces premiers âges ? Peut-être à ces deux raisons ensemble.

La latitude du centre de la France à cette époque était de 36°.

IV. SYSTÈME DES ANDES DU PÉROU ET DE LA CÔTE ORIENTALE D'ASIE.

Grès rouge, grès des Vosges, calcaire magnésien.

Le renouvellement complet de l'organisation animée ou végétale à l'époque du *grès bigarré* m'avait fait penser déjà

qu'entre cette période et celle du terrain houiller, un changement climatérique extrême avait dû s'effectuer : l'étude minéralogique vient confirmer cette idée, et vient aider ainsi à fixer la trace d'une époque sur laquelle les mouvements du sol observables dans nos contrées ne sauraient fournir que peu de données.

Lorsqu'on observe au point de vue général les couches qui remplissent l'intervalle entre la formation carbonifère et celle du trias, couches peu développées du reste en étendue, on remarque que partout les grès y sont formés ou mélangés de conglomérats dont les fragments roulés atteignent une grosseur considérable, et qui provenant quelquefois des roches environnantes, ont souvent aussi été charriées de si loin qu'on ne peut conjecturer de quel terrain et de quelle contrée ils proviennent. Les principaux représentants de cette formation sont le *grès rouge* en Allemagne, le *grès des Vosges* en France, les *conglomérats rouges ou magnésiens* en Angleterre. Il est à remarquer que ces terrains s'étendent particulièrement sur la pente des massifs montagneux de cette époque : les Ballons des Vosges, les plateaux primitifs de l'Auvergne et du Rouergue, les montagnes du Hartz, de la Saxe et celles de la partie occidentale de l'Angleterre. Les strates de ces grès sont au reste presque partout peu discordantes sur celles du terrain houiller, mais elles s'en distinguent par la grosseur des fragments : la force de transport des eaux paraît y avoir été notablement augmentée, et certains blocs de grandes dimensions ne paraissent point être de ceux que les torrents ordinaires peuvent charrier¹. Cette considération m'a fait penser qu'à l'époque que ces terrains représentent, nos contrées pouvaient être assez éloignées de l'équateur pour que déjà les glaces et les neiges,

¹ Sur la pente des montagnes primitives de l'Aveyron, le terrain houiller est surmonté de conglomérats dont les fragments granitiques sont tellement gigantesques, qu'ils ne sont comparables qu'aux blocs erratiques ou diluviens des tems modernes. Ce phénomène se reproduit aussi dans les conglomérats du Devonshire où, suivant M. de la Bèche, sont mêlés des blocs énormes de porphyre et de calcaire carbonifère.

malgré le peu d'élévation des montagnes, y fissent sentir leur accroissement et leur fusion périodique; cette condition d'une latitude élevée et celle de la concordance ordinaire de stratification avec le terrain houiller sont du reste tout à fait solidaires, puisque nous savons que les ridements du sol doivent se concentrer vers l'équateur; enfin le changement d'organisation dans le passage à l'époque suivante deviendra aussi une conséquence naturelle, si cette époque subséquente doit être équatoriale.

Nous étions donc amenés à rechercher si parmi les grands cercles montagneux apparents sur la sphère, il n'en était pas un qui pût s'adapter à cette condition d'une latitude élevée pour l'Europe occidentale, sans qu'il pût convenir de la même manière à une des époques ultérieures. Il en est un en effet dont la trace est très fortement accusée dans des contrées très éloignées de la nôtre, et que tout me porte à considérer comme ayant été celui de l'époque immédiatement postérieure à la formation houillère. Ce grand cercle, dont la position donnerait au nord de l'Allemagne et de la France la latitude de 58 à 60°, s'étend uniquement sur l'Amérique et sur l'Asie; il détermine le grand allongement des deux continents de l'Amérique vers le N.O. et les trois coudes brusques que forment sur ces continents les Andes du Pérou, une partie de la cordillère de Guatemala, et enfin les montagnes Rocheuses depuis les sources du Rio del Norte jusqu'à l'extrémité de l'Amérique russe; passant de là en Asie, il y marque avec une précision singulière l'alignement de toutes les côtes orientales de cette vaste contrée, alignement répété d'une manière si remarquable dans le développement immense de toutes ces îles qui depuis l'extrémité méridionale de Bornéo jusqu'à la pointe du Kamtchatka, et même par les îles Aleutiennes jusqu'aux côtes de l'Amérique, s'étendent parallèlement au relief littoral du continent et resserrent comme dans un vaste canal les mers peu profondes de la Chine, de la Corée, du Japon, de Saghalien, d'Okhotsk et de Béring¹. Aucun équateur sans doute n'a eu sur la forme des

¹ La position de ce cercle n'est peut-être pas indiqué de la meilleure manière possible sur la mappemonde que j'ai placée à la fin du volume; une

continents et le surgissement des îles une influence aussi considérable; nous indiquerons plus tard à quoi nous pensons qu'il faut en attribuer la cause.

C'est donc en Amérique et en Asie qu'il nous faudrait chercher des preuves directes de l'âge des ridements et des éruptions de cette époque, si féconde en phénomènes volcaniques; tâche malheureusement presque tout-à-fait en dehors de la portée des observations et des explorations même. Les seuls éléments que nous puissions avoir pour chercher dans ces pays lointains la trace géologique des mouvements de cette époque, sont les relèvements du terrain charbonneux qui peuvent avoir été signalés par les voyageurs, et l'énumération n'en sera point longue. Au Pérou, M. de Humboldt cite la houille à de grandes hauteurs, et en général les grès que ce savant géologue rapporte à la période carbonifère, ou qui sont du moins superposés au terrain de transition, occupent les parties élevées des plateaux. Dans l'essai d'une carte géologique du haut Pérou qui a été donné récemment par M. A. d'Orbigny, la haute chaîne granitique de l'Illimani (7315^m), alignée suivant notre cercle équatorial, est flanquée de chaînes parallèles, qui sont rapportées au terrain carbonifère; et c'est cette même formation qui enclaverait le grand lac Titicaca, allongé dans une direction semblable. Quant aux trachytes qui forment les hautes sommités de la chaîne littorale, rien ne s'oppose à ce que leur production première ne date encore de cette époque et je suis porté à l'admettre ainsi.

M. de Humboldt donne enfin la direction N.O. comme ordinaire dans les terrains porphyriques des plateaux Mexicains, terrains à schistes calcaires et bitumineux que l'illustre voyageur classe parmi ceux de transition, mais qui pourraient

petite déviation de son plan le ferait passer exactement sur la chaîne des Andes, au centre même du bras continental qui forme l'Amérique russe, et par les deux pointes de terre qui s'avancent l'une vers l'autre au détroit de Béring. Cette disposition serait plus satisfaisante pour les yeux; néanmoins la géographie Asiatique n'est pas assez connue pour que je puisse décider ce détail de tracé; du reste quelque soit celui que l'on choisisse, l'alignement général n'en demeure pas moins évident.

toutefois appartenir à l'époque carbonifère. Telle est aussi la direction du grand filon de Guanaxuato compris dans le même terrain porphyrique. D'après le même auteur on trouverait des houilles sur le flanc des Rocheuses près des rives du Rio del Norte ; et je rappellerai à ce sujet que la présence du charbon a été récemment signalée près de l'isthme de Panama, sur le passage même de notre cercle : si l'on consultait les analogies on pourrait conclure qu'il s'en rencontre probablement aussi dans la presqu'île des Florides, qui forme une avancée parallèle à sa direction. Enfin, la direction N.O. ne manque pas non plus dans les terrains de schiste et grès des Etats-Unis, notamment en Pensylvanie et dans les Etats du Nord, bien que l'orientation la plus constante des montagnes y soit vers le N.E. En Asie, citerai-je les houilles de la Chine, et la formation carbonifère s'élevant en montagnes près de Pékin? Malheureusement les officiers russes à qui l'on doit ces observations ¹ n'ont point constaté la direction des couches. Dans les branches orientales de l'Altai, d'après M. le colonel Helmersen², la direction N.N.E, qui est celle de notre équateur dans cette partie du continent asiatique, se soutient sur de longues étendues, et ces montagnes ne renferment guères que des terrains d'un âge ancien.

Tels sont les matériaux exotiques dont je puis disposer ; ce serait peu de chose sans doute à ajouter aux inductions relatives à nos contrées, si le mode de classement par exclusion et d'autres considérations plus absolues, que nous retrouverons dans le résumé général, ne venaient y ajouter toute leur force et décider sans ambiguïté l'âge réel de cette ligne si remarquable.

Dans nos contrées ce qui signale cette époque, en outre de l'abaissement de température, c'est une grande extension des continents par le retrait des mers. La formation du grès rouge et du zechstein de l'Allemagne est en effet un dépôt des eaux douces, comme l'indiquent les restes de monitons et les pois-

¹ Journal des mines de Russie, 1838.

² De Humboldt, *Asie centrale*.

sons trouvés dans le schiste cuivreux de la Thuringe¹. Le calcaire magnésien qui caractérise cette formation en Allemagne et en Angleterre s'accorde bien pour nous avec cette donnée, car nous avons vu au Chapitre 1^{er} que ce produit devait principalement se déposer dans les lacs. Le changement de latitude ne suffirait sans doute pas pour expliquer ce phénomène de la retraite des mers, si l'on n'y joignait l'augmentation dans la vitesse de rotation du globe, qui à cette époque a pu précipiter les eaux vers le nouvel équateur; nous verrons par la suite que cette augmentation de rapidité ne saurait laisser aucun doute.

Quant à la question de savoir comment des animaux comme les monitors, qui appartiennent aujourd'hui à la zone torride, ont pu vivre à cette époque par 58° de latitude; sans nous refuser la ressource des migrations et des longs parçours, nous trouverons encore un autre moyen d'explication dans l'inclinaison de l'équateur sur le plan de l'écliptique, inclinaison qui a pu alors être très forte, puisque ses limites de variation, dont la grande étendue laisse malheureusement de l'incertitude, sont 35 et 90°. L'effet de cette particularité climatérique étant de produire, même dans les latitudes élevées, des saisons extrêmement chaudes, et aussi de remonter les températures moyennes de ces latitudes, il ne serait pas étonnant que les lacertiens en question aient pu habiter beaucoup plus loin de l'équateur qu'aujourd'hui. Les animaux de cette classe sont d'ailleurs plus propres que d'autres à soutenir des climats dont les alternatives sont extrêmes, puisqu'ils peuvent dans la saison rigoureuse se cacher dans des cavernes et y demeurer engourdis, comme les lézards des climats tempérés. Il est enfin assez remarquable que la végétation de cette époque dans nos contrées soit abondante en conifères, comme dans les latitudes septentrionales au tems actuel².

¹ Cuvier, *Discours sur les révolutions de la surface du globe*, p. 299.

² Il ne nous paraît pas impossible, vu la chance d'une forte inclinaison de l'équateur, qu'une partie des houilles de l'Amérique appartienne à l'époque du grès rouge de l'Europe occidentale.

Une particularité très importante de cette époque est l'immense développement du phénomène volcanique sur le contour de la zone équatoriale ; il indique d'après notre théorie de ce phénomène, que la formation des vallées de fracture a dû y être considérable, effet solidaire encore de l'augmentation de vitesse que déjà nous avons signalée. Nous ne voulons pas toutefois nous arrêter ici sur ce sujet, si ce n'est pour indiquer que le même effet a dû exercer une notable influence même sur nos latitudes. On sait combien la partie inférieure de la formation du grès rouge est tourmentée et modifiée par les éruptions porphyriques, combien les terrains houillers de l'Angleterre et de l'Ecosse sont accidentés par les jets, les dykes et les coulées de basalte et de whinstone ; les terrains houillers de France n'ont pas échappé non plus à cette influence volcanique, qui ne se retrouve plus au même degré dans les formations immédiatement supérieures. C'est au système qui nous occupe que je crois devoir en effet rapporter en partie ces phénomènes. Les fractures qu'il a déterminées dans nos contrées ont dû être dirigées sensiblement E.O. dans le nord de la France et de l'Allemagne, E.N.E. dans le nord de l'Angleterre : or telle est précisément la direction des principaux accidents volcaniques qui dans ces contrées caractérisent le commencement ou la durée du dépôt du grès rouge ; en Allemagne elle caractérise en effet les mouvements porphyriques de ce grès antérieurs à la formation du trias, mouvements qui ont dû avoir l'intermittence des phénomènes volcaniques et qui sans doute ne sont pas étrangers à la coloration du grès, par les émanations continues qu'ils ont pu produire. En Angleterre cette direction est celle des accidents du terrain houiller (dykes basaltiques et soulèvements), antérieurs au dépôt du calcaire magnésien, soit aux environs de Bristol, soit dans les bassins septentrionaux ; et bien que je ne veuille point attribuer à cette époque les ploiements si remarquables des terrains houillers de la Belgique, dirigés E.O., je pense toutefois que les phénomènes ignés qu'elle y a développés ont pu contribuer déjà à en élever le sol et à y déterminer une ligne de moindre résistance, où l'effort de pression d'une époque plus moderne, agis-

sant perpendiculairement à cette direction, a dû principalement trouver à s'exercer. Nous établirons bientôt la véritable place chronologique de ces grands mouvements; quant à présent les simples phénomènes ignés déterminés par les fractures E.O. du système des Andes du Pérou nous tiendront lieu de ce qui a été nommé dans la théorie de M. Elie de Beaumont *Système des Pays-Bas*, qu'il place entre le dépôt du grès rouge et celui du grès des Vosges: pour nous ces deux époques n'en font qu'une, dont les diverses parties ont pu seulement se trouver localement séparées ou modifiées par l'intermittence des éruptions.

V. SYSTÈME DE LA CHAÎNE DU KIOL, OU DE L'EUROPE ET DE L'AFRIQUE OCCIDENTALES.

Epoque du grès bigarré, du trias.

Une distinction fortement tranchée dans les stratifications sépare généralement en France, en Allemagne et en Angleterre le grès bigarré, le muschelkalk et ce que les Anglais appellent le nouveau grès rouge, de la masse des terrains inférieurs presque toujours beaucoup plus fortement tourmentés; en y joignant la considération du renouvellement complet des espèces organiques et l'apparence bien sûrement tropicale des débris fossiles de cette époque du Trias, j'ai été amené à rechercher son équateur parmi ceux qui ont marqué leur trace dans nos contrées même, qui ont traversé l'Europe occidentale. Quant à sa direction, c'était surtout dans celles qu'affectent les relèvements du terrain carbonifère et du grès rouge qu'il la fallait chercher.

Le terrain carbonifère présente dans nos contrées trois directions principales assez exclusives: la direction E.O., dont nous avons déjà parlé et qui appartient en particulier aux terrains de Belgique et du sud de l'Angleterre; puis des directions méridiennes, mais qui s'écartent sensiblement de part et d'autre de la ligne N.S.: l'une est pour la France au N. 30° O.,

l'autre est vers le N.20°E. La ligne N.S. signalée par M. Elie de Beaumont comme personnifiant pour ainsi dire le relèvement du terrain houiller au moins en Angleterre, y est fort rare dans sa rigueur absolue et ne paraît être qu'une moyenne, une résultante locale entre deux séries d'accidents qui se croisent ¹.

Parmi ces trois directions, celle de l'E.O. appartient et à l'époque dont il vient d'être question et, comme on le verra plus loin, à l'époque jurassique; celle du N. 30° O. s'est fait sentir, comme nous le dirons bientôt, dans le grès bigarré lui-même. Reste donc seulement la direction du N.N.E, qui paraît être celle en effet des dislocations qui ont immédiatement précédé l'époque du grès bigarré et par conséquent celle de son équateur.

On doit à M. Elie de Beaumont d'avoir constaté que la série remarquable des fractures qui ont formé la grande vallée du Rhin entre Bâle et Mayence, et qui ont découpé dans ses principaux traits le massif des Vosges, avait eu lieu entre le dépôt du grès des Vosges et celui du grès bigarré, lequel baigne le pied de ce massif : la direction de ces fractures est celle du N.20°E., elles dessinent un des traits les plus nets, mais un des traits seulement d'une série de dislocations ou de ridements qui ont eu l'influence principale sur les délimitations occidentales des continents de l'Europe et de l'Afrique. C'est là en effet, c'est au milieu de ces alignements que vient pour nous se placer l'équateur même de l'époque du Trias.

Ce grand cercle, auquel je donnerai le nom de la plus longue chaîne qui le caractérise, passe sur toute la ligne des monts Kiolen en Norvège, depuis le cap Nord jusqu'à l'extrémité méridionale de cette presqu'île; de là, traversant la mer du Nord parallèlement au plus grand allongement des îles Britanniques, puis la France parallèlement aux Alpes occidentales, l'Espagne parallèlement à ses côtes, il va suivre la crête de l'Atlas du Maroc et déterminer tout le relief de la côte occidentale d'Afrique; dans l'autre hémisphère il traverse des régions inconnues au-dessus du cercle polaire antarctique, mais atteignant la nou-

¹ Voir l'ouvrage de M. Murchison, *Silurian System*.

velle Zélande, il donne à son île septentrionale sa forme caractéristique et s'étend de là parallèlement à une série presque continue d'archipels, qui depuis les nouvelles Hébrides et les îles Viti, jusqu'au 20^{me} degré de lat. N. couvrent la mer de deux chaînes alignées d'innombrables petites îles. Enfin revenant au continent par la Sibérie, le même cercle prend un long rameau des montagnes d'Okhotsk et vient enfin rejoindre la chaîne du Kiol, après avoir déterminé la courbure septentrionale du demi-cercle de la nouvelle Zemble. Son contour est donc pour ainsi dire complet; cependant nous ne pouvons suivre géologiquement ce système qu'en Europe où il marque assez fréquemment la démarcation entre les terrains fortement relevés et ceux qui n'ont guère éprouvé que des inflexions médiocres.

Si nous considérons d'abord la France, c'est une chose fort remarquable que la direction N.N.E. que présentent dans leur alignement d'ensemble et dans la direction générale de leurs couches, les bassins houillers distribués sur le flanc oriental du plateau primitif central, depuis les houilles de Fins jusque vers Aurillac, sur 40 lieues d'étendue¹. Si l'on prolonge encore cet alignement vers le S.S.O., on trouvera les bassins de l'Aveyron et du Tarn, qui le continuent en s'allongeant dans la même direction; et si des modifications ultérieures ont fait à la vérité sentir leur influence dans ces derniers terrains, on y retrouve néanmoins l'orientation N.N.E. comme appartenant à des axes d'ondulation principaux. Le bassin d'Alais a aussi une direction sensiblement méridienne, tandis que ceux de Saint-Etienne, Rive-de-Gier, Autun, s'alignent en grand vers le N.E.; ils oscillent en un mot autour de la direction de notre grand cercle, qui se retrouve même très exactement dans les inflexions les plus régulières des couches du grand bassin d'Autun.

Une remarque générale est ici essentielle sur l'observation des directions. On ne saurait trop le répéter, l'indication donnée

¹ Ces résultats se distinguent bien sur la réduction de la carte géologique de France, qui est jointe au texte de MM. Dufrénoy et Elie de Beaumont; et ce texte fournit de nombreux matériaux pour l'ensemble des directions.

par la direction des couches, surtout dans un petit espace et dans un terrain tourmenté par des éruptions ignées, ne saurait avoir la précision de l'alignement des failles ou de tout un massif montagneux; les bassins houillers en particulier reposant presque tous sur des roches granitoïdes et par conséquent ayant éprouvé les soulèvements locaux de leurs massifs limités, doivent présenter dans les sinuosités de leur encaissement l'influence de l'irrégularité des masses soulevées, et l'on ne saurait tirer déduction réelle que d'un grand ensemble de faits, ou de la récurrence fréquente d'une même direction très précise; celle du N.N.E. est dans ce cas, et sa concordance avec les failles de la vallée du Rhin, dont l'âge a été clairement déterminé par M. de Beaumont, ne laisse aucun doute qu'elle ne soit caractéristique du relèvement antérieur au grès bigarré.

Parallèlement à la zone si remarquable des terrains houillers du centre de la France et pour ainsi dire sur le prolongement des failles dont je viens de parler, les Alpes nous présentent de grands accidents contemporains et semblablement alignés. La haute chaîne des Rousses, dans l'Oisans, a sa crête calminante dirigée N. 20° E., et elle a relevé, en même tems que les schistes talqueux et les gneiss, des grès anthraciteux qui se trouvent portés jusqu'auprès de sa cime, tandis que les schistes noirs du lias reposent seulement sur ses pentes moyennes et souvent avec une inclinaison médiocre. La direction de ces schistes calcaires ¹ paraît bien à la vérité être en plusieurs points la même que celle des grès, vers le N.N.E.; mais l'élévation très prédominante de ceux-ci et leur inclinaison plus considérable ne laisse aucun doute sur l'antériorité de leur soulèvement, d'où date l'élévation principale de la chaîne: les mêmes grès à anthracite, qui présentent bien les caractères et la végétation fossile du terrain houiller, se montrent en effet dans toute la portion de l'Isère voisine de ces montagnes, dirigés sur 1 à 2 heures de la boussole et fortement inclinés sous le terrain jurassique presque horizontal. Si donc sur le flanc des

¹ Voir le mémoire de M. Dausse, Société géologique de France.

grandes Rousses ce dernier terrain se trouve relevé aussi suivant la direction N.N.E., il y a les plus grandes raisons de penser que cela est dû à un surexhaussement plus moderne du massif granitique, à l'époque où non seulement le terrain du Jura mais aussi la formation tertiaire a subi de semblables ride-ments. Mais ces ridements n'eussent été sans doute que peu de chose si la résistance n'eût été brisée déjà en ces points et le terrain évidé pour ainsi dire intérieurement par les mouve-ments ignés de l'époque qui nous occupe : c'est donc réellement de l'époque du grès bigarré que doit dater le soulèvement prin-cipal des Alpes occidentales.

C'est probablement aussi à la même époque que se sont for-mées les montagnes porphyriques qui s'étendent entre la Saône et la Loire dans un alignement approchant du méridien, mais où les bandes de porphyres sont dirigées au N.N.E. Le sur-gissement de ces porphyres est d'ailleurs positivement pos-térieur au terrain houiller où l'on ne trouve aucun de leurs galets.

En Angleterre, la direction du terrain houiller la plus com-mune et la plus constante dans sa précision est encore celle du N.20°E. ; c'est le sens de l'allongement de plusieurs bassins, comme ceux de la forêt de Dean, près de Monmouth, et de Coal-brookdale, dont la description est donnée dans les transactions de la Société géologique de Londres. Dans le premier de ces bassins les couches, quoique plongeant de toutes parts vers l'in-térieur par l'action des parois encrassantes, forment en défi-nitive un long ridement synclinal dirigé N. N. E. ; dans le second les directions dominantes sont telles aussi, mais il s'y présente de plus cette particularité très importante, que parmi le grand nombre de ces failles, dont M. Prestwich a donné un intéressant catalogue, il existe une série considérable de fractures orien-tées N.N.E. *qui ne pénètrent pas dans le nouveau grès rouge.* Dans le Derbyshire les directions ordinaires paraissent osciller entre N.S. et N.N.E., en combinaison avec un axe anticlinal N.N.O.¹, qui appartient à l'époque suivante. Suivant M. Hib-

¹ Murchison, *Silurian system.*

bert les schistes anciens des îles Shetland présentent aussi l'affinement N.12°E.

Nous ne saurions suivre la trace de notre système dans la chaîne Norvégienne, ne sachant pas que l'on y ait signalé de véritable terrain houiller¹. Mais si l'on s'avance davantage vers le pôle, on trouve par 80° de latitude un des plus singuliers phénomènes de la géologie, dont j'ai déjà fait mention dans un des chapitres préliminaires : c'est un terrain houiller au milieu des glaces de Spitzberg, avec ses plantes gigantesques de la zone torride. Ce n'est pas ici le lieu de revenir sur cette particularité ; mais ce qu'il est intéressant de signaler c'est que ce terrain houiller fortement incliné a, suivant M. Robert qui l'a visité il y a quelques années, sa direction au N.E., laquelle est là précisément, parallèle au grand cercle qui nous occupe.

A la Nouvelle Zemble, dont le contour s'adapte aussi à notre équateur, on a trouvé également des couches charbonneuses.

Quant aux autres contrées que parcourt ce grand cercle, les données géologiques manquent tout-à-fait. Le continent Africain est inconnu, et sur la Sibérie tout ce que j'ai pu recueillir c'est que le grès houiller paraît être le plus moderne des terrains qui se rencontrent dans les montagnes métallifères exploitées par le gouvernement russe, et que les filons d'étain des mines de Nertschink y ont la direction du N.O. Il faut donc nous borner aux données que nous fournit l'Europe, suffisantes heureusement pour caractériser convenablement ce système.

Nous lui trouverons toutefois un autre genre de vérification dans des contrées fort éloignées, dans celles qui à cette époque devaient avoisiner les pôles, en Asie et en Amérique; ce sera la seconde application d'un principe dont nous avons fait usage déjà pour l'époque précédente, mais qui nous sera beaucoup plus utile encore par la suite. Plusieurs chaînes de montagnes en effet devaient être alors notablement élevées au-dessus du niveau de la mer, et s'il s'en trouvait parmi elles qui fussent suffisamment rapprochées du pôle, les blocs ou débris des hauts

¹ Il y en a seulement un lambeau près du cap Nord.

sommets transportés par les glaciers jusqu'au pied de ces montagnes ou charriés par les torrents qui en descendaient, ont dû y entasser soit ces grès à gros fragments que nous avons remarqués déjà dans nos contrées comme produit de l'époque précédente, ou même y déposer des fragments plus considérables, analogues à nos blocs erratiques. Ajoutons que la forte inclinaison de l'équateur (entre 52 et 90°) augmentant les variations locales de température, a dû favoriser le mouvement des glaces, particulièrement aussi augmenter la force des torrents et leur charriage. Voyons si nous ne pourrions retrouver la trace de ces phénomènes.

L'un des pôles de cette époque se trouvait placé dans la mer des Indes, par 12° lat. S., sur le méridien du cap Comorin; l'autre au Sud des côtes du Mexique, par 12° lat. N, sur le méridien de Durango. Or quelles étaient alors les terres les plus élevées? l'Himalaya oriental, les Gates, le Bolour d'une part; de l'autre les Rocheuses, les plateaux du Brésil et du Pérou. Il est donc facile de voir que les deux pôles se trouvaient à cette époque très rapprochés des hautes terres: la presqu'île de l'Inde comprise alors entre 50 et 70° de latitude, la chaîne E.O. de l'Himalaya transportée à la latitude de Londres; les Gates, le haut Pérou aux latitudes de la Norwège; l'extrémité des Rocheuses à celle du Spitzberg... Si l'on y joint l'influence d'un climat qui faisait succéder les froids extrêmes aux extrêmes chaleurs, les conditions seront éminemment favorables au mouvement des glaces et par conséquent aux entassements diluviens.

Or si nous ouvrons les écrits qui ont cité quelques traits de la géologie de l'Himalaya, en particulier le Journal de voyage de Victor Jacquemont, nous y verrons que sur toute la pente Sud de ces montagnes règne un diluvium ancien à fragments énormes, en couches inclinées superposées au terrain houiller, et qui d'ailleurs par la nature de ses galets, uniquement composés de grès quarzeux, de quartz lydien et jaspoïde, ne peut laisser aucun doute sur l'époque ancienne de sa formation¹. Jacquemont était singulièrement frappé de la physionomie de ce ter-

¹ C'est en partie le gîte des diamants. Le terrain houiller inférieur à ce diluvium est peut-être notre *grès rouge*.

rain : on serait tenté, dit-il, de le prendre pour un diluvium semblable à celui des Alpes, s'il se trouvait placé dans la plaine et horizontalement étendu. Les galets les plus gros, et il y en a d'un à deux mètres, sont à la partie supérieure; ils sont à peine cimentés et cependant se soutiennent en couches inclinées de 15 à 20°, en pente vers la grande chaîne; on les trouve à plus de 600^m de hauteur, dans les montagnes qui forment le premier plan de l'Himalaya. Si l'on est bien pénétré de l'influence indispensable des glaces pour le charriage lointain des gros blocs de rochers, et en un mot pour la formation des entassements diluviens, on ne peut hésiter à voir dans ces faits deux conséquences : la première, que la chaîne de l'Himalaya n'est pas uniquement le produit d'un soulèvement récent, malgré les calcaires coquillers que l'on y trouve à de grandes hauteurs, et qu'elle a éprouvé plusieurs exhaussements successifs dont l'un au moins est fort ancien; la seconde conséquence et celle qui nous importe ici, est qu'à une époque qui a suivi de très près le terrain houiller, cette même chaîne et le reste de la presqu'île de l'Inde ont été fortement rapprochés du pôle.

En Amérique, les savantes relations de M. de Humboldt nous fournissent des résultats analogues. Le premier il a signalé dans la région équatoriale de ce continent d'immenses formations de *grès rouge* avec conglomérats de roches anciennes dont les galets vont jusqu'à près d'un pied de diamètre. Les grès répandus sur une portion du Pérou, de la nouvelle Grenade, du Venezuela, du Mexique, couvrent dans ces contrées les espaces les plus étendus que présente nulle part une formation semblable, elle atteint une puissance de 4 ou 5000 pieds et se trouve portée à des hauteurs de 3600^m. Les galets ou fragments anguleux sont de lydienne, syénite, porphyre, quartz et silex; et l'âge ancien de ces conglomérats ne paraît point douteux¹. Comme le grès rouge d'Allemagne et le grès des Vosges, cette

¹ Il faut lire la description de ce grès remarquable dans les écrits de M. de Humboldt et en particulier dans *l'Essai sur le gisement des roches dans les deux hémisphères*, Pages 214-230.

formation ne présente pas de fossiles, mais quelques végétaux, des troncs de monocotylédones. M. de Humboldt assimile donc ce terrain au *grès rouge* d'Europe qui d'après ses idées serait contemporain de la formation houillère; pour moi je suis disposé à croire le terrain d'Amérique un peu plus récent, mais comme la haute latitude de ces régions pendant le dépôt a dû produire une concordance avec le dépôt inférieur ainsi que dans le grès rouge d'Europe, et que d'ailleurs pendant cette dernière époque il a pu se déposer des houilles en Amérique, l'analogie de position est évidente et doit produire une apparence d'exacte similitude : c'est par un hasard singulier et par cette circonstance de deux équateurs perpendiculaires l'un sur l'autre, que la succession des terrains se trouverait ainsi comme identifiée dans les deux hémisphères malgré l'intervalle d'une époque. Quoi qu'il en soit, les conditions climatiques qui ont pu présider à la formation de ces grès d'Amérique ne sauraient être différentes de celles qui ont pu produire en Europe les grès intermédiaires entre le terrain houiller et le trias, si ce n'est que l'énergie glaciale à dû s'y trouver plus considérable encore; et là comme dans l'Inde la proximité du pôle nous paraît signalée par les grès diluviens d'une manière irrécusable.

Si nous recherchons maintenant les conditions climatiques de nos régions pendant cette période, c'étaient celles d'une contrée équatoriale avec une inclinaison de 50 à 90° de l'équateur sur l'écliptique; l'apparence tropicale de la végétation et des fossiles et la présence même de quelques couches de houille n'ont donc rien qui doive surprendre. Peut-être un jour des considérations précises sur ces restes organiques donneront-elles une indication plus approchée sur la loi de ce climat dont les limites de variation données par l'inclinaison seule sont encore trop étendues pour que l'on en puisse tirer une conséquence caractéristique. Passons donc à une autre particularité.

La position presque perpendiculaire de l'équateur du grès bigarré relativement à celui de l'époque précédente indique un notable ralentissement dans la vitesse de rotation de la terre; les eaux ont donc dû tendre à rester éloignées de nos régions, devenues équatoriales, par la raison contraire à celle qui les en éloi-

gnait à l'époque du grès rouge : la grande étendue des terres et l'existence des grands lacs où se sont déposées les couches de sel gemme qui caractérisent cette formation, s'expliqueraient donc ainsi facilement. Quant à cette concentration périodique des lacs salés, cause immédiate des grands dépôts de sel, la température équatoriale, avec les assèchements accidentels qui en sont la suite, est bien suffisante pour en rendre raison.

VI. SYSTÈME DES MONTS LUPATA ET DE L'OURAL MÉRIDIONAL.

Epoque du terrain jurassique.

L'alignement remarquable de la côte orientale d'Afrique parallèlement à la chaîne des monts Lupata ou de l'Épine du monde, et à celle qui forme l'axe de Madagascar, indiquait clairement la trace d'un équateur, qui aurait déterminé la direction linéaire de ces ridements accumulés.

Si l'on remarque d'autre part que la chaîne de l'Oural forme vers 55° de lat. un coude assez prononcé, et que tandis que sa partie septentrionale se dirige vers le N. 10 à 15° O, ses branches méridionales tirent au contraire vers le N.N.E. par bandes parallèles ou échelonnées, on verra que cet alignement peut se joindre à celui des Lupata et former ainsi un grand cercle qui de l'extrémité méridionale de l'Afrique irait joindre l'extrémité la plus orientale de l'Asie en déterminant, outre la direction de l'Afrique orientale et d'une portion de l'Oural, celle de la côte N.O. de la Russie asiatique, des trois îles alignées de la nouvelle Sibérie et des terminaisons de l'Asie et de l'Amérique près du détroit de Béring. Quant au reste de ce cercle, il est caché par les eaux, cependant on peut voir qu'au milieu de l'Océan équinoxial, à peu près à l'extrémité du diamètre qui aboutit à Madagascar, il détermine encore l'alignement des îles Marquises et de toute la limite orientale du vaste archipel des îles Basses.

C'est à l'époque jurassique que j'ai cru devoir rapporter l'existence de cet équateur, et la raison en est que dans mes

observations particulières la direction N 30° O m'a paru être, en France, caractéristique des relèvements propres au grès bigarré, immédiatement antérieurs au dépôt du lias et de l'oolite. C'est le même âge que celui du soulèvement que M. Elie de Beaumont caractérise par la direction O. 40° N. sous le nom de Système du Thüringerwald et du Morvan.

La position de ce grand cercle sur la sphère ne nous laisse point place à des vérifications nombreuses sur son contour même. Ni l'Afrique, ni le nord de la Sibérie n'ont été explorés; l'Oural seul, quoique peu étudié dans ses détails, peut nous offrir d'utiles inductions. Cette chaîne, que l'on a comparée à une longue muraille élevée entre les vastes plaines de la Russie et de l'Asie septentrionale, est toutefois moins simple dans sa structure que n'avait pu le faire penser l'immense alignement méridien qu'elle présente dans sa masse générale. Nous y avons vu déjà des directions entre le N.O. et le N.S. dans les terrains anciens; dans la partie méridionale les directions tendent au contraire vers le N.E. sinon toujours dans l'alignement des crêtes granitiques, qui conservent parfois la direction méridienne parallèle à la ligne du Bolour, mais du moins dans celui des roches plus modernes, comme par exemple les schistes talqueux avec calcaire et brèches¹, que l'on y trouve entre 53 et 56° lat. et qui paraissent être voisins de l'époque carbonifère. MM. de Humboldt et G. Rose, dans leur voyage récent à l'Oural, ont aussi constaté le changement de direction du N.S. pour le N.E. vers le 56° de latitude.

Ce qui est parfaitement certain, c'est que le terrain jurassique s'étend horizontalement au pied de l'Oural, sans y avoir subi aucun relèvement, et que c'est à lui seulement que commence cette immobilité. On peut voir en effet dans les relations de M. de Verneuil², que tous les terrains antérieurs à l'oolite participent plus ou moins aux mouvements qu'ont déterminés les divers surgissements de la chaîne ouralienne; et en particulier l'on peut citer parmi eux un grès cuivreux, gypsifère,

¹ Journal des mines Russes, Mémoire de M. Lissensko.

² Bulletin de la société géol. de France, 1840.

avec restes de sauriens, qui paraît avoir beaucoup d'analogie avec le grès bigarré. Si toutefois il arrive que la direction méridienne se rencontre partiellement dans ces terrains soulevés les plus récents, au lieu du N.N.E. que nous donnons comme celle de leur soulèvement réel, il ne faut pas je pense en faire un argument irrésistible contre notre classement : la direction N.S. à N.N.O. des cimes granitiques antérieurement élevées, a dû sans nul doute déterminer dans les ridements ultérieurs un alignement factice dont on doit retrouver çà et là, l'empreinte, et c'est un phénomène qui s'est certainement souvent présenté dans la suite des révolutions. Si nous avions voulu prendre au reste cette direction méridienne comme réellement caractéristique du dernier soulèvement de l'Oural, il y avait moyen d'y coordonner la direction d'un grand cercle, dont on aurait fait passer le prolongement sur Madagascar, et cela donnait alors pour la France la direction O. 40° N., admise par M. de Beaumont; mais je ne crois pas qu'il en soit ainsi : les directions que j'ai observées dans le grès bigarré et qui sont particulières à ce terrain, m'ont toujours donné pour moyenne le N. 25 à 30° O., spécialement dans le Limousin, l'Aveyron et le Tarn, où ces directions sont fréquentes et paraissent avoir accompagné des éruptions ignées de serpentine¹, porphyres, etc.; le terrain houiller en Vendée et le grès bigarré en Bourgogne se rapprochent aussi de cette direction sous les strates jurassiques horizontales. En Angleterre, d'après M. Murchison, les axes de soulèvement trappeens des bassins de Dudley, Lickey, Nuneaton, sont vers le N.N.O., et ce qui est à remarquer, l'auteur cite dans cette même direction la grande faille de Craycombe qui traverse les Marnes irisées (red marl).

En France et en Angleterre au reste, contrées déjà notablement éloignées de l'équateur, les dislocations produites par ce système doivent dépendre surtout des fractures et des phénomènes ignés que celles-ci ont développés. C'est particulièrement

¹ La direction N. O. des éruptions de serpentine mérite d'être remarqué par sa généralité dans l'Europe occidentale; je la crois liée à la nature des terrains modifiés par les fractures de cette direction, les calcaires des deux époques du grès rouge et du grès bigarré étant généralement magnésiens. Cette

la première époque des serpentines, et cette circonstance est remarquable pour la théorie des roches ignées de transformation.

La direction du N.O. est celle du muschelkalk de la Thuringe; en Espagne, M. Leplay signale des ridements très marqués dirigés à l'O 72° N. postérieurs au terrain houiller. En Grèce ce système donnerait l'orientation N.S., et il y a pour moi une grande probabilité qu'il a contribué notablement au surgissement des chaînes méridiennes de Morée (Taygète) qui vont s'avancant jusqu'au cap Matapan et paraissent avoir relevé des calcaires d'âge moyen, d'une époque peu supérieure au terrain de transition. Enfin en Corse la direction N.N.O. qu'il détermine paraît avoir eu une grande influence sur le relief général, et en particulier sur celui des terrains intermédiaires traversés par les serpentines.

Les régions sur lesquelles on peut suivre géologiquement l'équateur jurassique sont malheureusement très bornées, mais la considération des contrées polaires vient ajouter ici, comme dans le système précédent, tout l'intérêt d'une apparente anomalie. On n'a rien rencontré en effet dans l'Amérique du sud qui pût rappeler la formation oolitique d'Europe; or précisément l'un des pôles vient tomber près de cette contrée, près de l'embouchure des Amazones, par 55° long. O. et 6° lat. N. Le dépôt formé à cette époque sur les parties actuellement tropicales de l'Amérique a donc dû être encore ce que nous l'avons vu à l'époque précédente, un dépôt d'apparence diluvienne; et sans doute la période qui nous occupe a dû fournir la plus grande partie des grès du Pérou comme la précédente avait dû fournir ceux de la Nouvelle-Espagne. Il y a du reste d'autant plus de raison à l'isolement de ces grès et à l'absence des calcaires, que l'accroissement de la vitesse de rotation devait alors faire émerger les pôles hors du niveau des eaux marines par l'afflux de ces eaux vers l'équateur.

relation se concevra si l'on se reporte aux théories du chapitre précédent. Les mélaphyres qui accompagnent assez souvent la serpentine, les grès rouges ou la dolomie et qui sont caractérisés par un feldspath à base de soude, paraissent liés aussi à la formation salifère.

Un des principaux traits en effet de la formation jurassique en Europe me paraît être l'envahissement des terres par une grande masse d'eau et l'exhaussement général des mers. Dans les époques que nous venons de parcourir le développement des continents est indiqué par l'étendue et la généralité des couches arénacées et par l'existence des lacs ou mers intérieures où se sont déposés les bancs de sel et les gypses ; la superposition des puissantes couches de calcaire marin de la formation oolitique signale donc l'existence de la haute mer aux mêmes lieux où s'étendaient les terres auparavant : un semblable phénomène ne saurait s'expliquer, dans nos idées, que par une augmentation dans la vitesse de rotation du globe, qui a fait refluer les eaux des pôles vers l'équateur ou vers la chaîne de l'Oural. Les contrées centrales de l'Europe n'ayant pas éprouvé un très notable changement de latitude, le surexhaussement du niveau des mers a dû s'y faire fortement sentir, et quoique le sol de la France passât d'une position équatoriale à la latitude de 30° , il en a aussi éprouvé les effets, comme on le voit par la grande extension des calcaires jurassiques qui viennent souvent porter à nu sur le granit lui-même et forment partout des plateaux élevés, indicateurs de l'ancien niveau des mers. La position relative de l'équateur qui nous occupe et la disposition de ses montagnes sont d'accord avec ces conclusions et indiquent bien en réalité un accroissement dans la vitesse de rotation à l'époque de l'oolite, comme nous le montrerons plus tard.

Quant à l'inclinaison sur l'écliptique elle n'a pu être que considérable, puisque comme dans le système précédent elle a dû être comprise entre 52 et 90° . Cela explique au reste merveilleusement le rapport général qui existe dans la nature des fossiles entre l'époque du grès bigarré et celle de l'oolite ; mais dans ces deux périodes l'inclinaison de l'équateur n'a pu guère néanmoins s'approcher de la valeur qu'elle devait avoir à l'époque houillère, car il existe une notable différence entre leur végétation et celle de cette époque exceptionnelle.

Un naturaliste anglais, M. Owen, a fait un ingénieux rapprochement de la faune et de la flore jurassique avec celles de l'Australie, où habitent maintenant des marsupiaux, où végètent des

araucaria et des cycadées et où des poissons du genre acrodus (dont les dents se rencontrent dans l'oolite) se nourrissent actuellement de térébratules et de trigonies. Si l'on y joint la configuration du ptérodactyle, cet amphibie volant de l'époque jurassique, que l'on a rapproché de l'ornithorinque pour l'association anormale des caractères zoologiques, les relations deviennent réellement frappantes entre l'histoire naturelle de l'Europe pendant cette période et celle de l'Australie au tems où nous vivons.

Ce rapprochement n'a rien de très surprenant d'après nos résultats, car les circonstances climatériques devaient être peu différentes. Le grand exhaussement du niveau des mers, prouvé par la grande extension des calcaires marins de l'époque jurassique, devait réaliser en effet pour les terres alors disséminées sur la surface de l'Europe cet isolement au milieu d'un vaste Océan qui a sans doute une si grande influence sur la climatologie australienne; de plus les latitudes étaient sensiblement les mêmes, et si la différence d'inclinaison de l'équateur sur l'écliptique et la translation du tropique vers le 30^e ou 60^e degré de latitude devait apporter quelque modification dans le climat, c'est précisément sur la latitude de 30^o que cette modification devait se faire le moins sentir.

VII. SYSTÈME DU CAUCASE, DES ALPES ORIENTALES, DE SUMATRA ET DE LA COLOMBIE.

Epoque du grès vert, terrain crétacé inférieur.

La chaîne des Alpes, comme la plupart des hautes chaînes du globe, porte l'empreinte du croisement de deux directions principales de soulèvement. Du Saint-Gothard qui forme comme le nœud de cette chaîne, elle étend ses deux bras, l'un vers l'est, l'autre vers le sud, et enclave ainsi comme dans le demi-cintre d'un vaste amphithéâtre les plaines du Piémont et de la Lombardie.

Cette disposition savamment analysée par M. Elie de Beaumont dans ses *Recherches sur quelques-unes des révolutions de la surface du globe*, lui a fourni l'une des plus remarquables applications de son système des soulèvements alignés, en lui faisant considérer les deux portions linéaires de cette grande chaîne comme soulevées à des époques géologiques distinctes.

Néanmoins nous ne saurions rapporter à deux époques aussi modernes que l'a fait ce savant géologue les deux soulèvements caractéristiques des Alpes. Sans nier qu'à des périodes très récentes ce massif ait subi de remarquables exhaussements, nous pensons que les directions déterminantes et les élévations premières, principales, lui ont été données à deux époques moyennes, époques où l'équateur du globe passait précisément sur le sol de la France. L'une de ces directions, que nous connaissons déjà, celle du N. 20° E. est celle de l'équateur de l'époque du Trias; l'autre, qui n'avait pas encore été signalée comme caractéristique des grands mouvements dans les Alpes, est de l'O. à l'E. ou plutôt à l'E. 5° N. : elle appartient à l'équateur de l'époque du grès vert, de celle qui a immédiatement suivi le dépôt du terrain jurassique.

J'ai longtemps cherché une direction qui fût, dans nos contrées, caractéristique des soulèvements de la formation oolitique immédiatement après son dépôt¹; un grand ensemble de faits concordants, et de puissantes considérations propres à notre système, nous ont arrêté enfin à celle de l'E. 5° N.

¹ La direction du N.E. ne nous paraît pas pouvoir être regardée comme caractérisant le soulèvement immédiat du terrain jurassique : dans le Jura français le terrain néocomien ou crétacé inférieur est relevé suivant cette direction en *concordance* avec l'oolite. (Voir un mémoire de M. Thirria, *Ann. des mines* 3^e sér. t. X), et la même circonstance se présente en Angleterre dans les couches concordantes de l'oolite et de toute la série crétacée. (Voir l'ouvrage du Dr. Fitton), notamment près d'Oxford et dans le Dorsetshire. Dans les Pyrénées la direction N.E. appartient aussi au terrain de craie, particulièrement au pied du Mont-Perdu, dans le cirque de Gavarnie.

Des inclinaisons discordantes avec direction semblable peuvent bien indiquer une superposition de mouvements identiques à deux époques diverses, mais une concordance parfaite n'indique qu'un mouvement, postérieur au dernier des terrains soulevés.

C'est suivant cette direction en effet que sont relevées, dans les Alpes orientales, les hautes crêtes et les puissantes masses de ce calcaire *alpin*, qui est reconnu maintenant pour appartenir au groupe de l'oolite; masses déjà fortement soulevées lorsque sont venues se déposer sur leurs flancs les couches crétacées et tertiaires ¹. Si dans les derniers âges du terrain tertiaire un mouvement à peu près semblablement orienté (E.18°N.) s'est fait de nouveau sentir dans ces montagnes, et d'autant plus fortement en raison du parallélisme même, cela ne saurait détruire à nos yeux le fait du surgissement antérieur du calcaire jurassique suivant la direction de l'E. à l'O. Cette orientation E.O. se retrouve partout, pour le terrain dont nous parlons, dans les Alpes et les contrées voisines: c'est celle qui est signalée par M. Studer pour les calcaires de cette formation dans les Alpes de la Suisse, aux environs du lac de Thun; elle existe aussi sur la pente italienne, au lac de Côme; elle est indiquée par M. de Humboldt dans le Vicentin, par M. Boué dans les Alpes de Venise, et dans cette dernière contrée les couches tertiaires s'étendent horizontalement au pied de l'oolite fortement relevée. Aux Pyrénées on retrouve la même direction de l'E. 5° N. très nettement accusée dans les couches jurassiques: c'est elle qu'affectent sur un assez long espace les calcaires modifiés et si étrangement tourmentés dont j'ai signalé déjà les ondulations (planche 1^{re}); de là on peut la suivre prolongée dans les Corbières et même jusqu'auprès de Narbonne. Elle s'observe encore dans les couches oolitiques des environs d'Aix, dans le plateau du Larzac (Aveyron) et aussi dans ces plateaux jurassiques qui s'étendent entre l'Angoumois et le Poitou et qui forment la démarcation entre les bassins crétacés du nord et du midi de la France, bassins qui ont dû être originairement séparés.

Mais c'est surtout dans la chaîne du Jura suisse que la direction E.O. se montre caractéristique de la formation de l'oolite, qui y est seule et fortement relevée, ayant à ses pieds et seule-

¹ Voir le mémoire et les coupes de MM. Sedgwick et Murchison, *Eastern Alp. Géolog. transact.* III^e série, t. 3.

ment au niveau des lacs le terrain crétacé inférieur et la molasse tertiaire, tandis qu'au dessus les chaînes du Mont-Terrible et du Chasseral prolongent de l'E. à l'O. la direction générale de leurs crêtes et celle de leurs couches ¹. La chaîne du Jura présente en effet dans sa masse entière une inflexion brusque comme celle des Alpes : à la hauteur de Bienne, elle quitte la direction du N.E. et du N.N.E., qu'elle affectait à l'O. des lacs de Genève et de Neuchâtel, pour prendre une direction orientale; et ce coude se retrouve partout dans cette région des Alpes : il se retrouve dans l'infléchissement du lac de Genève et dans l'alignement du Jorat; dans l'angle brusque que forme le cours du Rhin entre Bâle et le lac de Constance, enfin dans les montagnes de la Forêt-Noire, qui s'étendent sur la rive droite de ce fleuve, parallèlement à son cours.

Passons maintenant à des contrées beaucoup plus éloignées. Un voyageur qui a parcouru récemment avec une ardeur infatigable les contrées caucasiennes. M. Dubois de Montpéroux, a placé le soulèvement caractéristique de la grande chaîne du Caucase, celui qui s'harmonise avec la direction la plus générale de toute sa masse, c'est-à-dire de l'O.N.O. à l'E.S.E., il l'a placé immédiatement après le dépôt de la formation du Jura ; il a pu suivre en effet les axes de ridements de cette formation depuis les bords de la mer Caspienne jusque vers les marais de Pinsk, près des confins de la Pologne, et il les a trouvés semblablement dirigés partout où ils n'ont pas été modifiés par les soulèvements volcaniques très modernes qui ont si fortement accidenté la masse centrale du Caucase.

Or si maintenant nous venons à joindre par un arc de grand cercle l'axe principal de la chaîne du Caucase avec cet alignement E.O. du Jura Suisse, du Rhin et de la Forêt-Noire, nous verrons le prolongement de ce grand cercle se coordonner pour ainsi dire sur tout son contour aux accidents linéaires les plus remarquables. Passant en effet parallèlement à la grande chaîne N.O. de l'Himalaya, il s'étend avec une précision merveilleuse

¹ Voir le mémoire de M. Thurmann, *Essai sur les soulèvements jurassiques du Porentrui*.

sur toute la longue île de Sumatra avec laquelle s'aligne encore la langue de terre voisine, la presqu'île de Malacca; puis il vient déterminer le ceintre des côtes méridionales de la Nouvelle-Hollande et même en partie l'inflexion de ce continent tout entier; enfin atteignant l'Amérique équinoxiale il y trace l'une des chaînes côtières les plus remarquables de cette vaste presqu'île si linéairement, si géométriquement terminée de toutes parts, il y trace en un mot l'allongement de la vaste cordillère qui s'étend de Quito à Caracas, formant un angle droit avec celle des Andes du Pérou.

Pourrait-on voir plus merveilleuse série d'alignements coordonnés à un même contour circulaire? Les Alpes, le Caucase, Sumatra, l'Australie, les Andes de la Colombie! Aussi semblerait-il qu'il doit suffire d'en présenter l'ensemble, et c'est comme à regret que nous redescendons de ce vaste point de vue à l'examen de quelques détails.

En France la direction de cet équateur a déterminé, outre les chaînes de montagnes dont nous avons parlé, l'exhaussement du plateau jurassique de Langres et d'une partie des Vosges, les petites chaînes E.O. de la presqu'île de Bretagne et les déviations de deux grandes vallées, celle du Rhin entre Constance et Bâle, celle de la Loire entre Tours et la mer; il faut y joindre aussi l'échelonnement du long cours du Danube à travers toute l'Allemagne, depuis sa source jusqu'au retour d'équerre qu'il forme à la hauteur de Bude; et enfin il y a lieu sans doute d'y rattacher une grande partie des accidents de la chaîne des Carpathes. Tous les terrains antérieurs à l'oolite ont éprouvé aussi plus ou moins l'influence de ce grand mouvement, depuis l'Océan jusqu'au Caucase: c'est cette influence qui a ployé dans la direction de l'E. à l'O. les terrains charbonneux des bords de la Loire, entre Nantes et Angers; la formation houillère de Belgique, antérieurement au terrain crétacé; le Muschelkalk, le Keuper et l'oolite de la Haute-Saône; les schistes cuivreux du Mansfeld et les couches carbonifères déjà volcanisées dans le sud de l'Angleterre et de l'Irlande. Les grandes fractures perpendiculaires au méridien qui traversent le centre des mêmes contrées accompagnées de dykes et d'érup-

tions basaltiques, sont sans doute en partie de même époque : ainsi ces nombreuses lignes qui traversent les comtés de Mayo et Sligo en Irlande sur 25 lieues de longueur avec un irréprochable parallélisme ; ainsi la grande faille de Newcastle-upon-Tyne qui plongeant vers le N., abaisse de 180^m le terrain carbonifère, le calcaire magnésien et le grès bigarré. Dans les terrains jurassiques du sud de la France les failles E.O. non plus ne sont point rares et elles se coordonnent avec les brusques alignements de plusieurs rivières à leur passage dans ce terrain, comme la Vézère, le Lot, l'Aveyron, le Tarn.

Dans les contrées trans-océaniques peu d'observations certaines nous sont offertes : nous avons dit que dans l'Amérique méridionale le calcaire jurassique paraissait manquer ; mais M. de Humboldt nous montre les grès, qui pour nous le remplacent, s'infléchissant en forme de bateau entre les deux chaînes de la Parime et de Caracas, toutes deux orientées du N.E. au S.O. L'Australie et Sumatra sont inconnues ; dans l'Himalaya l'on peut citer seulement la direction N.O. dans un terrain calcaire qu'on a trouvé analogue par ses fossiles à notre formation du Jura, et cette circonstance ne doit pas étonner, puisque l'Himalaya se trouvait par rapport à l'équateur ouralien à une latitude identique avec celle du sol de l'Allemagne.

Le grand développement des montagnes de cette époque et la position du grand cercle, perpendiculaire à celle de l'Oural et des Lupata, viennent y témoigner d'un remarquable ralentissement dans la vitesse de rotation de la terre, et il est naturel dans ce cas que des contrées qui comme les nôtres étaient déjà assez voisines de l'équateur, se trouvent abandonnées par les eaux dans leur reflux vers les contrées polaires. Aussi ne serons-nous pas étonnés si aux calcaires marins de l'Oolite, en Angleterre et en France, se superpose un dépôt des eaux douces, celui des Wealds, et si aux puissantes masses calcaires succède sur toute l'Europe une formation arénacée, le *grès vert*, que nous croyons devoir réunir au calcaire néocomien, aux Wealds et enfin suivant toute probabilité aux dolomies qui surmontent le terrain jurassique sur certains points de l'Allemagne (Eichstoedt, Solenhofen), car elles indiquent toujours selon nous

des lacs salés ou mers intérieures¹. Dans l'Amérique équinoxiale au contraire, dont la position était polaire à l'époque précédente avec une grande rapidité de rotation, on conçoit que la position équatoriale, même avec ralentissement, ait pu ramener les eaux marines et par conséquent les calcaires : la formation crétacée y est en effet fort étendue.

Dans ces contrées éloignées la considération des fossiles fournit enfin des rapprochements de latitude de la plus grande importance. Sur l'examen des collections de M. de Humboldt, M. de Buch avait depuis longtems indiqué la présence du terrain crétacé dans l'Amérique du Sud : une étude plus détaillée faite par M. A. d'Orbigny sur les fossiles recueillis par M. Boussingault dans les mêmes contrées, et l'examen par M. Dufrenoy de ceux qui ont été envoyés du Chili, non seulement ont confirmé cette conjecture, mais l'ont précisée de la manière la plus remarquable. Sur 43 variétés d'espèces fossiles qui ont pu être déterminées dans la collection, M. d'Orbigny en a trouvé 29 qui lui paraissent avoir quelque rapport avec les espèces crétacées françaises, *et sur ces 29 espèces il y en a 23 qui appartiennent à l'étage inférieur, au calcaire néocomien*. M. d'Orbigny en conclut avec juste raison que la température, le climat, étaient les mêmes alors dans l'Amérique équinoxiale qu'en France et en Angleterre. D'autre part M. Dubois de Montpéreux, qui avait spécialement étudié le terrain néocomien en Suisse, a été vivement frappé d'en retrouver au Caucase toutes les divisions et tous les fossiles.

Or que seront pour nous tous ces mystères climatiques, si surprenants dans les théories ordinaires? Ne sera-ce pas une déduction toute naturelle, celle de l'identité des espèces vivantes à des latitudes identiques, sur les divers points d'un même équateur?

L'inclinaison de cet équateur sur le plan de l'écliptique a dû être comprise entre 32 et 80°, de sorte qu'on ne peut conclure

¹ La stature gigantesque des reptiles et sauriens qui ont laissé leurs débris fossiles dans tous ces terrains ne serait-elle point aussi liée à ce grand ralentissement du mouvement diurne de la terre?

autre chose, sinon qu'elle a dépassé notre inclinaison actuelle, sans atteindre toutefois aux dernières limites. Tout porte à penser néanmoins qu'elle n'a point dû dépasser les valeurs moyennes : l'absence des mammifères semble bien indiquer il est vrai une notable différence climatérique avec notre époque, mais les espèces végétales d'autre part ne s'éloignent pas assez de notre flore tropicale actuelle pour faire supposer que cette différence ait pu être poussée jusqu'à l'extrême, comme dans le terrain houiller par exemple.

L'un des pôles de l'époque qui nous occupe était au milieu du grand Océan, l'autre à l'extrémité de l'Afrique, à 300 lieues du cap de Bonne-Espérance, par 40° lat. S., 7° long. E. Il doit y avoir d'après cela quelque trace de diluvium ancien dans la région du Cap.

VIII. SYSTÈME DE LA GUINÉE MÉRIDIIONALE, DES ILES CANARIES ET DU

HAUT CANADA.

Epoque de la craie.

Les deux étages du terrain crétaqué, quoiqu'ils ne soient pas séparés dans nos contrées par de violents mouvements, sont cependant distincts, non pas tant peut-être par la nature des fossiles, qui n'est pas complètement différente, que par la nature minéralogique des roches : l'étage inférieur généralement arénacé indique, comme nous l'avons vu, un grand développement des continents en Europe et un ralentissement dans le mouvement de la terre : la craie blanche au contraire, formation presque uniquement calcaire, indique des eaux profondes et étendues, par conséquent une accélération, si nos contrées sont demeurées voisines de l'équateur.

Quant à la direction de ce mouvement, le terrain crétaqué inférieur est si fréquemment dirigé au N.O. (dans les bassins du sud de la France, en Vendée, au nord de Paris, en Angleterre, en Italie, dans les Alpes occidentales, en Grèce), qu'il nésaurait

y avoir d'hésitation. Dans le bassin au nord de Paris le grès vert a d'ailleurs cette direction sous la craie sensiblement horizontale, et il en est de même en certains points de l'Angleterre ¹. M. Elie de Beaumont qui le premier a distingué systématiquement ces deux époques dans nos contrées en les séparant par des mouvements du sol, a donné à ces dislocations la direction du N.N.O., sous le nom de *Système du Mont-Viso*. Je crois que la direction moyenne se rapproche sensiblement davantage du N.O.

J'ai été conduit à rapporter ces mouvements du grès vert à un équateur peu apparent il est vrai, mais clairement indiqué toutefois sur la sphère et nécessaire pour y compléter la configuration des continents. Ce grand cercle traverse du N.O. au S.E. tout le continent Africain dans son plus long développement et parallèlement aux lignes volcaniques des Canaries et des Açores; il détermine les alignements méridionaux des côtes de l'Australie, de la nouvelle Zélande et enfin l'allongement de l'Amérique du nord dans la direction de l'E. à l'O., en passant sur l'alignement la côte de Terre-Neuve, des chaînes du Canada, des grands lacs et d'une branche transversale des Rocheuses au Mont Bighorn. La place réelle de cette ligne n'est pas néanmoins pour moi bien certaine, il se pourrait qu'il fallût faire tourner son plan autour d'un diamètre qui passerait par les montagnes du Congo et le faire ainsi d'une part baisser jusqu'à la Sénégambie et aux Alleghanis du sud, de l'autre remonter jusqu'aux côtes de la terre de Nuyts dans l'Australie, dont il traverserait ainsi le continent dans sa plus grande longueur; peut-être même faudrait-il l'orienter un peu différemment encore: mais quoi qu'il en soit, la position plus ou moins précise de cette ligne est néanmoins indiquée avec une évidence très grande par la direction des côtes S.O. du continent Africain, par le remarquable allongement E.O. de la nouvelle Hollande et de la nouvelle Zélande, enfin par toutes les chaînes E.O. de l'Amérique du N., et sur ce fait d'ensemble il ne saurait exister aucun doute.

¹ Ile de Wight. Dr. Fitton, *Géologie du S. E. de l'Angleterre.*

L'équateur dont nous parlons traverse des contrées à peu près totalement inconnues. La direction E.O. est donnée toutefois¹ comme ordinaire dans les calcaires des bords du golfe Saint-Laurent au Canada. Dans nos contrées nous avons cité déjà d'une manière générale les accidents auxquels il répond, et qui pour lui être parallèles doivent se coordonner en moyenne à la direction du N. 38° O. pour la France et pour l'Angleterre. En Grèce le même système répond à la direction du N.N.O. et telle est en effet celle d'une des lignes montagneuses les plus prononcées de ce pays, que MM. Boblay et Virlet ont désignée sous le nom de Système Pindique, et dont ils placent le soulèvement après la période crétacée inférieure.

Les directions qu'il détermine en France et en Angleterre sont du reste peu différentes de celles qui s'y rapportent au système de l'Oural et des Lupata, et peut-être aurait-on pu hésiter entre ces deux lignes pour l'ordre chronologique, sans la considération relative à l'horizontalité de l'oolite sur les pentes de l'Oural, et sans celle que suggère la disposition générale des montagnes sur les deux lignes, considération sur laquelle nous appuierons plus tard. Mais il est bon de remarquer encore que le système qui nous occupe doit, comme celui de l'Oural, avoir été surtout sensible en Europe par les *fractures* et les phénomènes ignés qui en dérivent².

Quant aux conditions climatiques de la période crétacée supérieure, le peu de variation dans la nature des sédiments semble annoncer une époque qui s'approchait de notre régularité actuelle. C'est ce que paraît confirmer l'inclinaison de l'équateur sur l'écliptique, qui a pour limites de variation 22 et 70°; elle a donc pu descendre jusqu'à la valeur actuelle. Il faut observer à ce sujet qu'on trouve dans cette formation des restes de dycotylédones, et peut-être l'absence des mammi-

¹ Capit. Bayfield, *Géolog. transact.*

² Ajoutons que la formation du grès vert devant renfermer des produits lacustres et par conséquent des calcaires magnésiens, les fractures N. O. de l'époque crétacée auront pu produire encore des serpentines, et tel paraît être l'âge de celles d'Italie. La direction remarquable de ces sortes de roches du N.O. au S.E. aurait ainsi une double cause.

fères ne tient-elle qu'à la faible étendue des continents et à l'absence des lacs où se conservent surtout leurs dépouilles. La latitude de la France était de 20 à 25°.

Des deux pôles l'un tombait à la pointe méridionale de l'Amérique, juste sur l'île Chilôë, et c'est probablement de cette époque que date une partie de ces blocs erratiques qui se rencontrent dans cette partie de l'Amérique du Sud, à l'île de Chilôë en particulier, mais ils peuvent aussi appartenir, comme nous le verrons, à une époque plus moderne. L'autre pôle était placé au centre de la Mongolie, dans le grand désert de Cobi, et il en doit être résulté pour l'Himalaya un diluvium récent, dont en effet l'on retrouve les traces bien marquées : Jacquemont en cite d'immenses amas dans la vallée du Spiti, qui y est creusée, et les fragments sont du calcaire à ammonites qui forme les parois mêmes, ce qui peut servir à confirmer nos conjectures sur l'âge de ce diluvium.

IX. SYSTÈME DES ANDES DU CHILI.

*Epoque du terrain tertiaire inférieur.*¹

La ligne équatoriale dont il va être question est certainement l'une des plus remarquables du globe par la longueur de la principale chaîne sur laquelle elle repose, chaîne à laquelle nulle autre sur la surface de la terre ne paraît être égale en étendue rectiligne : car depuis les Nevados d'Illimani jusqu'à la Terre de Feu elle se prolonge d'une manière continue sur 1000 lieues de développement. Néanmoins les autres portions du contour de cette ligne, quoiqu'embrassant un très long espace continental, sont loin d'avoir partout un relief aussi fortement prononcé.

La distance où étaient nos régions de cet équateur (34°), ne permet guère de penser que son influence y soit marquée par

¹ Sables et mollasses à lignite, calcaire à cérites et à nummulites, gypses, mammifères.

de puissants ridements ; elle s'y est fait sentir toutefois, quoique son empreinte ne soit pas des plus saillantes. Cette ligne est la seule en effet après celle de l'Écosse, qui réponde pour la région des Alpes, de la France et de l'Angleterre à des directions N.E. et de telles directions se retrouvent sans contredit dans ces contrées affectant des terrains assez modernes.

J'ai éprouvé d'abord quelque embarras à classer convenablement et à sa place géologique exacte cette direction du N.E. ou plutôt de l'E. 40° N, qui n'est liée sur notre sol à aucun accident suffisamment isolé. Convaincu par des raisons précédemment exposées qu'elle n'appartenait en propre ni à l'époque du Jura ni à celle du grès vert, j'ai été conduit de proche en proche jusqu'à la craie, où on la rencontre en effet soit en Angleterre, soit en France, soit dans les Alpes et dans les Pyrénées. Mais ici venait se présenter une autre difficulté : depuis les observations de MM. Dufrénoy et Elie de Beaumont, qui ont reconnu les dislocations du terrain crétacé dans les Pyrénées, le soulèvement caractéristique de ces montagnes, dirigé O.N.O., a été classé comme immédiatement postérieur à la craie, ce qui semblerait exclure la direction N.E. de la place que nous lui assignons ; d'autre part, depuis la craie jusqu'aux époques les plus récentes nous ne trouvons plus, dans l'ensemble des observations qui ont été faites, une place pour la direction N.E. : elle devait donc être immédiatement antérieure au soulèvement des Pyrénées ou lui avoir immédiatement succédé. Cette alternative ne saurait rester longtemps douteuse ; je ne sache pas en effet que l'on ait cité encore dans nos contrées un terrain tertiaire relevé dans la direction du N.E., tandis que le terrain de craie lui-même la présente souvent. Il la présente dans le S.E. de l'Angleterre, dans le Jura français, dans les Alpes à la crête des Fis, dans les Pyrénées sous le Mont-Perdu. J'aurais donc été porté à regarder les mouvements N.E. comme immédiatement consécutifs au dépôt du terrain de craie et antérieurs au soulèvement des Pyrénées, quand bien même les vérifications systématiques relatives à l'enchaînement de position des équateurs, sur lesquelles nous reviendrons d'une manière générale, ne m'auraient pas elles-mêmes suggéré ce classement.

Quant à la question pyrénéenne en particulier, elle fait en ce moment l'objet d'une controverse parmi les géologues et les zoologistes, et quoiqu'il ne m'appartienne pas d'entrer dans sa discussion spéciale, son résultat est trop en harmonie avec ceux de notre système pour que j'hésite à m'en étayer. Il paraît prouvé qu'il existe dans ces montagnes des couches relevées suivant la direction O.N.O., celle de la chaîne, qui ont la plus grande analogie avec le terrain tertiaire inférieur : ce sont des marnes à coquilles tertiaires, associées à des calcaires à nummulites dont les coquilles pour la plus grande partie tertiaires aussi, présentent néanmoins quelques genres nouveaux mais très peu d'espèces analogues à celles de la craie, s'il en existe; enfin à ce terrain sont jointes des couches d'eau douce. Ces assises sont superposées au terrain de craie à rudistes, et le tout paraît avoir été soumis aux mêmes mouvements d'inflexion. Sur le revers espagnol, près de Barcelone, M. de la Marmora indique aussi des couches tertiaires relevées dans la direction de l'O.N.O., fait dont nous citerons d'autres exemples en traitant du système suivant et qui prouve au moins ici que le soulèvement pyrénéen est postérieur d'une époque à celui du terrain de craie. Quant au fait de l'horizontalité du calcaire grossier des Landes sur des couches crétacées inclinées, la direction de ces couches n'a point été donnée, mais fût-elle semblable à celle de la chaîne, il n'y aurait sans doute qu'une bien faible objection à en conclure, si ces couches appartenaient au terrain crétacé *inférieur*, dont nous avons vu que la direction de relèvement avait été celle du N.O., peu difficile à s'harmoniser ou à se confondre avec celle des Pyrénées. Il n'est pas impossible au reste que dans l'intérieur même de la chaîne, lorsque ses hauts sommets calcaires auront été suffisamment étudiés, on vienne à constater ainsi par de simples discordances de stratification l'existence d'un terrain plus moderne que la craie: j'ai été frappé de voir un fait semblable signalé par Ramond¹ au col de Niscle sous le Mont-Perdu, et de nouvelles observations y pourraient amener une heureuse solution de la difficulté. Il y

¹ Journal des mines, tome XIV p. 325.

indique des grès coquilliers reposant avec une médiocre inclinaison sur des calcaires à silex presque verticaux. Nous reviendrons du reste dans l'article suivant sur d'autres observations qui permettent de conclure que les ridements O.N.O. ont atteint la partie la plus ancienne de la série tertiaire, résultat en harmonie avec notre classement. Ce qui peut faire sans doute que la partie la plus ancienne de ce terrain ait été si souvent confondue, notamment dans les Alpes et les Pyrénées, avec la masse du terrain de craie, c'est que le mouvement N.E. de l'époque qui nous occupe n'a dû exercer qu'une médiocre influence sur ce dernier, vu la distance à l'équateur, et que par conséquent tous deux ensemble ont été soumis ensuite aux mêmes inflexions, lors des exhaussements subséquents de ces montagnes. C'est ce qui aurait lieu si des ridements violents venaient à s'exercer sur le bassin de Paris, où la craie et le tertiaire reposent à stratification concordante.

En résumé c'est avec une conviction très grande que nous attribuons à l'époque qui a immédiatement suivi le dépôt de la craie l'équateur des Andes du Chili, qui répond en France à la direction E. 40° N. Quant à la fixation directe de son âge ou à la nature des terrains qu'il relève sur son contour même, deux observations seulement nous sont données en Amérique, mais elles semblent concluantes. M. Domeyko, qui a envoyé dernièrement du Chili des fossiles que l'on a reconnus être crétacés, a trouvé les calcaires qui les renferment vers les hautes crêtes des Andes et *dirigés N.S. comme la chaîne même*, ce qui donne au moins une limite inférieure de son âge. D'autre part aux Etats-Unis, d'après M. Percival, les terrains secondaires de l'état de Connecticut, presque sur le passage de notre cercle, sont dirigés au N. un peu E., c'est-à-dire exactement comme lui. Ces vérifications quoiqu'isolées sont frappantes, surtout en raison de l'intervalle qui les sépare.

Si l'on suit maintenant sur la carte le contour de cet équateur, on verra qu'en outre de cette immense chaîne longitudinale de l'Amérique du sud, il s'étend parallèlement à un grand nombre d'autres accidents méridiens dispersés pour ainsi dire sur toute sa circonférence; on peut y rattacher en effet l'aligne-

ment des petites Antilles, celui N.S. de Terre-Neuve et des montagnes à l'ouest de Boston, la pointe du Groënland; l'allongement des chaînes méridiennes qui se détachent de l'Altaï près du lac Baïkal, parallèlement au cours de la Lena, et du Yenisseï; celui des royaumes d'Annam et de Siam, des côtes E. et O. de Bornéo et d'une grande quantité d'îles voisines, Luçon, Mindanao, Célèbes, etc.; enfin la remarquable coupure méridienne de la côte occidentale de l'Australie.

Cette grande dispersion des ridements est complètement en rapport avec la position du plan de cet équateur, presque perpendiculaire à celui de l'époque précédente, et ces deux circonstances réunies indiquent un grand ralentissement dans la vitesse de rotation : comme d'ailleurs la latitude de la France, de l'Angleterre et de l'Allemagne n'ont point fortement changé, il doit s'être produit un considérable retrait des eaux sur la surface de l'Europe et l'émergence d'une grande surface continentale. Aussi voyons-nous reparaître dans les sables et argiles à lignites du terrain tertiaire inférieur un nouveau produit des eaux douces au-dessus de la puissante formation marine de la craie; et probablement les érosions dont la surface de cette formation est accidentée ne proviennent pas d'autre chose que du passage de l'énorme courant qu'ont dû produire les eaux en quittant nos contrées.

On concevra sans peine, d'après cette disposition continentale, le grand développement des grès et en général des produits arénacés à la partie inférieure du terrain tertiaire; on concevra aussi la formation des petites mers intérieures où ont pu se déposer les gypses ou les couches de sel, qui forment encore un des traits caractéristiques de cette époque (gypse de Paris, gypse et sel des Pyrénées, d'Autriche, de Pologne). Cette circonstance expliquerait d'ailleurs la dispersion de ce terrain en *bassins* sur la surface de l'Europe et aussi la présence des cérites, coquilles d'embouchure qui se plaisent dans les eaux peu salées¹ comme doivent l'être celles de ces bassins sans issue, remplis au niveau d'évaporation par les fleuves qui viennent s'y

¹ L'eau de la mer Caspienne est très peu salée, comme le constate une ana-

rendre après leur isolement. C'est enfin l'époque des premières mollasses et de ces grès à gros fragments que nous voyons maintenant fortement relevés sur la pente des Alpes et des Pyrénées. La latitude de ces deux chaînes de montagnes était alors de 36° , et déjà fortement relevées lors de l'époque du Caucase, sur-exhaussées encore à l'époque suivante, elles ont pu, elles ont dû supporter des neiges et donner naissance à des torrents : de là les grès à gros fragments, de là les blocs qui dans quelques anciens nagelfluhe des Alpes donnent déjà l'idée des glaciers.

Une cause importante a dû aider beaucoup d'une part à ce mouvement des glaces, de l'autre à celui des eaux courantes et par suite à la formation des tourbières (lignites) que ce terrain renferme en si grand nombre dans le bassin de Paris, en Suisse et sur la pente des Pyrénées : cette cause est la forte inclinaison de l'équateur sur l'écliptique, laquelle n'a pu descendre au-dessous de 60° . Ce n'est pas ailleurs, je pense, que dans ces mêmes anomalies climatiques combinées avec l'étendue des continents, qu'il faut chercher encore la raison d'être de ces organisations exceptionnelles qui distinguent la première époque des mammifères ¹, et que le génie de Cuvier a si merveilleusement reconstruites. Pourquoi ce grand naturaliste n'est-il plus là pour révéler maintenant la relation de ces natures étranges avec la loi des climats, avec le nouveau mode de variations que notre système y indique ? Si ces changements périodiques dans la disposition de l'équateur terrestre ne sont pas une chimère enfantée dans notre imagination, si ces faits peuvent enfin venir un jour prendre place parmi les grandes vérités de la science, c'était à ce grand naturaliste qu'il eût dignement appartenu de rechercher les moyens employés par l'intelligente Providence dans l'appropriation de l'organisme avec ces états passés de la terre. Lui sans doute ne croyait pas que le hasard eût présidé à la combinaison de ces formes, car il en avait montré la corrélation constante vers un but déterminé ; sans doute il ne croyait pas lyse de M. Rose. Mais dans des bassins semblables il peut se rendre des eaux torrentielles fort salées lorsqu'elles ont passé sur les terrains voisins, imprégnés de sel ; telle pourrait être l'origine des gypses.

¹ Ceux des plâtrières de Montmartre.

non plus que la succession de ces êtres sur le globe eût pu être produite en vertu des causes ordinaires, car la diversité des moyens, dans les œuvres de la Providence, ne saurait être comprise que par la diversité du but. Il eut donc vu, je le pense, avec intérêt l'éveil de ces nouvelles idées que j'apporte, de ces nouvelles lois naturelles qui tendent à donner une cause réelle à tant d'étrangetés : instrument inespéré dont la géologie systématique vient enfin armer l'intelligence des naturalistes pour l'étude des vieux âges de la terre.

Il n'est pas inutile de remarquer au sujet de ces débris fossiles, que le nord de la France était pendant l'époque qui nous occupe à la latitude actuelle des bouches du Nil, par conséquent l'existence des crocodiles et la présence des palmiers n'ont rien qui doive surprendre : néanmoins l'alternance momentanée du froid rigoureux qu'amenait l'éloignement des tropiques, peut faire concevoir qu'il n'existât alors aucune ou presque aucune espèce animale uniquement herbivore ; c'est en effet une des singularités très grandes de la population des quadrupèdes de cette époque qu'à classés Cuvier, d'appartenir entièrement aux genres des pachydermes omnivores, des carnassiers ou des rongeurs ; les ruminants n'y sont pas représentés.

Quant aux couches marines de la même époque, les fossiles qui les caractérisent principalement sont les cérites et les nummulites, qui y sont répandues avec la plus grande profusion. Mais il y a une remarque intéressante à faire au sujet de la distribution géographique de ces coquilles. Les calcaires à nummulites ont été retrouvés au Caucase par M. Dubois de Montpéroux, en Crimée par M. de Verneuil, superposés au terrain de craie ; ils existent aussi en Egypte, puisque la pierre des pyramides est un calcaire à nummulites, et l'on sait vers quelles idées la forme lenticulaire de ces coquilles portait la crédulité du peuple de ce pays. Or maintenant si l'on considère la zone de terrain comprise entre les côtes occidentales de France et d'Espagne et l'extrémité de l'Arabie, on voit qu'elle est exactement parallèle au grand cercle équatorial de cette époque : la répartition des mêmes coquilles sur cette identité de latitude paraît donc toute naturelle. Au Mexique il existe aussi un calcaire à num-

mulites, et la latitude n'était pas non plus fort différente. Des relations de ce genre, lorsqu'elles seront complétées, donneront quelque jour un intérêt puissant à l'étude historique de la zoologie fossile.

Quant aux pôles, à l'époque des Andes du Chili, ils étaient placés l'un au milieu du grand Océan équinoxial, l'autre au centre de la partie inconnue de l'Afrique, il n'y a donc pas lieu d'en rechercher les traces.

X. SYSTÈME DES PYRÉNÉES, DU NORD-EST DE L'AFRIQUE ET DES ALLEGHANYS.

Terrain tertiaire moyen, molasses marines.

Des ridements assez fortement prononcés, dans la direction de l'O.N.O. à l'E.S.E., ont donné à la chaîne des Pyrénées son relief principal; ainsi que nous l'avons indiqué dans l'article précédent, nous pensons que le mouvement a eu lieu à la fin de la première période de la série tertiaire, et d'après cela il y avait lieu de rechercher au voisinage de ces montagnes l'équateur de la seconde période de cette série. La position que nous en avons trouvée apporte, nous le pensons, une grande clarté dans l'histoire de cette époque. Mais il faut d'abord chercher quelques autres résultats qui confirment que la direction dont nous parlons appartient bien réellement au relèvement du terrain tertiaire inférieur: nous avons dit déjà que dans la chaîne des Pyrénées des terrains qui paraissaient de cette époque avaient été relevés; que près de Barcelonne des terrains réellement tertiaires étaient aussi alignés à la direction de l'O.N.O.; il en est de même dans la partie inférieure des terrains tertiaires d'Aix, et aussi dans ceux à lignites du département de l'Hérault, d'après M. Dufrenoy. Près de Côme M. de la Bèche a observé la direction N.O. dans des grès à gros fragments réputés tertiaires et qui viennent reposer sur la tranche de couches très inclinées de calcaire à chertes ou crétacé. C'est

encore à cette époque qu'il faudrait rapporter le mouvement qui a relevé jusqu'à la verticale les couches sableuses du terrain tertiaire inférieur à l'île de Wight; bien que la disposition générale des terrains soit donnée, dans cette portion du sud de l'Angleterre, comme étant de l'E. à l'O., ce qui peut être dû à une combinaison de relèvements, néanmoins les détails de stratification paraissent s'écarter de cette loi d'ensemble, et dans la partie orientale de l'île de Wight, d'après MM. Conybeare et Phillips ¹, les couches très fortement inclinées plongent vers le N.N.E., ce qui correspond à notre direction pyrénéenne.

En Toscane la direction O.N.O. est celle des macignos et calcaires à nummulites, dont l'âge est douteux mais qui peuvent avec quelque vraisemblance se rapporter au terrain tertiaire inférieur. Enfin en Grèce celle du N.O. paraît affecter aussi ce dernier terrain, notamment à l'île Spezia ²; elle a exercé du reste une grande influence sur le relief de tout ce pays et de la Turquie, où comme partout elle s'est sans doute entée sur des relèvements antérieurs sensiblement concordants. En général on doit observer que cette direction se rapporte dans tout le midi de l'Europe à des terrains problématiques, abondants en nummulites, et que là où se rencontre ce terrain on ne cite jamais une formation superposée qui puisse être considérée comme l'équivalent du terrain tertiaire inférieur du bassin de Paris: cette dernière circonstance est remarquable sur la pente des Pyrénées et dans les Alpes occidentales ³; c'est pour moi une des meilleures preuves générales de leur identité entre eux et avec cette série inférieure.

Je crois que ces observations suffisent pour rendre au moins vraisemblable la place chronologique que j'ai donnée à l'équateur pyrénéen; des résultats d'un autre ordre viendront bientôt en confirmer le classement, cherchons maintenant sa trace véritable sur le relief de la sphère.

¹ *Outlines of the Geology of England and Wales*, part 1, p. 108.

² Boué. *Bulletin de la Société de géologie de France*.

³ S. Gras, *Statistique minéralogique du département des Basses-Alpes*.

Le tracé de ce grand cercle n'y est point marqué par des traits extrêmement vigoureux, mais seulement par des alignements assez prolongés; c'est sur les chaînes en général peu élevées du nord-est de l'Afrique et sur celles de l'Abyssinie que se développe sa ligne de soulèvement apparent la plus étendue, et c'est à lui qu'appartient encore le relief d'une partie des chaînes du sud de l'Espagne, plus élevées comme l'on sait que les Pyrénées elles-mêmes. Bien loin de ces contrées le même cercle va donner son empreinte à quelques lignes côtières de l'Australie, à l'une des branches cruciales de la nouvelle Zélande et passer enfin sur la direction principale des monts Alleghany. La chaîne des Pyrénées n'est pas comprise elle-même dans ce contour, néanmoins vu son intérêt relativement à la France j'en ai conservé le nom au système entier, comme je l'avais fait pour les Alpes. Cette chaîne parait du reste remplir ici le rôle de l'île Madagascar dans le système des monts Lupata, de la presqu'île de Malacca dans celui de Sumatra et du Caucase; elle indique la concentration des ridements sur un point particulier du contour, point dont la position est toujours caractéristique, comme nous le ferons remarquer par la suite.

J'aurais voulu trouver sur le développement de cette même ligne quelques observations précises faites dans des contrées étrangères et qui pussent concourir à en constater l'âge; malheureusement les pays qu'elle traverse sont presque entièrement inconnus. En Amérique, la géologie du sud des Etats-Unis ne nous est point assez connue pour que nous y cherchions les relèvements des terrains analogues au tertiaire inférieur d'Europe; néanmoins les terrains modernes ne paraissent point rares dans la contrée monstrueuse. Au Mexique M. de Humboldt cite la direction N.E. comme une des principales; c'est celle des calcaires associés ou superposés aux porphyres trachyques de ces contrées, calcaires qui par leur position sont évidemment modernes: si l'on suppose avec nous que les porphyres en question sont de l'époque des Andes du Chili, ainsi qu'une grande partie des volcans de l'Amérique qui me paraissent dus en général à des fractures N.S., la direction N.E. se trouverait ainsi classée à la place que nous lui assignons;

telle est aussi la direction des strates et des crêtes disloquées du Pichincha et des autres masses trachytiques des environs de Quito. Quant à l'Afrique, on sait que ses déserts sont formés de terrains calcaires, et les calcaires à nummulites paraissent avoir été soulevés dans l'Atlas avant les terrains tertiaires plus modernes. Mais ces indications sont peu de chose ; revenons à l'Europe, en recherchant les conditions générales qui ont présidé au dépôt du terrain après le soulèvement des Pyrénées.

La position presque perpendiculaire du plan de l'équateur dont nous parlons sur celui du précédent paraît indiquer encore ici un ralentissement dans la vitesse de rotation de la terre, enté sur le ralentissement de l'époque antérieure. Le résultat définitif de cette condition relativement au plus ou moins d'étendue de la portion émergée de notre sol n'est pas évident par lui-même, car si d'une part sur l'équateur pyrénéen il a dû exister une moindre profondeur d'eau, de l'autre notre plus grand rapprochement de cet équateur même a pu compenser complètement la différence. C'est l'observation géologique seule qui pourrait nous apprendre jusqu'à quel point la compensation s'est effectuée et dans quel sens a eu lieu l'excès, ou dans l'étendue des eaux ou dans celle des terres. Nous avons quelque raison de penser, autant qu'un examen superficiel peut nous le suggérer, que c'est l'extension des eaux qui a dominé dans ce conflit des deux effets opposés, et cela parce que l'on voit en certains points les mollasses marines de cet âge venir reposer sur des terrains plus anciens, comme le grès vert et le lias ¹.

Je suis d'ailleurs disposé à considérer comme n'appartenant pas à cette époque, mais bien à celle du tertiaire inférieur une partie des terrains que l'on a nommés mollasse d'eau douce, de même que les meulières et le calcaire siliceux de Paris, que je ne vois pas de raison suffisante pour séparer de la formation gypseuse. Dans le midi ces mollasses renferment presque partout du lignite ou du gypse, on y trouve des ossements de Paléotherium, des restes de crocodiles et des palmiers, comme dans

¹ S. Gras, *Statist. minéral. du département des Basses-Alpes*, p. 147.

le terrain inférieur de Paris, et là où elles existent on ne rencontre point de couches équivalentes au calcaire grossier. Le terrain de mollasse marine au contraire forme un véritable horizon, comme le grès et les sables marins supérieurs du bassin de Paris, avec lesquels il paraît devoir être complètement associé; dans ce bassin les grès dont nous parlons se sont étendus suivant une surface sensiblement horizontale, sur les meulières et les couches gypseuses qui au-dessous s'enchevêtrent entre elles de diverses manières: dans le midi on voit la mollasse marine baigner le pied des monticules du terrain d'eau douce¹, et témoigner ainsi d'une postériorité d'époque évidente. Aux environs d'Aix elle repose même horizontalement sur le terrain d'eau douce fortement incliné. Ce n'est pas à dire pour cela toutefois que tous les dépôts contemporains dans nos contrées fussent alors marins, il y a probabilité qu'une partie des grandes masses d'eau douce qui s'étendent au pied des Pyrénées et des Alpes appartiennent à cette période. Enfin j'y rapporterais volontiers ces vastes nappes de galets qui couvrent une si grande partie de nos plateaux moyennement élevés: ce dépôt, antérieur à un grand nombre de vallées et de *failles* dirigées N. N. E. et E. N. E., comme j'ai pu le vérifier au pied des Pyrénées, et par conséquent antérieur aussi aux deux dernières révolutions qui ont produit des mouvements dans nos contrées, ce dépôt me paraît pouvoir être considéré comme produit par la fusion rapide des glaces et des neiges de nos montagnes lors du passage de l'équateur des Andes à celui des Pyrénées, soit par la chaleur climatique, soit aussi par l'envahissement subit de l'eau et les phénomènes calorifiques que son contact a pu produire. C'est cette même influence qui aurait donné aussi à une partie de la mollasse marine sa physionomie particulière. Nous retrouverons au reste encore une fois un fait semblable, mais alors ces grandes alluvions, tout-à-fait modernes, se sont répandues dans nos vallées déjà ouvertes, et non plus seulement sur les plateaux qui formaient le sol de nos contrées à une époque plus ancienne.

¹ S. Gras, *ibid*, p. 136-137.

Quelles ont été maintenant les conditions climatériques de cette seconde époque des mollasses ? La latitude était équatoriale, et en effet les coquilles marines sont analogues à celles des climats chauds ; mais l'angle de l'équateur avec l'écliptique étant compris entre des limites fort étendues, 17 et 65°, on ne saurait conjecturer rien de bien précis sur la loi de ces climats. Il paraît certain néanmoins que les mammifères de cette époque, quoique présentant des rapports avec ceux de la période précédente, en diffèrent à plusieurs égards, et la série d'ailleurs en est beaucoup plus complexe : on y trouve plusieurs pachydermes nouveaux, éléphant, mastodonte, rhinocéros, hippopotame etc. ; puis des chevaux, des antilopes, et en général une population ¹ fort rapprochée de celle du tems actuel, ce qui pourrait faire penser que l'inclinaison équatoriale ne dépassait point les limites moyennes. Une chose à remarquer particulièrement dans ces mammifères, c'est leur taille en général colossale, ce qui s'harmonise bien avec le grand ralentissement dans le mouvement diurne, et ne semble guère pouvoir en effet relever d'une autre cause.

L'un des pôles de l'époque des Pyrénées était dans la mer du Japon ; l'autre près de la pointe S. de l'Amérique, à 200 lieues au nord de l'île Géorgie : or M. Darwin nous apprend que cette île et les Nouvelles-Shetland sont couvertes de blocs erratiques énormes. Il nous paraît probable aussi qu'il faut rapporter au même tems les grès et sables non fossilifères qui paraissent former à la partie méridionale de l'Amérique la base des terrains tertiaires restés en couches horizontales.

XI. SYSTÈME DU PETIT ALTAÏ ET DE LA TERRE DE FEU.

*Troisième étage tertiaire. Époque tempérée de l'Europe ;
époque glaciale des États-Unis d'Amérique.*

Après le dépôt des grès tertiaires marins de l'époque pyrénéenne, apparaît une formation très remarquable par le

¹ Le quadrumane dont les restes ont été trouvés aux environs d'Auch paraît être de ce tems.

rapport qui lie ses débris organisés avec ceux de notre époque et de nos latitudes. Dans le nord de l'Italie et sur les pentes inférieures des Alpes de la Suisse¹, des couches d'eau douce appartenant à cette formation renferment les empreintes de dycotylédones arborescentes semblables à celles de l'Europe méridionale et les restes d'animaux d'espèces analogues à celles de nos latitudes tempérées²; les couches marines correspondantes présentent aussi des coquilles très analogues à celles de nos mers quoique d'une plus grande taille et, circonstance remarquable, des ossements de cétacés. De semblables faits attestaient sans nul doute un éloignement notable de l'équateur pendant la période dont nous parlons, et c'était dans des contrées reculées de la nôtre qu'il nous fallait donc en chercher la trace. D'autre part il est reconnu que les plus anciennes mollasses des Alpes ont été relevées et assez fortement suivant la direction N.N.E. à N.S., tandis que cette direction n'est point citée dans les terrains plus modernes dont nous parlons, ni en Italie, ni en Suisse, ni en France; ils n'admettent qu'une direction voisine de l'E.N.E. Cette antériorité de la direction N.N.E. dans les mouvements récents des Alpes, où elle a fortement marqué, a été signalée pour la première fois par M. Elie de Beaumont dans ses *Recherches sur les révolutions du globe*, et le premier il a appliqué ce résultat, fruit de ses observations, à la distinction d'âge de deux lignes principales soulèvement dans ces montagnes. Pour nous, tous en y reconnaissant l'importance des ridements ainsi orientés, nous pensons que dans les Alpes deux mouvements semblables se sont superposés à des époques différentes, et que dans cette succession d'efforts parallèles ce ne sont pas les plus modernes qui ont dû avoir la principale influence; en un mot ce n'est point pour eux que l'équateur était le plus rapproché de nos contrées. En effet c'est seulement sur les pentes moyennes et basses que les terrains

¹ Dans la Bresse, l'Isère, près du lac de Constance.

² On y rencontre des feuilles de chêne, saule, peuplier, aulne, frêne, etc.; parmi les animaux on peut citer comme caractéristiques des climats tempérés le renard commun et le castor.

récents portent l'empreinte de ces mouvements et il y a une disproportion remarquable entre les hauteurs où sont portés ces terrains et celles qu'atteignent les terrains anciens antérieurement relevés dans une direction parallèle. Nous avons déjà expliqué au reste comment nous concevons que les efforts de soulèvement concentrent leurs effets, à des époques successives, autour des massifs granitiques, à cause de la moindre résistance qu'oppose à la compression l'intérieur de ces masses soulevées.

Convaincu par toutes les raisons précédentes, qu'il fallait chercher loin de la France le grand cercle parallèle aux derniers ridements N.N.E., j'ai pu trouver une ligne montagneuse circulaire parallèle à cette orientation, qui a exercé une influence remarquable sur le relief continental de l'Asie et de l'Afrique. On peut en suivre l'empreinte depuis l'extrémité du continent Africain jusqu'à celle de la Sibérie : dans la première de ces contrées cette empreinte n'est guère saisissable pour nous que par la disposition générale du continent et par les découpures des côtes ; mais en Asie on peut suivre ses traces dans toute la longueur des terres par le développement si remarquable de la ligne continue de montagnes qui depuis la presqu'île d'Arabie jusqu'au Kamschatka semble former l'arête dorsale de ce vaste continent et imprimer en même tems à toute sa masse son alongement linéaire le plus marqué : la chaîne des petits Altaï, celles des Monts Jablonoï, du Térék et des Montagnes Célestes forment les principaux traits de ce grand ensemble. Dans l'autre hémisphère le contour de cet équateur est presque entièrement caché par le voile des eaux ; on en retrouve cependant la trace dans l'orientation de quelques archipels, en particulier dans celui des Sandwich, et dans le remarquable croisement que forme la Terre de Feu sur la grande ligne des Andes du Chili.

La direction à laquelle correspond ce cercle pour les Alpes est le N.N.E., mais elle varie pour ainsi dire chez nous à chaque degré de longitude ou de latitude, vu la courbure prononcée des parallèles : pour le centre de la France elle est déjà N.S., pour l'Angleterre N. un peu O.

Nous ne possédons aucune observation précise faite sur le

contour même de ce grand cercle, qui traverse en effet les parties centrales et les moins franchissables de deux grands continents. A quelque distance de lui toutefois, on a signalé ¹ des terrains tertiaires dirigés N.N.E. sur les bords de la mer Caspienne, et cette direction se retrouve dans les chaînes du Taurus et du Liban, où se relèvent des terrains modernes. Enfin elle est encore indiquée comme l'une des plus récentes en Grèce, où les mollasses tertiaires sont élevées à 2000^m de hauteur; et M. Christie l'a reconnue en Sicile à la même place géologique.

La ligne du Kiol (époque du grés bigarré) répondait aussi pour nous à des directions N.N.E. mais la puissance des rideaux et les effets climatiques établissent une assez grande différence entre ces deux systèmes pour qu'il n'y ait pas d'hésitation sur leur place respective. Néanmoins il nous reste à parler encore d'une circonstance particulière qui vient apporter à notre classement une confirmation importante et inattendue.

On sait par des observations récentes que le phénomène des blocs erratiques est extrêmement développé dans l'Amérique du Nord, principalement dans le Canada et dans la partie littorale des Etats-Unis; comme en Europe, les roches y sont sillonnées, et la disposition des blocs y présente les mêmes caractères. Le principal développement de ce phénomène extraordinaire paraît être entre les rives du Saint-Laurent et l'état de Rhode-Island, contrées du reste les plus immédiatement voisines des montagnes; mais il existe plus ou moins sur tout le littoral. Les latitudes où il s'est exercé sont donc plus rapprochées encore de l'équateur que celles de l'Europe, et rien n'indique d'ailleurs que ses effets soient prolongés vers le Nord, ou dans la partie occidentale du continent, au-delà des Rocheuses par exemple. Il y a lieu en un mot de penser que c'est comme en Europe un phénomène limité, groupé autour d'un centre; mais ce centre, le pôle, restait encore à trouver... Or la position de l'équateur que nous venons de fixer sur la sphère vient répondre merveilleusement à cet appel de la géologie pratique: car l'un des pôles

¹ Journal des mines de Russie.

qu'il détermine se trouvait placé sur les côtes des Etats-Unis, non loin du golfe de Boston, à 4° au N.E. des îles Bermudes. Ce seul fait est d'une éloquence qui n'admet point de commentaires.

L'autre pôle occupait la côte méridionale de la nouvelle Hollande, par 120° long. E. Il n'y a donc pour moi point de doute que l'on ne trouve un jour sur cette cinquième partie du monde quelques traces du phénomène erratique.

L'angle formé par l'équateur de l'Altaï avec l'écliptique admet pour limites 30 et 80° ; mais d'après la nature des débris fossiles et leur analogie avec les produits de l'époque actuelle, il y a tout lieu de penser que l'angle réel approchait beaucoup de la plus basse de ces limites. Ce résultat est confirmé en outre par le peu d'étendue du dépôt des eaux courantes à cette époque : une grande partie de l'Europe était alors à découvert et il ne s'est produit néanmoins de grands dépôts fragmentaires qu'au pied des hautes montagnes ; ailleurs on ne trouve guère que quelques lambeaux de calcaire d'eau douce. Du reste vu la latitude qui était de 40° pour les Alpes, il n'y a aucun doute que ces montagnes et les Pyrénées ne dussent supporter des neiges et même des glaces, et là serait l'origine des grands dépôts de cailloux roulés qui comme ceux de la Bresse et de l'Isère se sont entassés au pied de la chaîne.

Quant à la vitesse de rotation, la position de l'équateur, encore perpendiculaire à son précédent, semble témoigner d'un nouveau ralentissement : néanmoins je suis porté à penser qu'il n'en est point ainsi. L'angle des deux équateurs indique bien en effet un antagonisme entre les deux impulsions dont ce mouvement a été la résultante, mais la vitesse étant déjà très diminuée il a pu arriver que l'impulsion due au choc fût assez prédominante pour produire un accroissement même considérable. La vitesse ainsi augmentée a pu au reste demeurer encore inférieure à ce qu'elle est aujourd'hui où nous avons une époque d'accélération, et cela pourrait servir à expliquer l'excès de taille des animaux de cette période tempérée sur celle de nos espèces actuelles; excès toutefois qui ne paraît pas approcher de la taille immense des mammifères de l'époque précédente.

XII SYSTÈME DU GUATEMALA ET DU CAP DE BONNE-ESPÉRANCE.

Epoque glaciale d'Europe, blocs erratiques.

Voici maintenant, je crois, l'un des plus singuliers résultats de nos recherches : la trace et l'âge de l'équateur le plus éloigné de nos contrées retrouvés par la détermination d'un seul point dans l'Europe septentrionale, en un mot par celle d'un de ses pôles. Nous sommes arrivés à l'époque en effet où le pôle s'avancant vers le centre de l'Europe, a étendu un revêtement glacé sur toutes nos régions montagneuses et dispersé au loin en blocs énormes les débris tombés de leurs sommets.

Lorsque par l'application des principes exposés au chapitre IV, je fus parvenu à cette conclusion, que les phénomènes de l'époque erratique pouvaient se coordonner autour d'une position polaire située au centre de la mer Baltique, je dus chercher aussitôt à retrouver la trace d'un équateur dont le pôle serait venu tomber approximativement sur ces contrées... Dans cette recherche la puissance des faits et de la vérité m'est venue immédiatement en aide : elle a fait surgir du centre de l'Amérique une vaste chaîne linéaire, singulièrement distincte, par sa direction et son isolement, de toutes les autres chaînes du continent Américain, et dont la position est aussi exceptionnelle enfin sur le globe que la nature climatérique de son époque est exceptionnelle pour nos contrées européennes. Cette chaîne n'est pas autre que le grand isthme qui depuis le golfe de Panama s'étendant en ligne continue jusqu'à l'extrémité des Rocheuses, unit l'Amérique du Sud à celle du Nord : étroite chaussée au travers des mers, arche immense jetée d'une portion à l'autre de ce double continent.

Si l'on prolonge maintenant l'arc de grand cercle qui embrasse cette chaîne ou cette sorte de grande île, on voit que d'une part il marque avec une précision merveilleuse la découpe linéaire des côtes N.E. de l'Amérique méridionale; pro-

longé vers l'Ouest au contraire il vient former l'un des alignements de Bornéo, de plusieurs autres îles ou archipels de l'Océanie et de la côte N.O. de la nouvelle Hollande; enfin il va marquer encore la coupure linéaire du continent d'Afrique, au cap de Bonne-Espérance; les lignes formées par les principales îles du golfe du Mexique, les Luçayes, Cuba, les petites Antilles sont aussi parallèles à ce système.

On voit donc que la trace de ce cercle est, sinon fortement du moins très clairement marquée sur la sphère¹: son pôle est exactement à la partie centrale de la Baltique, près de Riga.

Cela étant, et notre conception sur la position de ce pôle cessant ainsi d'être une simple hypothèse, on concevra dès lors clairement comment le phénomène erratique s'est trouvé concentré avec l'amas des glaces sur la presqu'île Scandinave, la Finlande, l'Ouest de la Russie; comment les Alpes placées à la latitude du Spitzberg ont pu entasser des glaciers jusqu'à la hauteur des sommets du Jura, les Pyrénées jusqu'aux plaines actuelles, et comment le mouvement annuel des glaciers a pu polir et canneler les roches de la Scandinavie et de toutes ces montagnes. Le pôle se trouvait alors en effet au centre d'une sorte de cratère glacé, formé par toutes les montagnes de l'Europe; vaste réservoir où sont venus s'entasser les blocs que l'expansion périodique des glaces détachait des hautes sommets de ce contour.

Mais il est une circonstance particulière qu'il est nécessaire d'introduire si l'on veut arriver à expliquer le transport des vastes blocs Scandinaves sur les plaines de la Russie et de la Pologne, et plusieurs autres circonstances du phénomène. La

¹ Quant aux caractères géologiques qui peuvent servir à fixer l'âge de l'équateur qui nous occupe par les ridements formés sur son contour même, je ne connais que deux observations qui me paraissent pouvoir y servir utilement: l'une indique la direction O.N.O. dans le calcaire à nummulites et milliolithes du Mexique près du volcan nommé le *Coffre du Pérote*; l'autre du Doct. Hardie, indique celle du N.E. dans des conglomérats feldspathiques fortement relevés, à l'île de Java; au pied de ces relèvements il n'existe que des calcaires à coquilles récentes, produit sans doute de l'époque même qui nous occupe.

disposition des montagnes sur le contour de l'équateur et la faible inclinaison de celui-ci sur le plan de l'équateur précédent, conduisent à croire que la vitesse de rotation a été alors fortement accélérée : les contrées polaires ont donc été abandonnées par les eaux, et les glaciers ont pu s'y étendre en liberté sur de vastes espaces. L'époque suivante, par le rapprochement de l'équateur ayant subitement augmenté la hauteur du niveau des eaux dans les mêmes contrées, a dû démanteler d'un même coup tous les glaciers qu'elle atteignait, et livrer ainsi au gré des vagues de vastes navires de glaces avec les blocs qui leur étaient superposés : ces chars éphémères ayant fondu ensuite peu à peu, les blocs ont dû tomber au fond des eaux, dispersés çà et là bien loin de leur provenance originaire, et les sables marins en doivent avoir ainsi recouvert une partie, phénomène bien reconnu dans le nord. Nous verrons bientôt comment les mêmes contrées ont pu se trouver maintenant de nouveau à découvert ; elles ne le sont pas toutefois autant qu'elles le pouvaient être à l'époque des glaces, puisqu'on trouve les roches des côtes de la Norwège sillonnées de cannelures qui se prolongent jusqu'au dessous du niveau actuel des eaux ; or on sait qu'il ne peut exister de glacier soumarin. L'extension des terres plus considérable à cette époque glaciale qu'aujourd'hui m'explique encore l'existence de ces forêts soumarines des côtes de l'Angleterre, forêts qui composées principalement de bouleaux et de pins paraissent indiquer qu'elles se sont développées dans un climat plus froid que celui de leur latitude actuelle, dans un climat en un mot analogue à celui des latitudes moyennes de la Norwège.

Il est assez difficile de conjecturer jusqu'à quel point l'influence climatérique favorisait alors le mouvement des glaces, puisque l'inclinaison de l'équateur sur l'écliptique peut avoir eu toutes les valeurs depuis 10 jusqu'à 60° ; mais au moins est-on assuré qu'elle ne différait pas de notre état actuel jusqu'à la limite extrême. Il y a toute probabilité enfin qu'à cette époque ont vécu les rennes, que l'on retrouve enfouis dans nos alluvions anciennes, et cet *ours des cavernes* dont on rencontre des quantités innombrables entassées dans les grottes et si souvent

isolées de toute autre espèce : la stature et la conformation de ces monstres les a fait considérer comme semblables à notre ours glacial. En un mot nos régions pendant cette période paraissent bien présenter les caractères distinctifs des mêmes latitudes au tems actuel ; il n'y a point de doute d'après cela, que sur le continent Américain, du moins dans les parties non submergées, elle a dû produire des mammifères : quelle était leur nature, c'est ce que je ne suis pas à même de conjecturer avec quelque sûreté.

Le second pôle de cette époque était au centre du grand Océan méridional, et il n'y a pas lieu d'en chercher les traces ; mais je rapporterais volontiers à cette époque les cétacés qui sont venus échouer dans les terrains récents des côtes de la Patagonie, alors élevée à la même latitude qu'aujourd'hui. Mais il est tems de passer à la période terminale, dont nous avons du reste à justifier la postériorité sur celle que nous venons de considérer, car ses traces n'occupent pas encore aux yeux des géologues une place suffisamment fixe et reconnue.

XIII. SYSTÈME DE L'ATLAS ET DE L'HIMALAYA OCCIDENTAL.

Diluvium, dépôts quaternaires.

La révolution dont nous allons parler est selon nous la dernière qui, avant notre époque, ait laissé sur la surface du globe une empreinte discernable : mais cette empreinte est d'une vigueur extrême, et les ridements qu'elle a produits embrassent sur une demi circonférence entière une série continue d'accidents parmi lesquels se comptent les montagnes les plus élevées du globe ¹. L'Atlas, la Sicile, la Turquie, l'Asie mineure, l'énorme chaîne de l'Himalaya occidental, l'Annam, la nouvelle Guinée, les côtes N.E. de l'Australie et de la nouvelle Zélande,

¹ Cette demi zone montagneuse est une de celles que M. Elie de Beaumont a spécialement signalées. *Recherches*, etc., Manuel de M. de la Bèche, p. 639.

tout cela lui appartient, et bien que pour parler aux yeux il manque à cette longue suite de chaînes la position littorale ou insulaire, elle frappe peut-être aussi vivement l'attention que les divers systèmes des Andes et celui du Caucase, dont les alignements sont si longuement empreints sur la sphère.

Nous ne reconnaissons point pour cause de cette élévation et de cette continuité remarquables l'âge moderne de ce grand soulèvement : ce n'est point parce qu'il a immédiatement précédé notre époque qu'il a porté d'aussi hautes cimes et des masses aussi grandes au-dessus du niveau général des continents ; c'est uniquement selon nous parce que l'impulsion qui l'a produit s'est trouvé dirigée de manière à ralentir à un haut degré la vitesse de rotation du globe. Mais avant d'entrer dans un examen plus spécial des conditions de cette époque, il convient de nous arrêter quelques instants sur une circonstance inattendue, que malgré son excentricité en quelque sorte poétique et fabuleuse nous croyons devoir traiter avec une attention particulière.

On sait que sur les limites de l'Europe et de l'Asie il existe une vaste étendue de terre habitée, dont le sol se trouve fortement déprimé au-dessous du niveau de l'Océan ; la surface de cette contrée, dont la mer Caspienne occupe la partie centrale ¹, n'a pas moins de 18000 lieues carrées, suivant les évaluations de M. de Humboldt. Par quel phénomène un terrain émergé de l'Océan a-t-il pu se trouver porté ainsi au-dessous de son niveau, sans être cependant recouvert par les eaux marines ? Cela est sans contredit un problème très étrange. On a dit il est vrai, pour l'expliquer, que la communication entre les mers Caspienne et d'Azof s'étant trouvée fortuitement interrompue, la première a pu ainsi être isolée, et que perdant par l'évaporation plus d'eau qu'elle n'en reçoit, elle s'était resserrée peu à peu dans ses limites actuelles, laissant à ses alentours une dépression non remplie. Il y aurait bien lieu ici de se demander comment il se ferait que cette mer étroite qui reçoit les eaux d'un des plus grands fleuves du monde, le Volga, qui

¹ Il paraît certain que la ville d'Astrakan n'est pas à moins de 100 pieds au-dessous du niveau de la Méditerranée.

reçoit celles de l'Oural, de l'Araxe et de presque tous les torrents qui descendent du Caucase, c'est-à-dire une proportion d'eau affluente en apparence plus considérable que celle d'aucune mer connue, que cette mer aurait pu perdre par l'évaporation plus de la moitié de ses eaux ? Il y aurait lieu de demander encore comment les eaux de la mer Caspienne, qui devraient dans cette hypothèse posséder une énorme salure, ont été trouvées par un des plus habiles chimistes allemands, M. Henri Rose, près de vingt fois moins salées que celles de l'Océan. Mais il est contre cette opinion un dernier argument que je crois sans réplique : c'est que le léger bombement du sol qui sépare les deux mers dont nous parlons, et qui est marqué par la ligne de partage des eaux courantes, se trouve de tous points assez éloigné de la mer d'Azof elle-même ; ce ne serait donc point la mer Caspienne seulement dont le niveau aurait si remarquablement baissé, ce serait aussi la mer d'Azof, et avec elle la mer Noire, la Méditerranée, l'Océan...

Ainsi donc la dépression qui entoure la mer Caspienne n'a pu être produite par une réduction des eaux, et il faut imaginer qu'une modification physique toute spéciale ait agi sur le lit même de cette mer. M. de Humboldt qui a traité cette question, y voit un affaissement immense produit en quelque sorte par contre coup, par compensation à la tuméfaction des hautes montagnes du continent d'Asie, dont cet illustre géologue attribue le surgissement à un effort de l'action volcanique. Il serait inutile ici d'indiquer combien cette opinion s'éloigne encore de celles que nous pourrions admettre, le phénomène volcanique étant pour nous une cause de mouvement extrêmement restreinte et tout-à-fait hors de proportion avec d'aussi vastes effets ; nos idées n'admettent en effet aucune relation possible entre le soulèvement des montagnes, phénomène de compression, et l'effondrement d'une grande étendue de terrain : il y a là toute la divergence de deux systèmes, et il est inutile d'insister sur cette discussion, qui réside dans notre livre entier. Pour nous enfin l'effondrement du lit et des côtes de la mer Caspienne sort complètement de la loi ordinaire des

mouvements que la surface de la terre a pu périodiquement éprouver.

Mais une autre opinion a été émise sur ce grand phénomène, elle l'a été par un célèbre astronome, Halley, et la relation qui lie cette opinion avec nos idées systématiques est telle, que nous n'avons pu nous défendre de la recueillir et de la considérer avec toute l'attention dont elle est digne. Halley en effet qui avait, ainsi que nous l'avons dit, reconnu le choc des comètes comme principe des grands mouvements de la mer à la surface du globe, Halley prétendait reconnaître aussi dans l'immense dépression des bords de la mer Caspienne la trace qu'y aurait laissé le choc violent d'un de ces astres.

Cette idée, pleine de haute imagination, a pu sans doute n'exciter que médiocrement l'attention lorsqu'elle était isolée, sans liaison avec aucune autre trace matérielle sur la sphère, et peut-être a-t-elle déjà fait sourire bien des esprits forts; néanmoins c'est encore la seule qui n'ait à redouter aucune véritable objection physique: elle n'a contre elle que cette vague suspicion de l'impossible, mesuré à notre échelle des tems; et nous avons pu apprécier dans le courant de cet ouvrage la valeur de cette impossibilité, qui pour nous a dû quinze fois s'évanouir. Ainsi déjà nous pouvions bien admettre la vraisemblance de l'hypothèse de Halley; un examen plus heureux m'a montré, je le crois du moins, la trace immédiate de ses effets sur le globe et sa vraie place chronologique.

Ce qui m'a en effet singulièrement frappé, c'est que la mer Caspienne, qui est formée, sur une grande partie de ses bords, des terrains les plus modernes, vient passer par le travers de notre cercle le plus moderne aussi, et comme cela doit être, dans une direction qui lui est transverse. Nous ne pouvons en un mot nous refuser à chercher dans cette grande dépression la trace du choc qui combiné avec le mouvement de l'équateur du Guatemala aurait produit la direction de l'équateur qui nous occupe, celui de l'Himalaya et de l'Atlas. Cette dépression du reste aurait été pendant cette avant dernière époque beaucoup plus profondément couverte d'eau qu'elle ne l'est aujourd'hui, ce n'est que dans le dernier refoulement de la mer vers notre équateur

teur actuel que ses bords auraient été ainsi dénudés, et cela explique pourquoi ils sont encore tout pénétrés de sel, comme le sont aussi les terrains d'une partie de la Tartarie et de la Russieasiatique; nous reviendrons sur ce sujet à l'article suivant.

On peut remarquer que la mer Caspienne forme une sorte de poche au nord de Tébéran, et il y a lieu de penser que là en effet s'est arrêté le choc, qui avait sa direction dans le sens du méridien; d'autre part, il résulte de la combinaison des vitesses, comme nous le verrons en parlant de l'époque actuelle, que le sens du mouvement était aussi pour l'équateur de l'Atlas de l'Occident à l'Orient: il en résulterait donc d'après la composition des forces, que la direction du choc qui l'a produit aurait été en effet à l'encontre du mouvement qu'avait alors la terre, ce qui implique une diminution de vitesse, comme la grandeur des montagnes et la forte inclinaison des deux plans équatoriaux nous l'avaient déjà fait conjecturer; enfin il faudrait en conclure de plus qu'à l'époque du Guatemala la direction du mouvement de la terre était encore d'Occident et Orient.

Si nos conjectures zoologiques sont exactes aussi, de cette grande diminution de la vitesse et par conséquent de ce grand allongement des jours devaient résulter pour les espèces animales un accroissement de force et une ossature plus développée; et en effet c'est là l'époque spéciale des quadrupèdes monstrueux: les éléphants gigantesques, les grands mastodontes, les carnassiers et les ruminants d'une taille relativement colossale. Aucun rapprochement ne saurait être plus évident; car cet état particulier de la conformation anatomique des espèces terrestres cesse aussitôt que survient notre époque actuelle avec sa vitesse plus considérable.

L'existence de ces espèces plus ou moins analogues à celles de nos jours, à la taille près, paraît indiquer que l'inclinaison équatoriale n'était pas alors très différente de ce qu'elle est aujourd'hui; peut-être même était-elle inférieure, car on y trouve la prédominance des espèces auxquelles semble réservée la plus grande immobilité d'habitation, ce qui suppose une grande régularité climatérique. L'inclinaison a pu prendre au

reste toutes les valeurs de 15 à 70°. Il est à remarquer de plus que l'éléphant velu de Sibérie, que l'on trouve aujourd'hui conservé au milieu des glaces, habitait alors des latitudes comprises entre 40 et 50°, un peu plus froides que nos latitudes correspondantes actuelles; le poil dont il était revêtu ne paraît donc pas un revêtement sans nécessité, et cette nécessité n'aurait pu exister dans une contrée tropicale. Ajoutons encore que le grand mastodonte si multiplié dans l'Amérique du nord, habitait approximativement les mêmes latitudes que le mammoth sibérien¹; peut-être cet animal immense dépouillait-il périodiquement comme notre bison, sa fourrure hivernale.

Nous nous sommes arrêtés sur toutes ces considérations dans l'ordre où elles se sont présentées à nous, et peut-être aurions-nous dû établir auparavant par des faits géologiques la place chronologique réelle de cet équateur que nous attribuons à la dernière époque. Ce fait ne paraît laisser géologiquement aucun doute. On doit à M. Elie de Beaumont, dans ses belles recherches sur les Alpes, d'avoir constaté que la direction E. 18° N. caractérisait le dernier soulèvement de cette grande chaîne, et se rapportait à la révolution la plus récente qui se soit fait sentir sur la surface de l'Europe; à ce soulèvement, au-delà duquel il ne plaçait conjecturalement que celui des grandes chaînes des Andes, il associait le surgissement des chaînes principales de l'Atlas et de l'Himalaya. Nous ne pouvions trouver un meilleur guide que les observations de ce savant géologue, et c'est d'après elles que nous avons fixé la place de cet équateur, sans admettre toutefois les données conjecturales relatives aux surgissements des Andes, dont nous avons déjà classé tout différemment les âges. Nous ne saurions admettre non plus que cette époque dernière ait exercé l'influence tout-à-fait prédominante sur le soulèvement des Alpes; nous

¹ Ceci est une pure conjecture, car ces mastodontes pouvaient très bien vivre à l'époque de l'Altai ou du Guatemala; et le mammoth dont on a trouvé le squelette dans les glaces près du détroit de Bering, avait dû passer une époque entière sous ces glaces.

avons vu en effet qu'un équateur plus rapproché et dont la direction était à peu près la même, E. 5° N., avait eu sur les ridements de cette chaîne l'action déterminante. Il n'en est pas moins vrai cependant que sur la pente des Alpes tous les terrains tertiaires sont fortement relevés dans la direction E. 18° N.; qu'en Sicile ils le sont également et portés à 1000^m au-dessus du niveau des eaux, que sur les pentes de l'Atlas ils le sont à 1200^m; en Espagne le même direction a été observée aussi dans les derniers ridements tertiaires; enfin le soulèvement des terrains récents à l'Himalaya ne peut laisser non plus aucun doute¹. Plusieurs lignes volcaniques, résultats de fractures récentes, paraissent se coordonner au même alignement: ainsi la ligne E.O. des volcans centraux du Caucase, de l'Asie mineure, de la Turquie, celle des basaltes de l'Auvergne et enfin la direction de plusieurs des Iles Canaries. Le passage de l'aplatissement polaire à la courbure équatoriale a dû en effet ouvrir bien des lignes de fracture et c'est sans doute de cette époque que date la grande énergie volcanique de l'Ethna et de Ténériffe. La coupure qui a formé le détroit de Gibraltar n'est pas autre chose qu'une vallée d'effondrement que je crois devoir rapporter au même tems, et il est à remarquer que le prolongement de cette ligne parallèlement au grand cercle de l'Atlas irait passer par celle des volcans centraux du Caucase, en longeant la ligne des volcans anciens au N. de Naples, celle des côtes de Sardaigne et celle du Balkan dans la Turquie d'Europe. Jetons maintenant un coup d'œil sur les dépôts formés pendant cette période de nos volcans.

Lorsque nous avons dit que les terrains tertiaires les plus récents avaient été relevés dans l'Europe méridionale dans la direction du grand cercle de l'Atlas, c'était toutefois par une abstraction, car il faut distinguer une dernière formation, produit de cette époque même, et qui depuis n'a subi aucun relè-

¹ Le seul autre équateur qui donne pour nos contrées une direction E.N.E., celui de l'Himalaya Oriental et du Brésil, est trop évidemment associé aux terrains les plus anciens pour soulever aucune incertitude sur l'âge de celui-ci.

vement, au moins dans nos régions. Cette formation se compose de deux parties très différentes : l'une, produit des torrents et déposée en général au pied des massifs montagneux, a pris le nom de *diluvium*; l'autre, produit marin et nécessairement littorale, a été observée principalement sur les bords de la Méditerranée; on l'a désignée sous le nom de terrain quaternaire. Elle est en plusieurs points superposée aux laves basaltiques modernes (Sicile, Sardaigne).

La température glaciaire de l'époque précédente changée subitement en chaleur tropicale, et l'invasion des continents par une grande masse d'eau tempérée, ont dû produire sur les glaces accumulées dans les massifs montagneux des phénomènes de fusion d'une remarquable énergie : c'est là l'origine du diluvium, amas de blocs et de cailloux roulés, entraînés par les torrents et les glaces, et qui se sont déposés au pied des montagnes, généralement dans les lacs qu'y devait produire l'abondance des eaux. Outre les effets instantanés de cette fusion, dont nous avons parlé au sujet de l'époque précédente, le refroidissement atmosphérique a dû produire ensuite une fusion lentement progressive, origine des couches grossièrement stratifiées que l'on observe dans ces entassements torrentiels. Puis l'équilibre atmosphérique une fois établi, le dépôt des eaux courantes a dû prendre enfin son allure normale, et c'est pendant ces deux périodes régulières de dépôts que les ossements des grands quadrupèdes entraînés et enfouis dans les lacs se sont trouvés mêlés soit aux cailloux roulés soit aux argiles qui alternent avec eux.

C'est là, pour le dire en passant, la véritable raison qui doit nous faire placer l'époque tropicale après notre époque polaire, laquelle n'a laissé dans les mouvements du sol aucune trace physiquement appréciable qui puisse faire établir son âge; mais le mélange des ossements de mammifères perdus avec le diluvium fournit une indication qui, jointe à l'enfouissement des grands blocs du nord sous les sables marins, ne saurait nous laisser aucun doute; et l'époque tropicale est réellement celle qui a précédé la nôtre.

A cette époque doivent donc se rapporter les grandes allu-

vions fluviales récentes, telles que le Loëhm de la vallée du Rhin, dépôt d'un grand fleuve, où l'on trouve des ossements de requin comme cela pourrait avoir lieu dans le fleuve des Amazones ou la rivière du Sénégal; ce dépôt est élevé près de Bâle à 400 mètres au dessus du niveau de la mer ce qui semble témoigner de la grande élévation qu'il avait à cette époque. M. Lyell a reconnu qu'il était contemporain des éruptions volcaniques de l'Eiffel, comme les dépôts ossifères de l'Auvergne sont contemporains aussi des volcans de ce pays.

Quant aux dépôts marins de la dernière époque ils ont été reconnus pour ainsi dire sur tout le pourtour de la Méditerranée, sur les côtes de l'Italie, de Sicile, de Sardaigne, d'Espagne, de Morée; et dans plusieurs de ces contrées ils sont en partie superposés aux grands épanchements basaltiques. Partout les couches en sont restées horizontales (sauf les mouvements dus aux commotions volcaniques) et cependant elles sont à un niveau fort supérieur à celui de la mer actuelle. Cette circonstance se rapporte encore, ainsi que toutes les traces d'anciennes plages, à l'exhaussement général des eaux beaucoup plus considérable dans nos contrées à cette époque équatoriale qu'à notre époque actuelle, par une raison que nous indiquerons bientôt; et il est bien évident que sans un abaissement du niveau des mers ces couches horizontales nous demeureraient toujours cachées.

Mais avant de clore cette époque, il se présente ici une question du plus haut intérêt: dans ces couches marines maintenant élevées de 50 mètres au-dessus du niveau général des mers, et qui paraissent bien réellement appartenir à un autre âge que le nôtre, on a trouvé (en Sardaigne) des fragments de poterie grossière mélangés avec les débris arénacés; et le même mélange se trouve dans plusieurs cavernes de l'intérieur du continent (Montpellier, Basses-Alpes, etc), fort élevées aussi au-dessus du niveau actuel des eaux courantes. Elles y sont mêlées parfois avec des silex taillés en fer de flèches, des os perforés et divers autres attributs d'une civilisation encore dans l'enfance; enfin dans ces cavernes on trouve aussi des ossements humains, mêlés quelquefois avec ceux des espèces perdues.

Ces produits de l'art humain, ces ossements, sont-ils bien en effet les restes d'un autre âge ? L'homme a-t-il existé à cette époque où nos régions faisaient partie de la zone torride ? A-t-il existé parmi les hordes des gigantesques mammifères, et comme eux a-t-il été doué alors d'une taille proportionnée au plus long exercice de ses forces ? La fable des Titans, qui rappelle les géants de la bible et qui a été conservée avec la tradition du déluge dans la mémoire des anciens peuples, ne serait-elle pas une fable ? Le crâne de nègre enfin, trouvé dans une caverne de l'Autriche, est-il celui d'un des habitants de ces climats alors brûlants, habités comme aujourd'hui par la race noire ?

Que répondre à ces questions ? Elles frappent en effet, elles ébranlent la conviction. Mais il faut se soustraire aux illusions d'une curiosité prématurée, et ne point essayer de bâtir lorsque les matériaux ne sont point prêts encore : ce sujet est placé trop près de nous d'ailleurs pour qu'il ne soit pas imprudent de le soumettre à de simples conjectures.

XIV SYSTÈME DE L'ÉQUATEUR ACTUEL.

Lorsque pour la première fois les idées que j'ai exposées dans ce livre se présentèrent à mon esprit, et lorsque je fus amené à rechercher la trace des anciens équateurs sur l'alignement même des principales chaînes du globe, ma première réflexion fut de jeter les yeux sur notre équateur actuel et d'y chercher quelque ligne de montagnes considérable, ou quelque direction d'archipels ; mais je fus frappé de n'y en point trouver d'apparentes. L'intérieur de l'Afrique il est vrai n'est nullement connu et tout porte à y supposer de hautes montagnes vers l'équateur ; il est vrai encore que la direction E. O. est accusée par quelques découpures continentales en Afrique même ou en Amérique. Mais ce sont là de faibles traces, si on les compare aux grandes chaînes que des systèmes de tous les âges ont présentées à nos recherches. Je fus frappé, j'en conviens, de cette circonstance

et je ne vis pas sans un mouvement d'émotion cette objection subite qui semblait m'être fournie par les faits : néanmoins la conviction théorique était trop forte pour que je pusse m'en laisser arrêter ; je passai outre, convaincu que la raison de cette anomalie existait en réalité et que sans doute une plus longue étude en ferait surgir la cause et en expliquerait le mystère. Plus tard en effet la considération des changements de vitesse et le résultat définitif de nos classements sont venus jeter sur ce point une suffisante lumière.

L'angle très peu considérable que forme notre équateur actuel avec celui qui l'a précédé indique clairement en effet une augmentation dans la vitesse de rotation du globe à ce dernier cataclysme ; de là deux conséquences : premièrement la concentration des eaux vers l'équateur , ce qui vient y cacher une grande portion des continents et des montagnes ; en second lieu la diminution des ridements même par la double raison de l'augmentation dans la courbure et du faible écartement des équateurs. Ainsi tout concourt donc à affaiblir ou voiler les montagnes sur le contour de notre équateur actuel et pour rendre ce contour pour ainsi dire méconnaissable. Le phénomène des fractures seul ne saurait être entièrement effacé, et comme partout la courbure de la nouvelle zone équatoriale prédomine d'une manière absolue sur l'ancienne , les fractures doivent se montrer sur tout ce contour, même vers les points de jonction des deux équateurs : aussi voyons-nous les volcans, qui représentent pour nous les vallées soumarines, se montrer en effet vers ces points, dans les îles de la Sonde et les Moluques d'une part, et de l'autre entre les deux continents de l'Amérique. Dans cette dernière région l'alignement E.O. se trouve de plus partout combiné avec celui du Guatemala, soit dans les îles volcaniques soit dans les volcans eux mêmes : on le voit en effet dans la ligne des volcans de Mexico, prolongée encore par l'archipel de Revillagigedo et même peut-être beaucoup plus loin par la plus grande des îles Sandwich, toutes volcaniques ; on le voit dans la disposition d'une partie des grandes Antilles, depuis la Jamaïque jusqu'au delà des îles Vierges ; dans les îles Sous-le-Vent, au N. de Caracas et de Cumana ; il est peut-être

dans l'inflexion de l'isthme de Panama, et certainement dans la découpure des côtes N. de la Colombie, dont l'élévation récente n'est point d'ailleurs douteuse, puisque M. de Humboldt a trouvé près de Carthagène des argiles à ossements de mastodonte à 2800 mètres au-dessus du niveau des eaux; le même auteur cite au haut du Pichincha (Quito) des couches volcaniques plongeant très régulièrement au N. de 85°.

Vers l'Océanie la direction E.O. se retrouve dans les volcans de Java; dans la longue suite d'îles qui s'étend depuis sa pointe orientale jusqu'à la Nouvelle-Guinée, enfin dans d'autres îles encore telles que Célèbes, placée sur l'équateur même.

L'intérieur de l'Afrique nous fournira-t-il un jour une chaîne équatoriale? Et les fameuses Montagnes de la Lune, d'où descend un des deux grands affluents du Nil, mais que l'on n'a pu trouver encore, ne seraient-elles points reculées jusqu'à l'équateur? C'est précisément dans cette partie intérieure du continent Africain, entre les 15 et 35° de long E., que devraient se trouver les principaux ridements de notre équateur car c'est le point intermédiaire entre les deux jonctions avec le cercle de l'Atlas et de l'Himalaya; le point correspondant à l'autre extrémité du diamètre se trouve au milieu des archipels du grand Océan équinoxial et il est caché par les eaux.

Cette affluence des eaux vers l'équateur, si fâcheuse pour l'étude de nos grands ridements équatoriaux et seul obstacle sans doute qui ait jusqu'ici empêché la théorie de parvenir jusqu'aux vraies causes des révolutions du globe, cet afflux des eaux, dis-je, est néanmoins le seul phénomène physique qui peut indiquer dans nos contrées un changement d'époque, en mettant à nu des couches marines sur nos côtes et les laissant élevées à une hauteur notable au-dessus du niveau actuel des mers. C'est en effet ce retrait des eaux qui sans doute a mis à nu les bords de la mer Caspienne, le sol d'une portion de la Tartarie et de la Sibérie du sud; c'est le même phénomène encore qui a laissé des marques de l'ancien séjour de la mer sur les côtes du nord de l'Europe; je dois néanmoins faire remarquer que ces traces (qui sont multiples d'après les belles observations de M. Bravais au golfe d'Alten) peuvent et doivent appartenir

à différentes époques, la nature ancienne des rochers n'y met aucun obstacle. Mais ce qui ne peut souffrir aucun doute ce sont les argiles marines superposées aux rochers striés de la Norwège, elles appartiennent bien évidemment à la dernière période : M. Keilhau les a trouvées à 70^m au-dessus du niveau actuel de la mer, et c'est la hauteur que peuvent faire conjecturer aussi les terrains marins quaternaires de Sardaigne, trouvés à 50^m par M. de la Marmora.

Il ne faut pas désespérer qu'un ensemble d'observations uniquement limitées aux derniers dépôts marins ne vienne un jour nous apprendre le véritable chiffre de l'abaissement des eaux à nos latitudes, et poser ainsi une base de recherches pour cette question si importante de l'accroissement de vitesse qu'a subi notre planète à son dernier cataclysme, question grave surtout par ses conséquences relativement à l'histoire de l'homme, car c'est en elle que peut résider la solution de ce grand problème : « le déluge universel, a-t-il pu être causé par un changement dans la rotation de la terre, sans l'extinction complète de la race humaine ? »

Je ne hasarderai qu'un seul mot au sujet de cette haute question, dont nous ne pouvons en effet refuser complètement l'examen. C'est que pour les régions qui s'étendent au sud du Caucase, de la mer Noire et de la mer Caspienne, la direction de l'ancien mouvement était celle de l'O. à l'E., telle qu'elle est de nos jours; les mêmes régions passant d'autre part de la position équatoriale à la latitude de 35 ou 40°, n'y a-t-il pas lieu de penser que l'accroissement absolu dans la vitesse de rotation a pu être pour ces localités exactement compensé par l'élévation en latitude ? Si l'on y joint maintenant la possibilité d'une grande obliquité dans la direction du choc par rapport au rayon de la terre, la composante normale peut n'avoir eu qu'une très faible influence sur le mouvement de translation, n'avoir produit par conséquent qu'une secousse extrêmement faible et il n'y avait rien là en un mot qui pût emporter par soi-même l'extinction complète de l'espèce par un fait différent du déchainement des eaux.

Ce sont là des faits de simple possibilité; nous ne pouvions

négliger de les indiquer, néanmoins nous ne chercherons point à aller au-delà.

Ici se termine le détail de nos recherches sur la position et l'âge des anciens équateurs et sur leur relation avec l'histoire des terrains; dans le chapitre suivant nous traiterons de leurs relations de succession et de leurs rapports avec la disposition des montagnes et avec les variations de la vitesse.



SYSTÈMES ÉQUATORIAUX.		ÉPOQUE DU DÉPÔT CONTEMPORAIN.	LIMITES DE L' ANGLE avec l'Écliptique.	LATITUDE du centre de la France.	DIRECTION parallèle en France.	ANGLE d'inclinaison mutuelle.	VARIATION de la vitesse. a. accélération. d. diminution.	Coloration des cercles sur la Mappemonde.
1	Himâlaya oriental et Brésil.....	<i>Terrain de transition ancien.</i>	5 à 30°	30°	E.N.E.	42°	»	
2	Ecosse et Monts Dovre.....	<i>Second terrain de transition.</i>	42 à 90°	5°	N.E.	60	a	
3	Gates, Bolourdagh et Rocheuses.	<i>Terrain houiller.</i>	65 à 90°	36°	O. 20° N.	38	a ?	
4	Andes du Pérou et Asie orientale.	<i>Grès rouge.</i>	35 à 90°	6°	E.O.	75	a	
5	Europe et Afrique occidentales...	<i>Grès bigarré, Trias.</i>	50 à 90°	3°	N. 20° E.	50	d	
6	Monts Lupata et Oural méridional.	<i>Terrain jurassique.</i>	50 à 90°	33°	N. 26° O.	80	a	
7	Caucase et Alpes orientales.....	<i>Terrain crétacé inférieur.</i>	32 à 80°	2°	E. 5° N.	60	d	
8	Guinée et Canada.....	<i>Craie.</i>	22 à 70°	23°	N. 40° O.	88	a	
9	Andes du Chili.....	<i>Tertiaire inférieur.</i>	60 à 90°	34°	E. 40° N.	70	d	
10	Pyrénées et Alleghanys.....	<i>Tertiaire moyen.</i>	17 à 65°	12°	O. 25° N.	80	d	
11	Altaï et Terre-de-Feu.....	<i>Tertiaire supérieur.</i>	30 à 80°	42°	N.N.E. à N.S.	55	a ?	
12	Guatemala.....	<i>Blocs erratiques.</i>	10 à 60°	75°	»	70	a	
13	Atlas et Himalaya occidental.....	<i>Diluvium, ter. quaternaire.</i>	15 à 70°	10°	E. 18° N.	40	d	
14	Actuel.....	»	23°	46°	E.O.		a	

CHAPITRE XI.

RELATIONS MUTUELLES ET VÉRIFICATION CHRONOLOGIQUE DES ÉQUATEURS.

VARIATIONS DANS LA VITESSE DE ROTATION DU GLOBE.

Arrêtons-nous maintenant quelques instants sur l'ensemble de ces lignes dont nous venons de tracer le contour sur la sphère et de ces périodes dont nous venons d'ébaucher l'histoire. La liaison mutuelle de ces deux séries, leur complète corrélation numérique forme le premier, le plus remarquable trait de cet ensemble; la coordination de *toutes* les montagnes du globe à ce nombre limité de systèmes, forme un second résultat non moins frappant, non moins complet que le premier.

Le nombre des grands cercles montagneux ou des équateurs précisément égal à celui des formations géologiques; une concordance exacte entre leurs directions et celles qu'affectent les ridements caractéristiques de chacune de ces formations dans nos contrées; harmonie entre la succession de nos latitudes et celle de nos climats, entre la position des pôles et les traces connues de l'ancienne existence des glaciers; toutes les montagnes du globe, toutes les masses continentales embrassées dans le réseau de ces lignes circulaires dont la place est géologiquement déterminée; une telle précision enfin dans ce dernier résultat qu'aucun chaînon pour ainsi dire, aucune découpeure du littoral des mers n'échappe à cet universel classement... Tel est le résumé de ce grand ensemble, tel est le concours harmonique de toutes ses parties. Lorsque l'imagination embrasse d'un point de vue élevé la série de ces mouvements dans leur succession d'âges, il semble qu'elle assiste à tout le spectacle du surgissement progressif des continents au-dessus du niveau primitif des mers: à chacune des révolutions périodiques une portion linéaire de ces grandes masses s'élève, et vient dessiner

un des traits de leur figure géométrique aujourd'hui si compliquée; puis la série connue des âges et des directions une fois épuisée, la forme des continents ainsi déterminée se trouve être complète, les contours en sont arrêtés de toutes parts : l'étude géologique ne fournit rien de plus ni rien de moins. Devant cette imposante anatomie du globe terrestre qui pourra dire : tout ceci n'est que songes, que rêveries systématiques ? Non ce ne sont point là des rêveries, ce sont des faits, c'est l'histoire entière du globe terrestre écrite sur son relief continental. Le travail théorique groupant ces traits épars et colorant ces grandes images, a fait seulement revivre et apparaître les lignes invisibles qui en assemblaient les contours.

Mais il faut porter plus loin cette étude et n'y rien laisser d'incertain. Indépendamment de la concordance numérique et géographique entre les lignes de configuration continentale et les révolutions du globe, il est dans la succession même des équateurs un autre genre de relation qu'il convient d'examiner, car elle doit nous fournir une démonstration en quelque sorte géométrique de nos classements de chronologie. Cette relation est celle qui lie la distribution et l'étendue des chaînes de montagnes avec l'angle mutuel des équateurs et par conséquent avec les variations dans la vitesse de rotation de la terre.

L'examen de ces grandes relations dérive d'une série de principes fort simples qui déjà ont été déduits ou peuvent se déduire facilement des diverses considérations théoriques que nous avons exposées; nous nous contenterons de les rappeler d'une manière succincte.

I. Les variations de la vitesse de rotation à chacun des chocs sont liées à l'inclinaison de chaque équateur sur celui de l'époque précédente, de telle manière *qu'en général* un angle faible correspond à une augmentation de vitesse, un angle voisin de 90° à une diminution au contraire. C'est un résultat qui dérive immédiatement de la simple composition des forces, en y admettant cette condition, qu'il n'y ait pas une inégalité très grande dans l'énergie des impulsions successives.

II. La diminution ou l'augmentation de vitesse donnent lieu à la prédominance de deux genres tout différents d'accidents

alignés, les chaînes de montagnes proprement dites et les volcans; les unes dérivent d'une contraction, d'un refoulement, les autres d'une expansion au contraire et de la formation de vallées qui mettent à nu des portions du noyau oxidable de l'intérieur du globe ¹. Ces deux effets doivent être, toutes conditions égales d'ailleurs, en sens inverse l'un de l'autre.

En effet la hauteur et l'accumulation des chaînes de montagnes doivent augmenter avec l'excès de courbure de l'ancienne zone équatoriale sur la nouvelle, puisqu'elles résultent de la nécessité d'une contraction, de la réduction d'un excès de développement. Les vallées au contraire et les volcans qui en dérivent dépendant uniquement d'une augmentation locale dans la courbure de l'enveloppe extérieure du globe doivent apparaître partout au voisinage de l'équateur, si ce nouvel équateur a partout une courbure prédominante. Les équateurs pour lesquels la vitesse s'est accrue doivent donc présenter en définitive un plus large développement du phénomène volcanique, tandis que ceux pour lesquels la vitesse a été ralentie doivent présenter de plus considérables effets de l'exhaussement montagneux par contraction. Néanmoins nous verrons un peu plus loin que le passage de l'applatissage polaire à la courbure équatoriale, résultat ordinaire du ralentissement, vient apporter de grandes modifications locales à ce résultat.

III. Quant aux montagnes proprement dites, nous avons montré ² par des raisons géométriques que leur étendue était d'autant plus restreinte que l'angle formé par chaque équateur avec celui qui le précède était plus aigu; et que leur place théorique était dans ce cas à égale distance des points de rencontre de ces deux cercles. Quand l'angle vient à approcher au contraire de 90°, les chaînes doivent se disperser sur tout le contour et apparaître en particulier vers les points de jonction eux-mêmes.

IV. Le phénomène volcanique suit des lois un peu différentes: dans le cas de l'angle aigu qui annonce un accroissement de vitesse et par conséquent de courbure équatoriale, ce phé-

¹ Voir au chapitre IX, p. 233.

² Chap. VI, Principe IV, p. 163-168.

nomène peut exister sur tout le pourtour du nouvel équateur ; dans le cas d'un angle plus voisin de l'angle droit le phénomène volcanique, résultat de l'expansion des fractures, ne peut appartenir qu'à des points particuliers, à ceux qui dans le changement d'axe ont éprouvé un rapprochement notable de l'équateur et par là une augmentation dans la courbure superficielle.

Il y a donc une sorte d'antagonisme ou plus exactement une sorte de compensation entre le phénomène des ridements et celui des volcans, compensation qui tend à rendre très apparents certains équateurs pour lesquels la vitesse a pu cependant être fortement augmentée ; mais il faut ajouter que cet effet a dû avoir lieu surtout aux premières époques, alors que l'écorce oxidée du globe était assez peu épaisse et a dû livrer, par le creusement des vallées de fracture, un plus facile accès vers le noyau de matière primitive.

En résumé une solidarité très nette, quoiqu'assez complexe, existe entre ces diverses circonstances : l'inclinaison successive des équateurs l'un sur l'autre, la disposition des montagnes en étendue, celle des volcans, et enfin le mouvement général des eaux à chaque époque, mouvement par lequel la variation de la vitesse nous est géologiquement appréciable avec une approximation plus ou moins précise. Cette triple et quadruple relation nous donne donc des moyens de vérification chronologique capables d'atteindre par leur faisceau d'ensemble aux conditions d'une certitude absolue pour le système lui-même, car les coïncidences de symétrie dues au hasard ne peuvent jamais s'exercer qu'entre des limites fort restreintes et ne sauraient aucunement atteindre au caractère de récurrence, qui n'appartient qu'aux faits réguliers, qu'aux lois de la nature.

Une simple récapitulation mettra à même d'apprécier tous ces résultats.

Le premier équateur apparent, succédant à une rotation dont la direction nous est inconnue, porte néanmoins déjà ce caractère, que les deux principales chaînes de montagnes y sont sensiblement aux deux extrémités d'un même diamètre ; ce

caractère peut avoir appartenu à l'équateur de la première rotation *réelle* du globe : nous verrons il est vrai plus tard que le premier état de la terre a dû être suivant toute probabilité analogue à celui des satellites planétaires au tems actuel ; mais le passage de l'état sphérique même à l'état ellipsoïdal donne en certains points un excédant à l'ancienne surface, et ainsi le premier choc a dû déjà déterminer des ploisements dans l'enveloppe solidifiée. Au reste il est difficile de savoir si ce premier changement a eu pour principal effet le soulèvement du granit par influence volcanique, c'est-à-dire par le moyen des fractures, ou par l'influence des ridements.

Le second équateur, celui de l'Ecosse et du Dovrefield, indique par son angle (42°)¹ un nouvel accroissement dans la vitesse, aussi est-il signalé par des éruptions granitiques, porphyriques, etc., comme cela est visible en Ecosse, en Angleterre, en Norvège, en Finlande, dans l'Amérique du sud où les chaînes méridiennes de roches quarzeuses et métamorphiques qui sillonnent le plateau du Brésil peuvent sans doute lui être en partie rapportées ; enfin le surgissement des granits et autres roches ignées de l'Altaï paraît avoir aussi le même âge. Néanmoins, et quoique le phénomène volcanique ait dû s'étendre sur tout le contour, on voit qu'il y a eu accumulation de ridements sur l'Europe occidentale et sur le sud de l'Australie, contrées dont l'une est exactement située vers la partie moyenne entre les deux points d'intersection, et dont l'autre est très voisine de son antipode.

L'équateur du terrain houiller, celui qui s'étend des Indes au Mexique, a un angle notablement plus ouvert que le précédent, 60° , et tel que l'on ne saurait décider s'il correspond à une augmentation ou une diminution dans la vitesse ; cette question sera résolue lorsqu'on reconnaîtra si le soulèvement N.S. de l'Oural provient de ridement ou bien d'une éruption grani-

¹ Pour éviter les redites, nous nommons en général *angle* d'un équateur celui que fait son plan avec celui de l'équateur précédent. Ces angles sont marqués sur le tableau placé au commencement de ce chapitre. Les *points d'intersection* dont il sera question sont aussi toujours ceux de l'équateur dont on parle avec l'équateur de l'époque antérieure.

tique par suite d'une longue fracture, cette fracture ne pouvant guère convenir qu'au cas d'une augmentation de rapidité, vu le voisinage de l'équateur précédent. Quant aux ridements quise montrent sur l'équateur même, il est essentiel de remarquer qu'ils sont ce qui paraît être convenable à un angle de 60° , c'est-à-dire répandus sur une partie assez étendue du contour, sans atteindre toutefois les points d'intersection; l'une des chaînes, celle des Rocheuses, est précisément à égale distance de ces points; l'autre chaîne, celle des Gates, atteint presque pour nos yeux cette position par les îles Maldives et Chagos qui la continuent, et il est possible de supposer une prolongation sous-marine plus ou moins marquée jusque vers notre cercle polaire antarctique.

Il paraîtra sans doute surprenant que le cercle suivant, celui des Andes du Pérou et des côtes orientales d'Asie, qui correspond à un immense développement continental, indique néanmoins par son angle une augmentation dans la vitesse, et une augmentation même considérable. Mais ces deux résultats ne paraîtront nullement en désaccord, si l'on remarque que tout ce vaste développement ne présente pour ainsi dire qu'une longue série d'anciens volcans : les Andes elles-mêmes, le Guatemala, la côte de l'Amérique septentrionale, le Kamtschatka, les Îles Aleutiennes, Kurilles, celles du Japon, les Philippines etc., ne forment pour ainsi dire qu'une traînée volcanique, et nous savons qu'un pareil phénomène est le résultat nécessaire d'une augmentation dans la courbure de la zone équatoriale. c'est-à-dire d'une augmentation de vitesse. C'est de tous les équateurs celui dont l'angle est le plus petit, et c'était à lui par conséquent que devait appartenir la prédominance de l'action volcanique : les faits sont donc ici étroitement unis aux résultats de nos théories. Nous avons vu du reste, dans l'examen géologique, que les terres de nos contrées avaient été alors abandonnées par les eaux et plus fortement même que de nos jours, ce qui correspond à une vitesse de rotation considérable, puisque nous sommes au tems actuel dans une période d'accélération.

À l'époque suivante au contraire, à celle dont l'équateur

longeait l'Europe et l'Afrique occidentales, un ralentissement a dû se faire sentir, puisque son angle est de 75° . Aussi voit-on que les montagnes terrestres et soumarines y sont répandues sur tout le contour, et cette concordance avec la diminution de vitesse et avec la grandeur de l'angle est extrêmement frappante. On sait aussi par l'examen géologique que malgré la position équatoriale de nos contrées elles ont dû présenter alors de grandes étendues de continents, ce qui indique nécessairement un reflux des eaux vers les pôles. Les deux périodes que cette révolution sépare sont donc physiologiquement très dissemblables et si l'on y joint pour nos contrées le passage d'une haute latitude à la position équatoriale, on verra que toutes les raisons se sont réunies pour produire alors une mutation complète dans les espèces organiques, comme l'étude des débris fossiles l'a fait positivement reconnaître pour cette époque du grès bigarré.

J'ai déjà montré, d'après l'exhaussement des mers, que l'époque jurassique, dont l'équateur était aux Monts Lupata, avec l'angle de 50° , était caractérisée par un notable accroissement de la vitesse; la grandeur de l'angle pourrait peut-être laisser quelque doute que cette augmentation ait été réelle, une considération particulière me fait néanmoins penser que non seulement elle a eu lieu, mais qu'elle a pu être très forte : la vitesse se trouvant en effet très ralentie à l'époque précédente, la force du choc a pu être prédominante et la direction du mouvement résultant se rapprocher beaucoup de la sienne. Or maintenant non seulement la grande hauteur du niveau des eaux dans nos contrées à l'époque du terrain jurassique, mais encore la disposition des montagnes répond parfaitement à l'idée d'une vitesse considérable. On voit en effet les Monts Lupata et Madagascar rassemblés exactement à égale distance entre les points de rencontre avec l'équateur précédent, se concentrer sur un faible espace, correspondant d'ailleurs exactement pour la place et pour l'étendue avec l'archipel que rencontre le même cercle dans l'Océan équinoxial et qui est situé à l'autre extrémité du même diamètre. Quant à l'Oural il est facile de reconnaître, d'après les observations, que les ali-

nements échelonnés que ce système y détermine ne sont autres que des soulèvements granitiques formés par fractures dans des massifs anciens : ces lignes de soulèvement répondent chacune à de grandes vallées semblablement orientées qui les continuent, vallées où coulent la Bielaia, la rivière Oural et le Tobol. Un tel phénomène de fractures convient bien à une augmentation de la vitesse, et encore ici tous les résultats sont parfaitement concordants.

L'époque du Caucase et des Alpes orientales, avec son angle de 80° et venant après une période d'accélération, ne saurait guère correspondre à autre chose qu'à une diminution de vitesse : or nous voyons en effet les montagnes se répandre sur tout le contour de l'équateur avec l'universalité la plus remarquable, et si l'on joint à ce résultat, que nous avons déjà fait ressortir, le refoulement des mers loin de l'équateur attesté par les dépôts des eaux douces qui remplissent l'intervalle entre les calcaires marins de l'oolite et ceux de la craie, il faudrait bien convenir que nous trouvons encore dans tous les grands accidents de cette révolution du globe l'harmonie théorique la plus surprenante.

Voici de nouveau peut-être, à l'époque de la craie, une accélération de la vitesse malgré un angle assez considérable, 60° ; c'est celui de l'équateur qui passe sur la Guinée et le Canada ¹. Cette supposition d'une augmentation de vitesse, qui semble réclamée par les faits géologiques et physiques, aurait sa justification, comme pour l'époque de l'oolite, dans la faible rapidité de la période précédente, qui laissant une grande prépondérance au choc, a pu ainsi donner une augmentation définitive, malgré sa direction peut-être un peu contrastante. Les faits, quoique peu tranchés, peuvent se ranger à ce point de vue : d'une part nous voyons en effet les eaux revenir sur nos contrées bien que nous nous soyons éloignés de l'équateur, et quant aux montagnes nous les voyons peu marquées, comme il convient à une accélération, bien que la grandeur de l'angle

¹ La projection sur le plan de la mappemonde donne très mal l'idée de l'angle formé par ce cercle et le fait paraître trop aigu ; il faut l'observer sur la sphère même.

les ait répandues sur un assez long espace ; enfin on voit se montrer aussi plusieurs alignements volcaniques non loin des points d'intersection, ce qui est le signe constant d'une augmentation de la courbure.

L'équateur des Andes du Chili, dont l'angle est de 88° , a des ridements fort étendus, ce qui est bien en harmonie avec cette inclinaison ; mais il y a parmi eux une portion fort remarquable par sa proéminence et la netteté de son tracé ; la position de cette grande chaîne va nous fournir la vérification systématique la plus précieuse, la plus étonnante par sa précision. Voici en quoi elle consiste.

Les pôles de l'époque précédente viennent tomber, comme on l'a vu, sur le contour même du cercle dont nous parlons, l'un à l'île de Chiloë, l'autre au centre de la Mongolie, et réciproquement les pôles de notre système des Andes iront tomber aussi sur le cercle de la Guinée, à égale distance des points d'intersection ; or dans une telle position que doit-il arriver ? Deux phénomènes très remarquables et très nettement tranchés. Si l'ancienne forme du globe, avant le choc, eût été une sphère, les ridements correspondants à l'excès de l'ancienne surface au-dessus des nouveaux pôles, ces ridements se répandraient également sur le contour du nouvel équateur ; mais dans le cas de deux ellipsoïdes il n'en est plus ainsi : la région de l'ancien pôle (représenté ici par l'île Chiloë) devant éprouver une grande expansion instantanée pour atteindre à la forte courbure du nouvel équateur, expansion qui est maintenue dans toute son écartement d'après le mode de formation des failles¹, il en résultera un allongement notable de l'enveloppe solide sur les nouveaux méridiens qui correspondent à cet ancien aplatissement polaire, et par conséquent pour se réduire à la grandeur de tous les autres méridiens ils devront se plisser davantage. De là résulte comme conséquence évidente la formation d'une ligne montagneuse proéminente sur l'intervalle de l'ancien affaissement polaire, c'est-à-dire à égale distance entre les points de jonction des deux équateurs ; comme se-

¹ Voir notre théorie des failles pag. 169.

conde conséquence, des lignes de volcans pourront surgir sur ces vallées de fracture ainsi soulevées et sur ces montagnes dont les flancs mettent à nu la matière primitive attaquable par les eaux.

Ces deux résultats de la théorie sont ici réalisés : de part et d'autre de l'île Chiloë (l'ancien pôle) s'étend la grande chaîne des Andes du Chili, et l'on sait que cette ligne est toute parsemée de volcans. Près de l'autre pôle, au lac Baikal, existe aussi une chaîne de montagnes sur le contour de ce même équateur : les volcans n'y sont pas connus, et s'ils ont existé, l'éloignement de la mer a dû évidemment les éteindre ; mais sans tenir compte de cette condition négative et indifférente, nous n'en avons pas moins dans la chaîne des Andes une réalisation extrêmement frappante des combinaisons et des nécessités théoriques.

Le système des Pyrénées formant un angle de 70° , la dispersion des ridements y occupe un grand espace, mais leur concentration est encore au point intermédiaire, du côté du continent du moins, car le point opposé est caché par les eaux. Il y a incertitude sur la variation de vitesse : dans nos contrées cette période est signalée par un faible envahissement des eaux, mais comme nous nous rapprochions de l'équateur il ne saurait en résulter une indication précise. La grandeur de l'angle, l'absence des volcans et le peu de profondeur des eaux marines toutes ces conditions ensemble paraissent signaler le ralentissement. Nous avons vu que la grande taille des espèces animales rentrait encore dans cette combinaison, et en effet deux diminutions successives ont dû réduire extrêmement la vitesse.

La dispersion des ridements à l'époque suivante, celle de l'Altaï, concorde parfaitement avec l'angle de l'équateur qui est très considérable, 80° . Néanmoins la hauteur des montagnes ne paraît pas être en proportion du grand ralentissement que cet angle ferait supposer. Il ne serait pas impossible en effet que malgré cette forte inclinaison il n'y eût eu accélération au contraire : car la grande lenteur du mouvement précédent a pu donner assez de prédominance au choc pour faire passer de

son côté la direction et l'intensité de la résultante; et la nature des choses semble s'opposer en effet à ce que les diminutions de vitesse dépassent une certaine limite numérique. Le mouvement des eaux dans nos contrées ne saurait guère nous donner d'indications à ce sujet à cause du changement de latitude, mais la taille des espèces paraît se rapprocher bien davantage de celle de notre époque. Au reste malgré quelque incertitude que laisse ce sujet de la vitesse, la dispersion des montagnes sur tout le contour de l'équateur dont il est question n'en est pas moins en harmonie parfaite avec la grandeur de son angle et c'est là encore une coïncidence sur laquelle on ne saurait trop appuyer.

L'équateur du Guatemala pourrait appartenir encore d'après la valeur de son angle, 55° , à une période d'accélération : une raison inverse de celle que nous venons de donner aurait bien pu faire que cette accélération ne fut pas considérable ou n'eût pas même eu lieu du tout; néanmoins nous avons des raisons géologiques de penser qu'il y a eu en réalité augmentation de vitesse et même une vitesse plus considérable que de nos jours. L'abandon de notre continent, alors polaire, par les eaux paraît déjà le prouver; le peu de hauteur des montagnes, le grand développement des fractures littorales au contraire et la grande ligne de volcans que cet équateur a déterminée, le démontrent plus sûrement encore. Quoi qu'il en soit du reste et que le phénomène soit volcanique ou résultat de contraction, la disposition des terrains soulevés n'en est pas moins ce qui convient à un angle de 50° : on voit en effet que du côté de l'Amérique elle se concentre entre Mexico et les côtes du Brésil, en Asie entre Sumatra et Mindanao, c'est-à-dire dans les deux espaces¹ intermédiaires entre les points de

¹ La découpure de l'Afrique au Cap de Bonne-Espérance et l'alignement des montagnes de ce pays sembleraient faire exception à ce résultat, mais cette exception n'est qu'apparente : il n'y a point là de ridements, ce ne sont que des fractures et de vastes affaissements dans les plateaux qui forment la partie méridionale du continent africain et qui y témoignent seulement d'une grande élévation du niveau de la mer à une époque antérieure. Les couches sont en effet généralement horizontales dans les montagnes du Cap, dont

rencontre, espaces qui jouent un si grand rôle dans toutes nos relations de chronologie.

J'arrive à l'époque qui a précédé la nôtre, celle de l'Himalaya et de l'Atlas : l'angle de 70° paraît y indiquer un ralentissement, et la grandeur des montagnes concourt en effet puissamment à confirmer cette conjecture, dont nous avons donné encore d'autres raisons géologiques. Or on voit que leur dispersion sur toute l'étendue de l'équateur est aussi ce qui est commandé à la fois par la grandeur de l'angle d'inclinaison et par la diminution de la courbure équatoriale. Cette dispersion est aussi évidente que possible sur les quatre continents de notre hémisphère; dans l'autre, la profondeur des mers fait que l'on n'en découvre que des traits épars, comme la nouvelle Calédonie, une portion de la nouvelle Zélande, et en Amérique la ligne de partage qui doit exister suivant toute probabilité entre deux des plus grands affluents de la rivière des Amazones.

Quant à l'époque actuelle, l'angle de 40° y indique, indépendamment de toute raison géologique, une forte accélération; nous ne répèterons point tout ce que nous avons dit à ce sujet sur la faible étendue des ridements, l'exhaussement des eaux à l'équateur, et la formation des volcans. Ce que nous nous bornerons à remarquer, c'est que tous ces résultats sont théoriquement liés entr'eux et à la faible grandeur de l'angle que fait notre équateur avec celui du système précédent.

Tel est en résumé l'ensemble des relations physiques qui dérivent de la succession des équateurs : elles donnent, je le pense, un faisceau de vérifications assez puissant pour équivaloir à la certitude, je parle de la certitude qui peut appartenir à des questions de ce genre.

De quelque autre manière en effet que l'on vienne à combiner la succession des cercles de soulèvement que la forme des continents laisse admettre, on ne peut plus en déduire les

l'une est nommée Montagne de la Table : c'est quelque chose d'analogue à la structure des Vosges ou à celle de certains plateaux jurassiques dans nos contrées.

relations si spéciales que nous trouvons dans leur ordre géologiquement déterminé : tous ces faits, toutes ces combinaisons se lient et s'appuient donc mutuellement.

Nous terminerons par un résultat assez remarquable comme résumé des chances de hasard : c'est que sur *quatorze* chocs, il y en a précisément *sept* que nous sommes amenés à regarder comme décidément rétrogrades.



CHAPITRE XII.

CONSIDÉRATIONS SUR L'EXTENSION DU PRINCIPE DES CHOCs EN ASTRONOMIE.

Après avoir terminé les questions qui sont du domaine de l'observation terrestre, nous croirions avoir manqué à une partie essentielle de notre étude, si nous négligions d'envisager d'une manière plus générale le principe des chocs, qui forme la base principale de nos recherches, et d'en faire entrevoir l'application aux faits de l'astronomie. Reprenant d'abord ce sujet au point où nous l'avons laissé à la fin du Chapitre VIII, nous serons forcés de conclure d'abord que l'influence des chocs sur la rotation du globe implique aussi leur influence sur celle des autres corps planétaires, et par conséquent sur tous les autres éléments qui se coordonnent à ces rotations.

Considérer comme distinct le phénomène de la rotation dans les planètes, ce n'est pas essayer de porter une main profane sur une pierre de cet admirable édifice astronomique élevé par le génie moderne; car ce phénomène ne paraît essentiel à aucune grande loi d'équilibre. Ce qui frappe surtout en lui c'est son indépendance, c'est de rester étranger à ces relations mutuelles qui lient entr'eux les grands corps de notre système et règlent pour ainsi dire leurs mouvements sympathiques. La sphéricité de ces corps, leur fluidité intérieure et cette faculté de changer leur rotation sans altérer sa régularité, semblent trois conditions réunies comme à dessein et concourant vers un même but, celui d'assurer une uniformité indéfinie au mouvement propre de ces corps, uniformité qui paraît nécessaire au maintien permanent des types actuels de l'organisation. S'il était permis de porter jusque-là les vues philosophiques, il

semblerait que ces trois conditions qui dérivent toutes de l'une d'entr'elles, la fluidité, ont été données aux corps célestes comme une armé contre ces accidents dans l'ordre de l'infini, les chocs, afin que leur mouvement propre puisse demeurer indéfiniment en harmonie avec le développement régulier de l'organisation et de la vie, dont ils demeurent comme les supports inertes et relativement immuables, à travers la caducité des êtres.

Mais de semblables considérations ne sont rien au point de vue géométrique, c'est en eux-mêmes qu'il faut examiner les mouvements de rotation : dans leurs directions, leurs relations, leurs causes possibles... Il est en premier lieu intéressant de comparer leurs directions dans les planètes avec celle de la révolution de ces corps.

Un des caractères certainement les plus remarquables dans le mouvement général des corps planétaires, c'est l'ensemble merveilleux avec lequel ils décrivent, tous dans le même sens, autour de leur centre d'attraction, des courbes pour ainsi dire parallèles et dont les plans s'approchent extrêmement de se confondre en un seul. Je laisse aux philosophes à faire ressortir la haute pensée d'harmonie qui peut avoir présidé à cette merveilleuse architecture céleste ; de faire voir quelles conditions de durée ressortent de ce parallélisme des mouvements maintenus indéfiniment dans des cycles distincts et sur des routes qui ne se rencontreront jamais. Mais aux yeux du géomètre qui étudie les lois mathématiques des mouvements et celles des forces immédiates qui les ont pu produire, il résulte de cet ensemble une déduction toute spéciale, c'est celle de la communauté ou même de la simultanéité d'origine. Telle est en effet la pensée philosophique qui a donné naissance aux principales hypothèses que d'illustres savants ont conçues pour expliquer l'origine de notre système planétaire, hypothèses dont nous devons dire bientôt quelques mots.

Mais si la concordance extraordinaire entre les grands mouvements des planètes vient prescrire cette relation de communauté, en sera-t-il de même à l'égard des mouvements de rotation, et la même harmonie existe-t-elle entr'eux ? Aucu-

nement, et par un concours qu'il faut regarder ici comme une heureuse loi du hasard, ces mouvements présentent, relativement aux éléments des orbites respectives des planètes, tous les degrés pour ainsi dire de discordance. Pour le montrer il suffit de mettre en regard les inclinaisons de l'équateur de chacune d'elles sur le plan de l'écliptique, qui est pour toutes approximativement celui de leur orbite. Cette inclinaison est pour

Jupiter.	0°
La Terre.	23°
Mars.	28°
Saturne	30°
Mercure	60°
Vénus.	75°
Uranus.	79°

Ainsi tandis que le mouvement de translation des planètes s'effectue pour toutes presque dans un plan unique et avec une orientation uniforme, leur rotation a lieu dans des plans équatoriaux non seulement inclinés sur le premier, mais formant avec lui tous les angles possibles d'inclinaison. Cette considération est déjà par elle même très éloquent pour prouver l'indépendance de ce mouvement et sa séparation du mouvement de translation depuis l'origine ¹. Mais il y a lieu d'établir une comparaison, dans notre système planétaire lui-même, qui fera bien mieux ressortir encore ces contrastes.

Les satellites des planètes présentent dans leur double mouvement une particularité toute spéciale, qui peut être comptée comme l'un des plus remarquables phénomènes de la physique céleste. Pour eux en effet les deux mouvements de rotation et de révolution sont complètement solidaires, ils sont de même direction et isochrones, de telle manière que ces petits astres présentent toujours la même face, le même hémisphère à leur

¹ L'inégalité des vitesses de rotation pour les diverses planètes, en particulier celle qui existe entre les énormes vitesses de Jupiter et de Saturne et la vitesse de la Terre concourt bien vers la même conclusion.

centre d'attraction. Ce grand et important caractère paraît former, dans notre système, une loi générale du mouvement des satellites : bien connu pour le nôtre, pour la lune, il a été mis en évidence par d'ingénieuses observations pour ceux de Jupiter et de Saturne. Indépendamment de toute cause que l'on puisse donner à ce phénomène, ce qui importe réellement ici c'est ce caractère de loi uniforme qui appartient exclusivement au mouvement de rotation des satellites, sans se reproduire dans les planètes ; et cependant que sont les planètes, si ce n'est les satellites d'un astre immense, le Soleil ? Les caractères du mouvement général sont du reste identiques dans ces deux ordres de corps : même courbe presque circulaire, même concordance dans la translation de tous les satellites d'un même astre que dans celle de toutes les planètes entr'elles : tout demeure analogue, si ce n'est le mouvement de rotation. Quant à ce dernier, il porte dans les satellites le caractère d'une loi simple, générale, uniforme, simple par dessus tout ; tandis que dans les planètes l'absence de loi est d'une évidence non moins remarquable. Or si l'on admet avec raison que deux groupes aussi semblables n'ont pu être soumis dans l'origine à des conditions différentes, à quelle manière d'être accorderait-on la supposition de préexistence originaire ? Sera-ce à la loi simple des satellites ? Sera-ce à la loi multiple, à la loi discordante des planètes ? Qui hésiterait dans cette alternative ? Évidemment c'est le mouvement des satellites qui indique la manière d'être originaire, évidemment la diversité complète dans les mouvements des planètes est la conséquence de leurs perturbations par suite des chocs qu'elles ont reçus, tandis que les satellites soit par leur petitesse, soit par leur formation récente auraient échappé jusqu'ici à ces accidents. Mais nous reviendrons un peu plus loin sur ces considérations, il suffit pour le moment d'avoir reconnu dans le système planétaire la vraisemblance du phénomène général des chocs, et nous essaierons tout d'abord de faire voir comment ce grand principe peut embrasser comme cas particuliers quelques phénomènes astronomiques pleins d'intérêt par leur étrangeté et dont la solution précise paraît encore être vainement cherchée. C'est aux co-

mètes elles-mêmes que nous en ferons la première application.

On sait¹ que les comètes sont essentiellement composées d'une sorte d'enveloppe lumineuse, quelquefois à couches concentriques, que l'on nomme *nébulosité* ou *chevelure*; vers son centre, mais séparé d'elle par une région moins lumineuse, existe ordinairement un noyau plus ou moins éclatant; enfin elles sont souvent accompagnées de longues traînées lumineuses nommées leurs *queues*, dirigées en général à l'opposite du soleil, mais non en ligne directe, *cette direction inclinant toujours vers le chemin que la comète vient de parcourir.*

Les belles expériences de M. Arago sur les comètes de 1819 et de 1835 ont suffisamment démontré que ces astres empruntaient au moins une partie de leur éclat au soleil, et cela est plus évident encore pour les longues traînées lumineuses qui les accompagnent. La lumière solaire suffirait d'ailleurs pour faire apparaître ces dernières, en supposant l'existence d'une matière capable de la réfléchir; mais il n'en est pas de même de l'éclat du noyau. Trois circonstances principales sont donc à expliquer: 1^o La disposition annulaire de la nébulosité; 2^o la formation d'une traînée de matière destinée à composer la queue, et sa disposition telle que l'a révélée l'observation; 3^o enfin la concentration d'une vive lumière sur le noyau central. La rotation va nous conduire à tous ces résultats.

S'il est vrai en effet, et le calcul ne permet point d'en douter, que pendant l'immense durée des âges ces astres aient été pour les planètes les instruments de chocs multipliés, la vitesse de rotation qu'ils ont acquise eux-mêmes de ces chocs a dû être incomparablement plus grande, en raison de la différence des masses. Une comète par exemple dont le rayon équatorial serait d'environ 200 lieues, la masse $\frac{1}{500}$ de celle de la terre, et qui rencontrerait notre planète avec une différence de vitesse de 1200.000 lieues par jour, acquerrait, en supposant même que la direction du choc ne passât qu'à une lieue de son centre de gravité, acquerrait une vitesse de rotation de 36.000 lieues par jour à son équateur. Le tems de sa

¹ Voir la notice de M. Arago, Annuaire du bureau des long. 1832.

révolution totale ne serait que de $\frac{3}{4}$ d'heure. La pesanteur y devant être d'ailleurs dix fois moindre que sur la terre, il est facile de voir qu'à l'équateur du petit astre la force centrifuge serait *quinze* fois plus puissante que la gravité. En vertu donc de cette force tout le liquide, tant intérieur qu'extérieur, doit s'échapper suivant la tangente, en même tems que tous les fragments solides détachés, et ne laisser qu'un noyau d'un rayon tel qu'à son équateur la pesanteur soit égale à la force centrifuge, rayon qui dans le cas actuel serait de 70 lieues, mais qui peut devenir extrêmement petit. Quant aux molécules liquides lancées dans l'espace, les résistances mutuelles modifiant peu à peu les trajectoires symétriques qu'elles tendraient à décrire, elles devront former en définitive à une certaine distance du noyau une sorte d'anneau satellitaire, une enveloppe ellipsoïdale, douée d'un mouvement de circulation propre, comme l'anneau de Saturne, autour de l'axe même du noyau. Cette enveloppe, très aplatie dans le sens de l'axe, aurait la forme d'un disque creux, et sa section méridienne serait comprise entre deux ellipses, ayant même petit axe, ellipses dont l'extérieure serait d'autant plus allongée par rapport à la courbe interne, que l'épaisseur de l'anneau serait plus grande. En supposant que par l'éloignement du soleil cette enveloppe se solidifie et se contracte, sa forme générale ne doit pas changer, mais seulement sa vitesse de circulation.

Maintenant à l'approche du soleil non seulement cet anneau doit reprendre l'état liquide, mais se résoudre au moins partiellement en vapeurs. Or comme d'après la nature du mouvement la force centrifuge y fait déjà équilibre à la pesanteur, la force expansive de ces gaz les rejettera tout d'abord hors de l'attraction du noyau, les laissant pour un moment indépendantes, soumises seulement à l'attraction solaire et à l'impulsion générale. Mais comme l'attraction exercée par le soleil sur ces vapeurs est beaucoup moindre que celle qu'il exerce sur le centre de la comète elle-même, elles ralentiront leur marche en même tems qu'elles agrandiront leur orbite, et elles seront ainsi laissées en arrière par la comète, les plus éloignées se trouvant d'ailleurs le plus en dehors de la route qu'elle a par-

courue. Ainsi concevra-t-on que ces astres puissent conduire à leur suite une trainée de matière toujours dirigée à l'opposite du soleil et vers la partie de leur orbite qu'ils viennent de parcourir¹. La lumière du soleil réfléchi par cette trainée de vapeurs et par l'enveloppe elle-même suffira sans doute pour produire le pâle éclat de la chevelure et de la queue. Cherchons maintenant quelle pourra être l'origine de l'éclat plus vif du point lumineux central. Il provient, selon nous, de la concentration des rayons solaires réfractés à travers l'enveloppe liquide, comme à travers une vaste lentille optique.

Il ne faut point perdre de vue en effet, et c'est là un point délicat, que la courbure extérieure de l'enveloppe fluide est plus prononcée que sa courbure interne, et que par conséquent lorsqu'il tournera vers le soleil sa convexité équatoriale, cet anneau doit produire par rapport aux rayons solaires l'effet d'un *ménisque convergent*, propre à la concentration de la lumière en un foyer réel. Le noyau intérieur de la comète, plus ou moins rapproché de ce foyer, recevra donc une quantité considérable de rayons et sera illuminé d'un vif éclat.

La position variable du foyer par rapport à ce noyau solide peut rendre compte d'ailleurs de ces secteurs lumineux ou obscurs que l'on aperçoit ordinairement dans la partie de la nébulosité qui est tournée vers le soleil.

Ainsi s'expliqueraient, par le seul fait d'une rotation énergétique, résultat nécessaire de notre système, toutes les apparences caractéristiques des comètes : ces conséquences, qui dérivent immédiatement des faits terrestres, nous paraissent donc mériter l'attention des astronomes. Il ne sera peut-être pas inutile d'ajouter qu'elles nous paraissent susceptibles encore d'être appliquées à des faits astronomiques beaucoup plus vastes, à la théorie des nébuleuses.

¹ On ne peut supposer que cette trainée de vapeurs soit pour toujours séparée de la comète, qui à la longue s'épuiserait ainsi entièrement : à mesure qu'elle s'éloigne de nouveau du soleil, la différence de vitesse diminuant et l'attraction du petit astre devenant prédominante, les vapeurs, condensées d'ailleurs par le froid, doivent se rapprocher du noyau et finiront par s'y réunir de nouveau pour s'en séparer encore à un autre passage au périhélie.

La seconde application que nous donnerons du principe des chocs concerne une des plus grandes singularités de notre système planétaire, l'anneau de Saturne. Nous rapportons cette cause aux phénomènes qui ont pu suivre l'établissement brusque de la dernière rotation de cet astre.

La vitesse de rotation de Saturne est immense, un point de son équateur fait dans un tems donné le tiers du chemin que parcourt pour le même tems la terre dans son orbite. Considérée comme phénomène originaire cette rotation aurait eu pour simple effet d'aplatir le sphéroïde dans le sens de l'axe, mais l'on n'en aperçoit pas directement d'autre conséquence; si on le considère au contraire comme phénomène consécutif et instantané, on peut en concevoir des suites très remarquables, si l'on a égard aux principes que nous avons exposés aux Chapitres VI et IX. En effet le passage brusque à cette énorme vitesse en donnant au nouvel équateur de Saturne une courbure extrêmement forte, doit par le même fait y avoir creusé des vallées extrêmement profondes, et comme il ne saurait guère y avoir aucun doute que la constitution intérieure de cette planète ne soit analogue à celle de la terre, de là un développement immense du phénomène volcanique, et la production d'une énorme quantité des vapeurs, soit par la fusion des glaces, soit par la décomposition de l'eau, soit même par la vaporisation de la matière intérieure. Favorisée par la grande force centrifuge de Saturne, cette masse de vapeur se maintiendra au-dessus de l'équateur et s'y accumulera: mais à mesure qu'elle s'élèvera au-dessus de la planète, la dilatation qu'elle éprouvera dans ces régions où la pression est moindre venant à absorber beaucoup de chaleur, il s'en condensera ¹ et se solidifiera même une quantité proportionnelle; la température atmosphérique de Saturne, quatre-vingt fois plus froide que la nôtre, rend ce phénomène très simple à concevoir, d'après

¹ C'est un phénomène analogue à la formation de la glace sur les sommets de montagnes; et la congélation de vapeurs semblables à celles de nos volcans dans la froide atmosphère de Saturne me paraît un fait proportionné à la congélation de l'eau dans la nôtre.

ce que l'on sait de la solidification de certains gaz, comme l'acide carbonique, par le froid de l'évaporation.

Maintenant la partie ainsi solidifiée de l'atmosphère de Saturne s'abaissant par son poids, sa rotation s'en trouvera augmentée, d'après les principes si clairement exposés par Laplace ¹, et elle se soutiendra ainsi en anneau solide, devenu un véritable satellite aux dépens de la matière même de la planète.

Quant aux satellites globulaires des planètes, nous ne pensons point que l'on puisse faire aucune assimilation d'origine entre l'anneau de Saturne et ces corps, isolés sur leur trajectoire et placés hors des limites atmosphériques; néanmoins la concordance générale de leurs révolutions avec la rotation de leur planète centrale, comme aussi la concordance de la révolution des planètes avec la rotation solaire, témoignent assez pour nous que le principe des chocs n'est pas étranger à leur provenance. Toute la question est dans la manière de relier cette cause à l'effet produit.

Buffon a eu, comme l'on sait, la première idée d'attribuer à une cause semblable l'origine commune des planètes. Il imagine de faire dériver tout le système planétaire de la matière même du soleil projetée par le choc oblique d'une comète et condensée ensuite en globules par le refroidissement. Cette hypothèse a soulevé bien des objections ², qui du reste prennent surtout leur gravité de la formation simultanée des satellites: mais si l'on admet comme nous la formation successive de ces corps, il y aura une difficulté non moins grande à les supposer provenant de l'excoriation des planètes elles-mêmes; nous reviendrons du reste sur ces principes et sur la possibilité de leur modification, nous voulons dire auparavant quelques mots d'une autre hypothèse qui a également considéré, mais sous un point de vue différent, la formation des planètes comme dérivant de la matière solaire elle-même. C'est l'hypothèse

¹ Exposition du système du monde, liv. IV, chap. X.

² Laplace, *ibid*, liv. V, chap. VI.

bien connue de Laplace ; il est utile, pour la généralisation de notre théorie des chocs, de faire entrevoir ce que nous pensons qu'elle peut laisser aussi à désirer. Mais empruntons d'abord à Laplace lui-même l'énoncé sommaire de son système.

« La considération des mouvements planétaires nous conduit à penser, dit cet illustre savant, qu'en vertu d'une chaleur excessive, l'atmosphère du soleil s'est primitivement étendue au-delà des orbites de toutes les planètes, et qu'elle s'est resserrée successivement jusqu'à ses limites actuelles.... On peut conjecturer que les planètes ont été formées aux limites successives de cette atmosphère par la condensation des zones qu'elle a dû abandonner dans le plan de son équateur en se refroidissant et en se condensant à la surface de cet astre. Ces zones de vapeur ont pu par leur refroidissement former des anneaux liquides ou solides autour du corps central ; mais ce cas extraordinaire ne paraît avoir eu lieu dans le système solaire que relativement à Saturne. Elles se sont généralement réunies en plusieurs globes, et quand l'un d'eux a été assez puissant pour attirer à lui tous les autres, leur réunion a formé une planète considérable. Il est facile de voir que les vitesses réelles des parties de l'anneau de vapeurs croissant avec leurs distances au soleil, les globes produits par leur agrégation ont dû tourner sur eux-mêmes dans le sens de leurs mouvements de révolution. On peut conjecturer que les satellites ont été formés d'une manière semblable par les atmosphères des planètes... »

En énonçant ici les doutes que nous pouvons concevoir sur la réalité de ces vues ingénieuses, loin de nous la pensée d'entrer en une sorte de lutte avec le grand nom scientifique de Laplace, et cela nous appartiendrait moins qu'à personne : mais le livre que je produis est le représentant en quelque sorte d'une idée scientifique, celle des chocs, et cette idée a besoin qu'on la défende, qu'on la défende surtout contre les systèmes déjà entrés dans l'opinion et qui sont abrités sous l'illustration de leurs auteurs. Le sentiment de la vérité, à quelque modeste intelligence qu'il appartienne, doit toujours avoir chez elle plus de force que le respect même dû à un grand nom, dans les questions surtout où l'hypothèse et l'imagination ont quelque part.

Quels que soient d'ailleurs les services rendus à la science par l'esprit de système on ne saurait méconnaître que plus qu'aucun autre travail intellectuel il est sujet aux illusions : Descartes sans doute avait un puissant génie mathématique et cependant sa théorie des tourbillons a disparu bien rapidement de la surface des sciences.

La concordance extraordinaire de directions entre tous les mouvements des planètes et des satellites qui forme la base du système de Laplace n'est en réalité qu'approximative, d'après ce que nous avons dit déjà des rotations, et l'observation du mouvement *rétrograde* des satellites d'Uranus ajoute le trait le plus caractéristique à ces contrastes. Néanmoins ce cas seul ne saurait faire une objection réelle, parce que l'on a la ressource de supposer un choc de comète sur cette planète même, antérieurement à la condensation de son atmosphère ; mais les deux principales objections me paraissent dériver de considérations plus générales, relatives à l'expansion même et à la condensation possible de l'atmosphère solaire.

Si l'on calcule la relation qui existe entre le volume qu'occupe actuellement toute la matière réunie du soleil et des planètes, et le volume qu'aurait dû occuper la même somme de matière remplissant une sphère limitée seulement par l'orbite d'Uranus, on est frappé de l'effrayante dilatation qu'aurait dû subir cette matière, remplissant alors un espace *cent milliards* de fois plus grand que celui qu'elle occupe aujourd'hui. Il est permis déjà de se demander s'il est bien vraisemblable d'admettre qu'une chaleur assez considérable ait jamais pu être répandue dans *tout* l'espace planétaire, pour donner aux matières connues une aussi paradoxale raréfaction ; mais ce qui présente une bien autre difficulté, c'est de concevoir l'équilibre qui pouvait exister entre la faible pesanteur de molécules ainsi divisées, placées aux limites de l'espace planétaire, et l'énorme force d'expansion qui les divisait unie à une force centrifuge non moins excessive. L'étendue de l'atmosphère qu'un corps soumis à la rotation peut retenir autour de lui et entraîner dans son mouvement est évidemment inverse de la température, qui augmentant l'expansion des gaz s'ajoute

ainsi à la force centrifuge pour contrebalancer et vaincre la pesanteur : or si actuellement le soleil ne peut contenir la circulation de son atmosphère jusqu'à l'orbe de Mercure, comment l'aurait-il contenue jusqu'à l'orbe d'Uranus alors que la force d'expansion était infiniment plus considérable? Il y a entre la rotation et l'expansion des gaz une exclusion dont aucune théorie ne saurait dépasser les limites.

Mais indépendamment de cette impossibilité, apparente à nos yeux du moins, d'un mouvement de rotation énorme, simultanément à une grande expansion calorifique, il y a dans la condensation elle-même une difficulté tout aussi sérieuse : c'est celle de concevoir comment une zone de vapeurs circulaire aura pu se réunir en un seul globule, les planètes étant isolées en effet chacune sur leur trajectoire. Lorsque l'on songe que la zone extrême avait plus de quatre milliards de lieues en circonférence, quel excès de vitesse ne faudrait-il pas supposer à la molécule la plus éloignée pour atteindre le point de réunion, tandis que le mouvement général est par hypothèse uniforme; ou quelle singulière portée ne faudrait-il pas supposer à l'attraction? En supposant par exemple que l'anneau de Saturne fût liquide, pensera-t-on qu'il puisse jamais se condenser en un globule unique? Pour moi je me perds dans cette idée. Et sans chercher à approfondir encore d'où proviendrait dans le même système l'excentricité des orbites planétaires, la rotation même du soleil, qui est prise pour point de départ, et enfin le synchronisme si particulier des deux mouvements des satellites, je m'arrête dès maintenant devant ces deux premières difficultés de l'expansion et de la condensation atmosphériques, que je regarde comme des obstacles infranchissables pour mon intelligence.

S'il était vrai, comme nous le pensons, que l'ingénieuse théorie de Laplace ne pût réaliser toutes les données nécessaires au grand ensemble de faits astronomiques qu'elle embrasse, il ne resterait donc, ce semble, que l'hypothèse des chocs qui pût être appliquée à cette concordance si remarquable des rotations et des révolutions : je pense en effet qu'en modifiant l'idée de Buffon il est possible d'écarter les principales diffi-

cultés qu'elle a soulevées. C'est dans le corps choquant et non plus dans l'astre central que nous croyons qu'il faut chercher les matériaux des satellites et leur provenance; voici comme nous pensons que l'on peut concevoir ce phénomène qui, répété à diverses reprises dans notre système planétaire, porte ainsi tous les caractères d'une loi. L'élasticité des corps nous fournira d'abord le principe physique sur lequel nous établirons les causes de la disposition si remarquable des corps satellitaires.

Nous avons dit déjà que le grand effet produit par le choc d'une masse médiocre sur la rotation d'un corps beaucoup plus grand provenait principalement de ce qu'en vertu de la liquidité ou de la mollesse d'une portion de ces corps, ils s'unissaient un instant et par conséquent se communiquaient ainsi mutuellement toute leur impulsion. Or il doit arriver des cas où des portions liquides de la masse choquante, si ce n'est cette masse entière, perdront un moment toute leur vitesse, s'uniront complètement au mouvement de l'astre choqué et seront entraînées un instant dans sa rotation définitive. Mais bientôt la réaction des parties comprimées par la violence du choc rendront du ressort à cette matière dépourvue un instant de vitesse propre, et la lanceront de nouveau au dessus de la surface de l'astre auquel elle s'était unie. Or il est essentiel de remarquer que cette impulsion devant se combiner avec la force centrifuge qu'a acquise le mobile en devenant partie intégrante de la masse générale, la nouvelle trajectoire décrite par ce mobile devra donc être comprise sensiblement *dans le plan équatorial de rotation*, première condition en effet du mouvement des satellites.

Mais ce n'est pas le plus souvent en une seule masse que le corps mobile sera ainsi lancé de nouveau dans l'espace : la différence d'élasticité de ses diverses parties et surtout la différence de leur pesanteur spécifique leur communiquera des vitesses différentes, et de là la division en globules, circulant dans le même plan, et dont les plus légers seront les plus éloignés de l'astre central, parce que la pesanteur retardera moins rapidement leur vitesse d'impulsion première. Chacun de ces

globules sera d'ailleurs formé de molécules dont les vitesses sont similaires, et par conséquent *sans rotation propre*, seconde condition du mouvement des satellites; les molécules s'y arrangeront enfin de manière à ce que la portion la plus pesante de la masse reste dirigée vers la planète, ce qui complète les éléments de cette rotation fictive des satellites, qui leur fait toujours tourner la même face vers leur centre d'attraction.

Mais comment concevra-t-on maintenant que ces divers globules, qui doivent rester satellites de la planète d'après la faiblesse de leur vitesse et de leur masse, ne reviennent point passer à leur point de départ et transforment leur trajectoire en une ellipse très peu excentrique? La résistance de l'atmosphère, dans le cas d'une très forte augmentation de la vitesse de rotation du corps choqué, me paraît pouvoir répondre à cette difficulté.

La conséquence de cette accélération considérable est en effet la dispersion dans l'espace d'une portion de l'atmosphère de la planète, en vertu de l'augmentation de la force centrifuge et de sa prédominance sur la pesanteur aux limites de cette atmosphère ¹. Les satellites auront donc à traverser une grande épaisseur de matière diffuse qui retardant leur marche infléchira peu à peu leur trajectoire, jusqu'à ce que l'élément de cette courbe devienne sensiblement perpendiculaire à son rayon recteur. Dans cette position, et lorsqu'il aura attiré autour de lui comme atmosphère la plus grande partie de cette matière diffuse qui entravait sa marche, le satellite ne se trouvera-t-il pas dans les conditions absolues propres à lui faire parcourir une ellipse très arrondie? Une fois délivré en effet de cet obstacle, le satellite sera exactement dans la même situation que s'il recevait à une distance médiocre de la planète

¹ Ce principe de la diffusion de l'atmosphère des corps célestes par l'accroissement de la rotation revient souvent, comme l'on voit, et il est d'une grande fécondité; nous l'avons employé déjà pour expliquer les apparences fournies par les comètes, nous le retrouverons encore pour expliquer la diffusion de l'atmosphère du soleil jusqu'aux limites des orbites planétaires. Mais il est nécessaire pour que ce phénomène ait lieu, que la rotation amenée par le choc soit la plus rapide que l'astre ait encore éprouvée.

une vitesse initiale relativement peu considérable et très fortement inclinée sur le rayon recteur : or ce sont précisément les données propres à assurer à la trajectoire la forme presque circulaire.

Ainsi d'un cas particulier des chocs ressortent toutes les conditions de mouvement des systèmes de satellites, comprenant en premier lieu la formation du système planétaire lui-même. Ainsi l'on comprendra que les planètes puissent provenir d'une source commune et cependant étrangère au soleil ; que les plus denses soient les plus rapprochées de cet astre ; qu'elles décrivent dans le plan même de l'équateur solaire des ellipses très peu excentriques ; qu'enfin elles aient pu s'entourer d'une atmosphère oxygénée échappée au soleil même et qui aurait exercé sur elles l'action chimique que nous avons essayée d'analyser pour la terre. Toutes ces conclusions me paraissent d'une rigueur suffisante pour justifier le principe des chocs dans sa généralité astronomique. Les savants en jugeront.

Ne serait-il pas maintenant bien hardi de chercher à remonter plus loin encore ? Ces comètes, instruments des chocs pour les astres de notre système planétaire, d'où viennent-elles ? Et ces autres comètes d'une grandeur sans doute immense, instruments de la rotation solaire, quelle peut être leur origine ? Nous répondrons par une conjecture : rêve sans doute, pure excursion de l'esprit dans le champ du possible ; mais pourquoi ces sortes de divagations lui seraient-elles défendues ?

On sait que depuis la découverte des quatre petites planètes télescopiques Cérés, Pallas, Junon et Vesta, l'opinion générale des astronomes s'accorde à les regarder comme les débris d'une planète plus considérable qui divisait le grand espace entre Mars et Jupiter et qui aurait été brisée. Les causes toutefois de ce brisement ne réunissent pas un assentiment aussi général, les uns l'attribuant à une explosion volcanique, les autres à un choc. Pour moi, l'idée d'une explosion m'a toujours paru être d'une exorbitante invraisemblance. Indépendamment de ce que nous avons dit de la nullité d'action du phénomène volcanique sur la masse centrale du globe terrestre, indépendamment même de toute condition de possibilité physique, je ne me résoudrai

jamais à penser que la grande force centrale de gravitation, principe de tout équilibre, soit incessamment combattue à l'intérieur des planètes par une autre force capable de la détruire; et ces deux actions contraires, qui s'exerceraient simultanément à l'intérieur des masses, ne me semblent pas compatibles avec les considérations d'une saine philosophie. Les chocs, force accidentelle, ne portent pas ce caractère d'in vraisemblance systématique; un semblable brisement est tout-à-fait d'ailleurs dans leur ordre de possibilité, et par le retour multiplié d'un pareil phénomène soumis à toutes les chances du hasard, ce cas singulier devait sans doute se rencontrer. Mais si en effet une planète de notre système a été brisée par un choc, qu'a-t-il dû arriver d'un semblable événement ?

Une circonstance à laquelle on ne me semble pas avoir attaché encore tout l'intérêt qu'elle mérite est l'extrême petitesse du volume réuni des quatre planètes qui nous restent comme débris de cette destruction : elles ne forment pas dans leur ensemble plus du 27^{me} du volume de la terre. Or on ne peut guère supposer que le corps primitif ait été aussi peu considérable : qu'en sont devenus les fragments ?

J'ai pensé que les fragments de cet astre dispersés par le choc et s'échappant en diverses directions, avaient pu entrer eux-mêmes dans le nombre des comètes, et fournir un surcroît à la quantité indéfinie de ces corps errants ¹. Mais ce ne peut être la seule origine des comètes; quant à celles surtout dont les orbes sont extrêmement allongées, pourquoi ne proviendraient-elles pas du brisement d'autres planètes placées hors des limites que nous connaissons ? Car il n'y a point de raison évidente pour qu'Uranus soit le dernier astre de notre système ou qu'il l'ait toujours été.

Or maintenant qui empêcherait de croire que les instru-

¹ Je crois du reste le brisement de cet astre relativement récent, et il y a quelque raison pour moi de penser que les rotations et les satellites de Jupiter et de Saturne pourraient être dus au choc des plus gros de ces fragments circulant dans des plans peu éloignés de l'écliptique. Les satellites de ces astres n'ayant été dérangés encore par aucun choc ne doivent pas en effet être d'une bien antique origine, et l'on pourrait en dire autant du nôtre.

ments de ces destructions, comme aussi de la rotation solaire et de la production des planètes elles-mêmes, sont des comètes d'un autre ordre, beaucoup plus considérables, mais apparaissant à des intervalles infiniment plus distants, et qui circuleraient dans le système dont le soleil fait partie, comme les comètes ordinaires circulent à travers le nôtre ? Qui empêcherait de penser aussi que ces globes errants d'un ordre plus élevé pourraient n'être autre chose que les débris d'un ou plusieurs astres de ce même vaste système où notre soleil exécute son mouvement de translation aujourd'hui bien reconnu ?

J'ai été frappé d'un mot de William Herschel, cité par M. Arago dans sa belle notice sur les travaux de cet illustre astronome. « Les espaces, dit ce savant, qui précèdent ou qui suivent les nébuleuses simples, et à plus forte raison les nébuleuses groupées, renferment généralement peu d'étoiles. Herschel trouvait cette règle constante. Aussi toutes les fois que pendant un peu de tems aucune étoile n'était venue, par le mouvement du ciel, se ranger dans le champ de son télescope immobile, il avait l'habitude de dire au secrétaire qui l'assistait : préparez-vous à écrire, des nébuleuses vont arriver. »

Cette observation renferme implicitement à nos yeux la plus vaste des conjectures : c'est qu'en considérant l'ensemble des espaces stellaires, tout groupement d'un système de corps autour d'un astre central représenterait la destruction d'un autre astre similaire plus ou moins voisin ; en un mot l'on en viendrait à concevoir que les chocs, par la subdivision progressive des corps, aient pu être le moyen d'action matérielle que la main de Dieu aurait employé, à l'aide de l'immensité des tems, pour la multiplication des mondes et pour cette prodigieuse complication que nous présentent les mouvements célestes.

S'il en était ainsi, et si enfin le principe des chocs pouvait être considéré comme le mode général de division de la matière disséminée en globules dans l'espace, ce serait pour nous la plus effrayante évocation de l'antiquité des âges, ce serait à notre faible point de vue une véritable gradation entre le tems et l'infini.

FIN.

Additions au Chapitre IX.

Notre chapitre relatif à la géologie chimique, trop rapidement écrit parce qu'il ne formait que l'accessoire d'une matière plus importante, renferme quelques passages insuffisants et quelques erreurs d'inadvertance, sur lesquels nous croyons devoir revenir après l'impression de l'ouvrage. Cela est nécessaire pour amener à la précision désirable notre théorie de la formation générale des matériaux oxidés de la surface du globe.

1° En indiquant la composition de la matière originaire des granits, nous n'avons parlé que de silicate d'alumine entraînant de la potasse et de fluosilicate de cette base : cet énoncé n'est évidemment pas assez explicite et quoiqu'il soit facile aux chimistes de le compléter par la pensée, nous devons faire nous-mêmes cette rectification, ce développement. Le silicate d'alumine de la voie humide n'est qu'un silicate simple ou double, qui ne saurait suffire non seulement à fournir la quantité de silice libre contenue dans le granit, mais encore à celle du feldspath, qui est un trisilicate. Il faut donc nécessairement admettre que le dépôt originaire renfermait de la silice pure ou entraînant aussi un peu de potasse, de magnésie ou de fer, par suite de cette sorte de combinaison mécanique qui a toujours lieu lorsqu'elle se précipite dans une eau alcaline ou ferrugineuse. On doit même supposer cette substance à l'état gélatineux, état qu'elle prend en général lorsqu'elle est formée dans l'eau au moyen d'un composé du silicium, et cela aiderait à concevoir ce *moulage* du quartz sur les matières fusibles, qui forme un caractère si remarquable du granit. Ajoutons que l'élasticité de la vapeur d'eau ainsi incorporée au dépôt doit aider beaucoup au soulèvement du granit et en être peut-être l'agent principal. Quant à l'état de combinaison originaire de cette grande quantité de silicium, qui forme plus des deux tiers des roches granitiques, c'est ce que nous serons amenés à rechercher un peu plus loin.

Le *fluoborate* de potasse étant insoluble comme le fluosilicate, son mélange au dépôt primitif est de plus l'origine évidente des tourmalines, qui entrent dans la composition de certains granits, et qui, comme l'on sait, renferment du bore en grande proportion.

Sans doute la composition du premier dépôt, ainsi complétée, n'explique point par elle seule toutes les apparences minéralogiques du granit : je pense qu'elle explique suffisamment l'enchevêtrement du quartz avec les matières fusibles ; mais sa translucidité, mais la compacité de la masse, mais l'apparence cristalline du feldspath et du mica, sont des particularités qui ne peuvent guère dépendre que de circonstances *physiques*, parmi lesquelles la pression, et la lenteur des actions moléculaires, résultant de la grandeur des masses et de la marche presque insensible du calorique qui y pénètre ou qui les abandonne. Ces circonstances ne sont guère de nature à être reproduites par l'expérience, et à cet égard celle-ci ne peut malheureusement apprendre que peu de chose de plus que la conjecture. Au reste les mêmes difficultés existent dans toute théorie de la formation ignée du granit et ne sont point particulières à la nôtre.

2^o Une erreur de chiffres, à la page 243, relative à la quantité totale du carbone des calcaires, nous a empêchés de remarquer l'harmonie qui existe entre cette quantité et celle de l'azote atmosphérique. En supposant que les 8000 k. d'azote par mètre carré proviennent entièrement de cyanures, ils exigeraient environ 7000 k. de carbone, quantité qui correspondrait à 60.000 k. ou 25 m. environ de calcaire par mètre carré de surface sur tout le globe. Or nous avons évalué cette hauteur à 30 m., en annonçant même une exagération; la concordance est donc frappante. D'après cela il n'y a plus lieu d'avoir recours aux composés ammoniacaux pour expliquer l'azote atmosphérique, il peut saturer exactement le carbone. Nous allons au reste préciser encore davantage ce résultat.

3^o Pour achever en effet de juger approximativement dans quel état de combinaison primitive pouvaient se trouver les divers corps maintenant oxydés, il est nécessaire de rechercher les proportions absolues de chacun d'eux. Nous avons pour cela la plupart des éléments, et il ne nous manque à vrai dire que la quantité ou l'épaisseur du granit primitivement déposé dans les eaux. Cette épaisseur n'est pas très considérable, puisque les vallées volcaniques pénètrent au dessous de ce dépôt: plusieurs considérations, et en particulier la proportion du sodium dans les eaux de la mer qui doit être comparable à celle de la potasse dans les granits, me font penser que cette épaisseur n'a pu guère dépasser 100 m. D'autre part on admet généralement que la profondeur moyenne des mers est de 1000 m; nous la supposons telle à l'origine sur toute la terre, cela donne 25.000 k. de chlorure de sodium, 3500 k. de chlorure de magnésium, etc, par mètre carré de surface. Soient enfin, comme nous venons de l'indiquer, 25 m. de calcaire, nous posséderons ainsi à peu près tous les éléments du calcul. Admettant que le granit renferme $\frac{2}{5}$ de quartz pur, $\frac{2}{5}$ de feldspath et $\frac{1}{5}$ de mica, et observant néanmoins que dans les gneiss et les micaschistes la proportion de mica est bien plus considérable, que de plus le fluor entre dans tous les micas et quelquefois jusqu'à la proportion de $\frac{1}{20}$; tenant compte aussi de la petite quantité de soude mêlée dans les granits, du soufre des sulfates etc.; les diverses masses que nous venons d'évaluer donneront pour proportions des éléments par mètre carré de surface terrestre:

<i>Métaux.</i>	<i>Gazolytes.</i>
Sodium. 13.000 kil.	Hydrogène. 100.000 kil.
Potassium. 16.000	Chlore. 18.000
Calcium 20.000	Fluor. 4000
Magnesium. 2000	Soufre. 4000
Fer, etc. 2000	Phosph. arsen. bore 1000
Aluminium. 20.000	Azote. 8000
Silicium. 80.000	Carbone combiné. 7000

En combinant le fluor, le chlore, le soufre et le cyanogène avec les métaux suivant leur ordre général d'affinités, on voit que de toute manière il reste environ 30.000 k. des derniers métaux, y compris l'aluminium, puis tout le silicium et l'hydrogène, dont l'état de combinaison serait incertain. Il est donc nécessaire d'imaginer au moins une hypothèse qui puisse satisfaire pour ces corps aux lois de combinaison connues. Ce qui nous paraît le plus probable c'est qu'il pouvait exister des *siliciures* métalliques d'une part, et de l'autre de l'*hydrure de silicium*; enfin il resterait de l'hydrogène libre. Si en effet la quantité des métaux était plus que suffisante pour la saturation du chlore, du fluor et d'autres gazolytes dont l'affinité est grande pour l'hydrogène, ce corps, qui existait en grand excès à la surface du globe à cause de sa légèreté, ne pouvait donc se combiner qu'avec le silicium, très abondant aussi par la même raison. L'existence de l'*hydrure de silicium*, dont nous n'avions pas parlé dans le texte de cet ouvrage, pourrait d'ailleurs avoir une conséquence importante dans la théorie des eaux minérales et dans celle des volcans : ce corps étant très combustible et fournissant de l'eau, il serait possible que l'eau de certaines sources minérales, ainsi que la vapeur d'eau des volcans, ne provint en partie que de l'oxidation de la matière intérieure elle-même; ces phénomènes pourraient donc être dûs dans de certains cas à l'action unique de l'air fortement oxygéné, dégagé des sources ou de l'eau marine par la température souterraine, lorsqu'elles pénètrent à l'intérieur du sol. Ce résultat est digne d'attention.

Il est plus que probable enfin que la proportion de silicium combiné aux métaux se diminue encore par une autre considération, par celle de l'existence d'une certaine quantité de cyanogène dont les éléments auraient disparu, par suite des diverses révolutions du globe, avec une portion de notre atmosphère. Si, comme nos théories le rendent pour nous extrêmement probable, le globe a été primitivement et à l'époque des faits chimiques d'origine, dans l'état actuel des satellites planétaires, sa rotation devait être alors extrêmement lente : ses accroissements successifs de vitesse ont donc dû, par l'augmentation de la force centrifuge, restreindre les limites de l'atmosphère terrestre et par conséquent en disperser une portion dans l'espace. Cette portion contenant à la fois l'azote et l'acide carbonique qui provenaient de l'altération définitive du cyanogène, nous n'avons plus à la surface du globe aucun indice certain de sa quantité; mais la grande différence de la vitesse de rotation actuelle à cette rotation primitive nous atteste que l'étendue de cette première atmosphère a pu être très considérable. Elle devait être mêlée en outre d'une quantité d'acide carbonique plus que proportionnelle à son étendue, ce qui s'accorde bien d'ailleurs avec les faits, car la végétation des premières époques, actuellement enfouie dans le sol, témoigne d'une grande prédominance de l'acide carbonique dans l'air.

4° Enfin c'est par inadvertance que dans la théorie du remplissage des filons

métalliques nous avons fait abstraction de la quantité de fer contenue dans les granits, puisque les micas noirs en renferment une certaine proportion. Cette quantité de fer doit jouer un certain rôle dans le remplissage des filons ou dans la pénétration des terrains par les pyrites au contact du granit : le fluorure de fer est en effet dégagé de la masse granitique avec ceux de silicium et de potassium, et cela explique pourquoi au contact des terrains ou au voisinage des filons le granit ne renferme généralement que du mica blanchâtre, tandis qu'à quelque distance, dans la masse, le mica est noir.

Nous n'avons voulu de même indiquer que la rareté relative et non l'absence complète de la magnésie et des autres oxides métalliques dans le granit.

Remarque relative au Chapitre XII.

J'ai parlé, à la pag. 391, de la dispersion de l'atmosphère des astres par la rotation, et de l'obstacle utile que cette atmosphère avait dû opposer à la course des satellites, pour les contraindre à décrire des ellipses presque circulaires. Ce passage renferme une ambiguïté qu'il est essentiel de détruire. Je n'ai point voulu dire que la vitesse de rotation se communiquait instantanément à l'atmosphère de la planète choquée, cette communication ne peut avoir lieu qu'à la longue par les frottements; mais ce que j'ai voulu indiquer, c'est que l'apparition des satellites coïncidant avec les rotations énergiques, l'atmosphère devait être auparavant plus développée, et n'avait pas eu le tems de se disperser encore quand l'ensemble des satellites s'est détaché de la planète. Il devient même assez vraisemblable à mes yeux que la formation des satellites est en général réservée à la première grande rotation de l'astre, alors que son atmosphère avait tout son développement primitif : ainsi les grandes planètes Jupiter et Saturne ne pouvant pas être notablement dérangées par les chocs ordinaires des comètes, dont les masses sont trop petites, leur rotation devait être encore très faible lorsque cette énorme vitesse qu'elles possèdent actuellement leur a été communiquée, sans doute par un événement tout à fait extraordinaire dans notre système planétaire, et tout à fait en dehors des événements qui y sont habituels.

TABLE DES MATIÈRES.

	pages.
INTRODUCTION.	1
CHAPITRE Ier. DES TERRAINS ET DES TEMS GÉOLOGIQUES.	15
Des terrains stratifiés en général et du principe de leur division en époques. 15. — Dépôts des eaux nivelées ou calcaires, leur origine ; aperçu qu'ils fournissent sur les durées géologiques. 16. — Concentration des calcaires autour des continents et ses conséquences. 26. — Dépôts des eaux courantes ; le principe de l'alternance des couches est dans le déplacement du lit des fleuves ; évaluation des durées. 30. — Sur le creusement des vallées. 37. — Coup-d'œil sur la succession des terrains ou formations. 40. — De l'origine des houilles et de la durée de leur entassement. 44. — Du sel gemme et du gypse. 50. — Du déplacement des mers. 52.	
CHAPITRE II. DES MONTAGNES, DE LEURS THÉORIES ET DES CONDITIONS DYNAMIQUES DE LEUR SOULÈVEMENT.	55
Des hypothèses sur la formation des montagnes. Théorie des affaissements. 60. — Théorie des soulèvements ; ses modifications successives. 62. — Les éruptions des roches ignées ne sont pas la vraie cause des soulèvements linéaires. 66. — Ils sont dus à des refoulements horizontaux. 69. — Lois du parallélisme des ridements contemporains, et de l'extension des montagnes sur des arcs de grands cercles. 78. — Théorie des contractions dues au refroidissement du globe, sa discussion. 84. — Résumé des lois de soulèvement. 93.	
CHAPITRE III. DES CLIMATS AUX ANCIENS AGES.	94
Le décroissement de la chaleur propre du globe ne saurait expliquer les mutations de climat aux époques géologiques. 96.	
CHAPITRE IV. DES BLOCS ERRATIQUES ET DE L'ÉPOQUE DES GRANDES GLACES EUROPÉENNES.	104
De la théorie des glaciers appliquée aux blocs erratiques et aux roches sillonées de la Scandinavie et des Alpes. 107. —	

TABLE DES MATIÈRES.

	pages.
Le dépôt de ces blocs représente une époque géologique.	115.
— Distribution géographique des climats à cette époque.	120.
— Hypothèse d'un changement de pôle ; sa place. 124 — Conjecture sur le même fait aux autres périodes.	126.
CHAPITRE V. DU PHÉNOMÈNE DES FAILLES, DE SES LOIS ET DE LEUR CONSÉQUENCE RELATIVEMENT A LA ROTATION DU GLOBE.	127
Universalité du phénomène ; alignement, parallélisme.	127.
— Il appartient comme les montagnes à des modifications générales du globe.	129. — Caractères particuliers des failles : changement de niveau, inclinaison, règle du glissement.
— Leurs groupements.	133. — Pression normale à leur plan ; expansion des filons.
— Résumé, trois genres de forces.	136. — Examen des théories. Ni un effondrement ni un soulèvement local ne peuvent expliquer la disposition générale des failles.
— Un parallélisme absolu dans l'inclinaison des failles principales conduit à l'idée des changements dans la rotation du globe.	144.
CHAPITRE VI. DU CHOC DE LA TERRE PAR UNE COMÈTE ET DES MODIFICATIONS QUI EN RÉSULTERAIENT DANS LA FORME DE SON ENVELOPPE SOLIDE EXTÉRIEURE.	145
Principe général de ces modifications régulières, la fluidité intérieure.	146. — Du choc d'une comète relativement à son énergie et ses effets immédiats sur la rotation.
— Dépendance du revêtement solide, ses déformations.	155. — Production des grandes fractures parallèles au mouvement de la terre, première origine des failles.
— Expansion transversale.	158. — Formation des chaînes de montagnes.
— Leur parallélisme, leur concentration à l'équateur.	164. — Règles de la disposition des montagnes sur cet équateur selon l'angle et selon les variations de la vitesse.
— Théorie des failles.	168. — Formation des vallées.
— Déplacement des eaux de la mer.	178 — Réflexion sur le déluge.
—	183.
CHAPITRE VII. DES EFFETS CLIMATÉRIQUES QUI POURRAIENT RÉSULTER D'UN CHANGEMENT DANS LA ROTATION DE LA TERRE.	186
Effets résultant des variations dans la vitesse de rotation.	186.
Dans l'inclinaison de l'équateur sur l'écliptique.	188.

TABLE DES MATIÈRES.

	pages.
CHAPITRE VIII. DE LA PROBABILITÉ MATHÉMATIQUE QUE LA TERRE AIT ÉTÉ RENCONTRÉE PAR DES COMÈTES.	193
CHAPITRE IX. CONSIDÉRATIONS SUR L'HISTOIRE CHIMIQUE DE LA TERRE, OU SUR L'ÉTAT ORIGINAIRE ET LES TRANSFORMATIONS DES MATÉRIAUX QUI COMPOSENT SON REVÊTEMENT OBSERVABLE.	205
<p>Du granit, premier revêtement du globe, et du contraste de sa composition avec la salure des eaux de la mer. 205. — Coup-d'œil sur les phénomènes ignés. Idées de Hutton. 209. — Examen particulier du granit, anomalie de sa structure intime. 215. — Hypothèse de la formation de cette roche universelle par un dépôt chimique de la voie humide et de sa transformation par la chaleur. 220. — Composition de ce dépôt originaire, mise en rapport avec la salure des eaux. — Effets de sa transformation, métamorphisme des roches. Origine du gneiss. 226. — Théorie synthétique de la formation des premiers revêtements du globe et de l'origine de tous ses matériaux oxidés. 230. — Rôle de l'oxygène. 231. — Le globe formé de composés ignés définis, sans oxygène, et entouré d'une atmosphère oxygénée. 233. — Formation de l'eau et de l'azote atmosphérique. 236. — Séparation des produits solubles et insolubles; dépôt de la matière des granits, dissolution de l'élément des calcaires. Cyanures. 239. — Résumé de la composition originaire de la surface du globe. 245. — Résultats de l'action intermittente et locale de l'eau sur cette matière primitive : 1^o Eaux minérales. 247. — 2^o Théorie des volcans, 252. — Du soulèvement des volcans, 262. — Causes du soulèvement du granit et du trachyte. 264. — Altération des terrains au contact du granit; roches ignées accidentelles, amphibolites, serpentine, porphyres, mélaphyres, etc.. 267. — Filons métallifères. 274. — Conclusion générale. 279.</p>	
CHAPITRE X. RECHERCHE ET ÉTABLISSEMENT CHRONOLOGIQUE DES ÉQUATEURS SUCCESSIFS DE LA TERRE.	280
<p>Principes généraux de cette recherche. 280. — I. Système de l'Himalaya oriental et du Brésil. II. Système de l'Ecosse et des Monts Dovre. (<i>Terrains de transition</i>), 286. — III. Système des Gates, du Bolourdagh et des Rocheuses, ou système méridien de l'Inde et du Mexique (<i>Terrain houiller.</i>) 294. — IV. Système des Andes du Pérou et de la côte orientale d'Asie.</p>	

TABLE DES MATIÈRES.

	pages.
(<i>grès rouge</i>).	300.
— V. Système du Kiol ou de l'Europe et de l'Afrique occidentales (<i>grès bigarré</i>).	307.
— VI. Système des Monts Lupata et de l'Oural méridional (<i>Terrain jurassique</i>),	316.
— VII. Système du Caucase, des Alpes orientales et de la Colombie (<i>Terrain crétacé inférieur</i>).	321.
— VIII. Système de la Guinée et du Canada (<i>Époque de la craie</i>).	328.
— IX. Système des Andes du Chili (<i>Terrain tertiaire inférieur</i>).	331.
— X. Système des Pyrénées, du Nord-est de l'Afrique et des Alleghanys (<i>Terrain tertiaire moyen</i>).	338.
— XI. Système de l'Altaï et de la Terre de Feu (<i>Tertiaire supérieur</i>).	343.
— XII. Système du Guatemala et du cap de Bonne-Espérance (<i>Epoque glaciale d'Europe, blocs erratiques</i>).	348.
— XIII. Système de l'Atlas et de l'Himalaya occidental (<i>Diluvium, terrain quaternaire</i>).	351.
— XIV. Système actuel.	360.

CHAPITRE XI. RELATIONS MUTUELLES ET VÉRIFICATION

CHRONOLOGIQUE DES ÉQUATEURS. VARIATIONS DANS LA VITESSE DE ROTATION DU GLOBE. 365

CHAPITRE XII. CONSIDÉRATIONS SUR L'EXTENSION DU PRINCIPE DES CHOCS EN ASTRONOMIE. 378

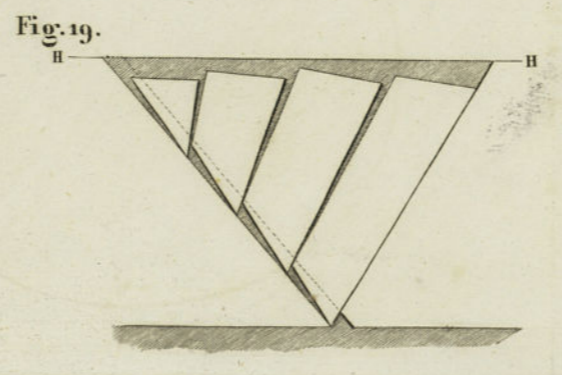
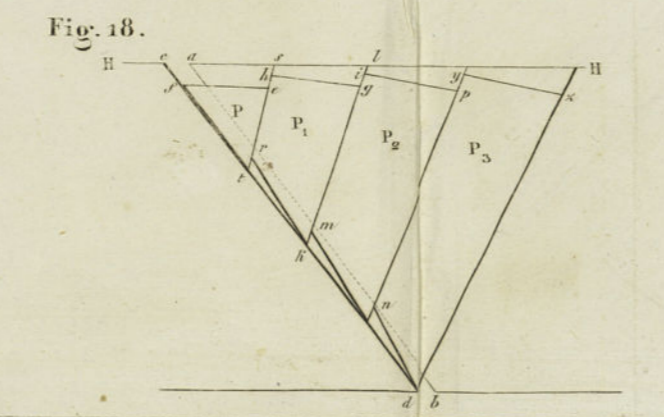
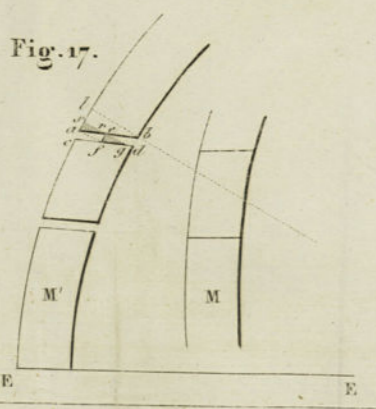
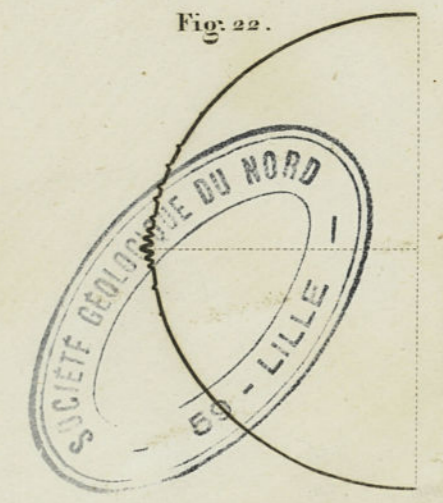
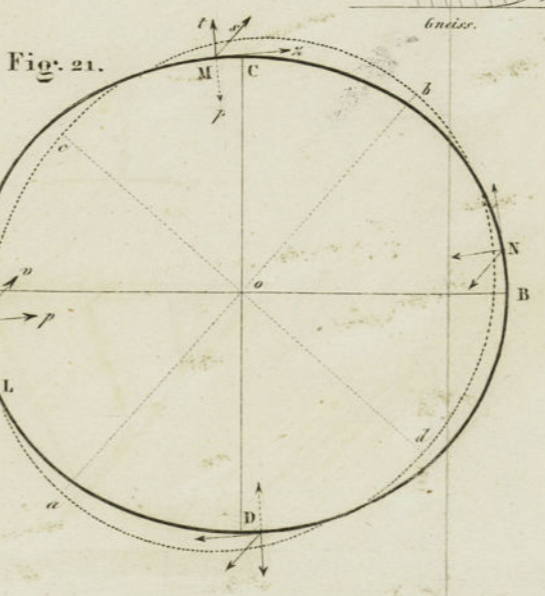
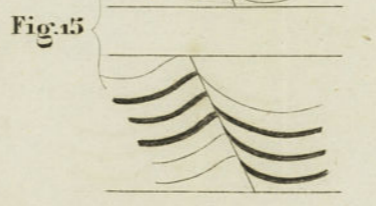
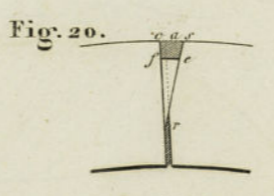
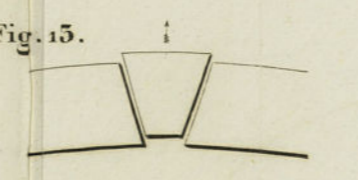
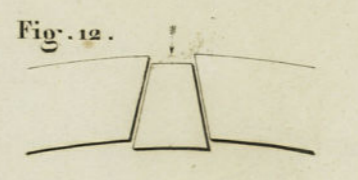
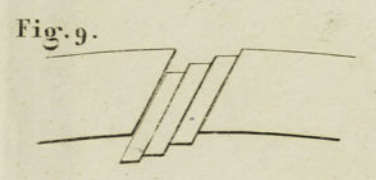
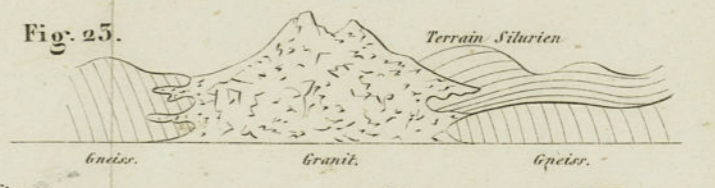
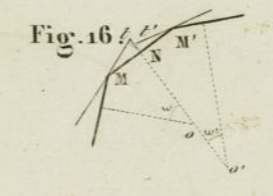
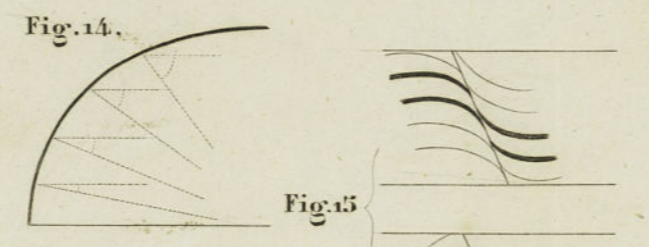
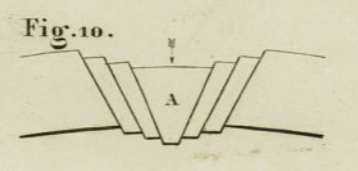
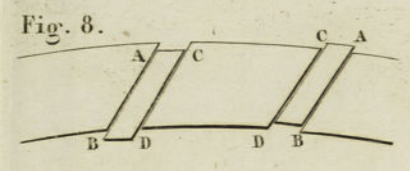
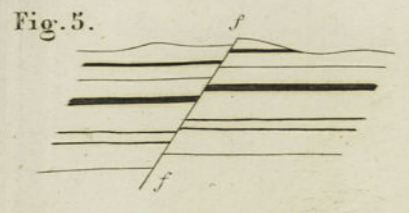
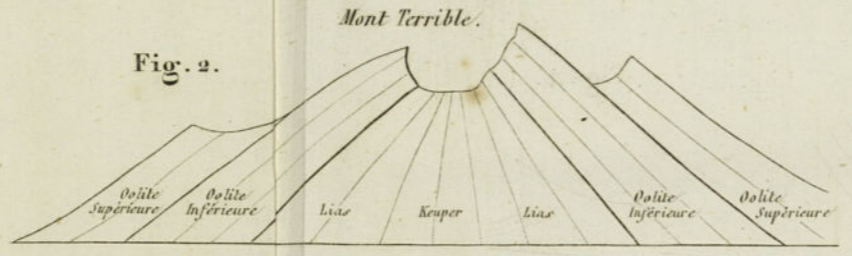
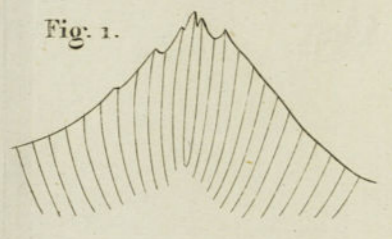
Discordance entre les rotations et les révolutions des planètes. 379. — Caractère particulier qui distingue la rotation des satellites; c'est là le mode originaire. 380. — Application de l'hypothèse des chocs aux phénomènes optiques des comètes et à l'anneau de Saturne. 382. — Systèmes de Buffon et de Laplace sur la formation des planètes et de leurs satellites. 386. — Nouvelle théorie de la production de ces corps et de leurs mouvements par les chocs. 389. — Conjecture sur l'origine des comètes et sur l'extension la plus générale du principe des chocs. 392.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

Toulouse. — Imprimerie de V^o DIEULAFOY, rue des Chapeliers, 13.

ERRATA.

- Page 22 ligne 20 : peut-être, *lisez* peut être.
- 45 — 34 : elle ne paraît pas, *lisez* non plus nullement.
- 46 — 28 : exposé, *lisez* exposée.
id. 30 : au-dessous, *lisez* au-dessus.
- 51 — 33 : considéré, *lisez* considérée.
- 63 — 18 : formes, *lisez* forces.
- 71 — 22 : direction, *lisez* directions.
- 87 — 27 : températures, *lisez* température.
- 99 — 35 : au-dessus, *lisez* au-dessous de 1200 p.
- 103 — 3 : qu'elles embrassent, *lisez* qu'elle embrasse.
- 105 — 5 : colossalles, *lisez* colossales.
id. — *note* : il y a de blocs, *lisez* il y a des blocs.
- 112 — 23 : aucun, *lisez* aucune.
- 124 — *note* 2 : sans lier cette considération de l'hypothèse, *lisez* à l'hypothèse.
- 133 — 15 : fig. 13 et 14, *lisez* 6 et 7.
- 200 — 27 : trace, *lisez* tracé.
- 207 — 1 : de deux, *lisez* des deux.
- 209 — 8 : de l'action volcanique des eaux, *lisez* volcanique des eaux minérales.
- 222 — 7 : matière de mélange. *lisez* du mélange.
- 224 — la silicate, *lisez* le silicate.
- 231 — 11 : de principe, *lisez* de ce principe.
- 238 — 14 : enveloppe actuel, *lisez* enveloppe actuelle.
- 285 — 30 : 45°, *lisez* 90°.
- 388 — 8 : forment, *lisez* forme.
- 392 — 2 : recteur, *lisez* vecteur.

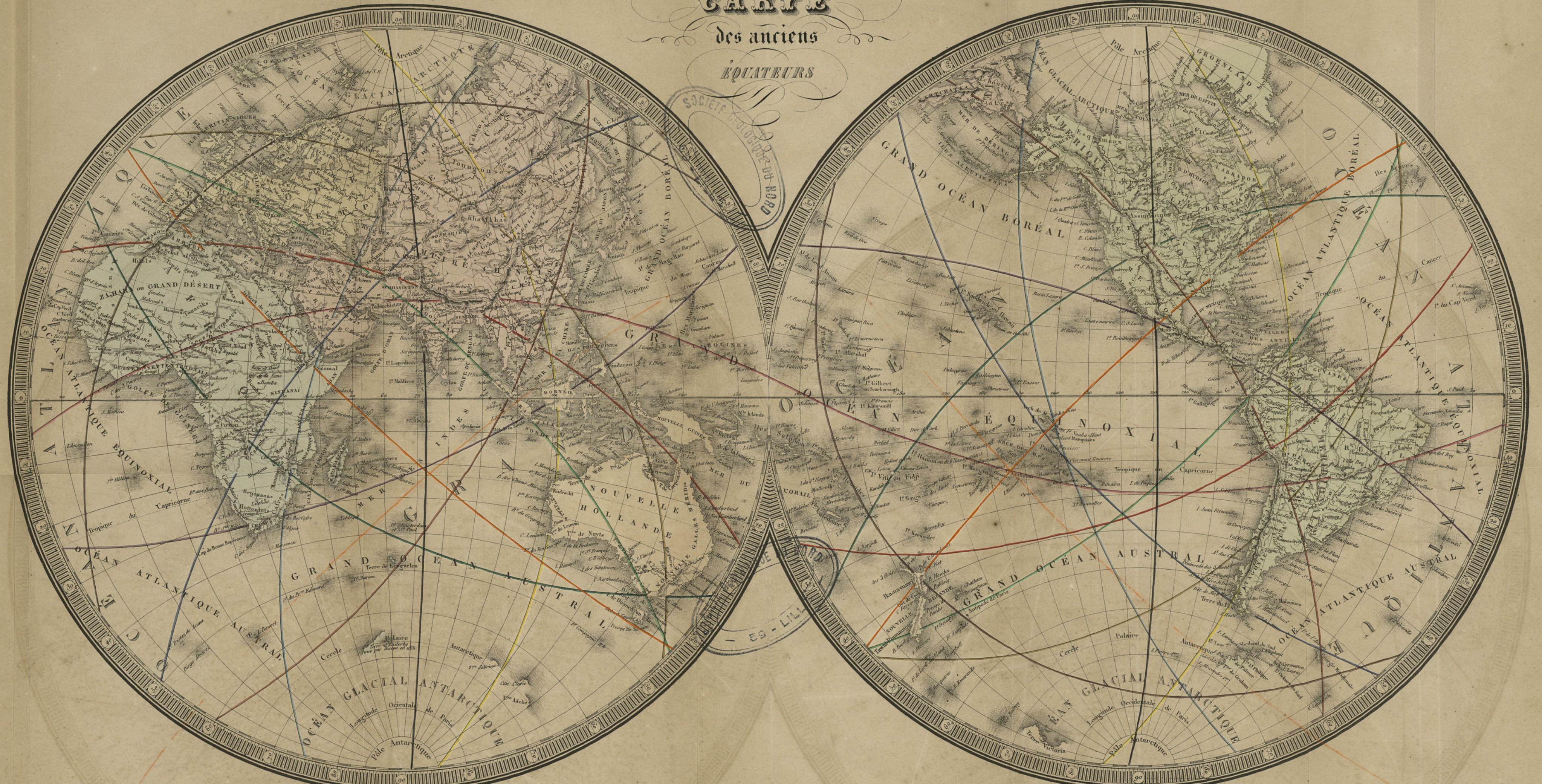


CARTE

des anciens

ÉQUATEURS

SOCIÉTÉ GÉOGRAPHIQUE DE NORD



Dressée par J. Andrieux-Goujon.

Imp. de Kaepelin, Paris 15 Quai Voltaire.