

27.23

(50-51) H.F.u.f. 167 (1,21).

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS,

POUR OBTENIR LE GRADE

DE DOCTEUR ÈS - SCIENCES :

PAR AUGUSTE DAUBRÉE,

Aspirant-Ingénieur des Mines.



PARIS,

IMPRIMERIE ET FONDERIE DE FAIN,

IMPRIMEUR DE L'UNIVERSITÉ ROYALE DE FRANCE,

RUE RACINE, 4, PLACE DE L'ODÉON.

1838.

D. 1275

H. F. n. 7. 107 (15.1)

A CADÉMIE DE PARIS.

FACULTÉ DES SCIENCES.

MM. Le baron THENARD, *doyen*,

LACROIX,

Le baron POISSON,

FRANCOEUR,

BIOT,

BEUDANT,

GEOFFROY-SAINT-HILAIRE,

MIRBEL,

PONCELET,

POUILLET,

DE BLAINVILLE,

.....

CONSTANT PREVOST,

DUMAS,

AUGUSTE-SAINT-HILAIRE,

LIBRI,

Professeurs.

Professeurs adjoints.

PARIS

IMPRIMERIE ET FONDRIE DE FAIN

IMPRIMERIE DE L'UNIVERSITÉ ROYALE DE FRANCE
RUE RACINE, 4, PLACE DE L'ODÉON.

1828.

2.1577

THÈSE

SUR

LES TEMPÉRATURES DU GLOBE TERRESTRE,

ET

SUR LES PRINCIPAUX PHÉNOMÈNES GÉOLOGIQUES

qui paraissent être en rapport avec la chaleur propre de la terre.

LES observations thermométriques qui sont faites, soit à la surface du globe terrestre, soit à une certaine profondeur, ne donnent qu'une résultante de causes nombreuses et souvent fort compliquées qui se superposent, pour produire l'état actuel des températures. Mais, les causes fondamentales paraissant reconnues, on a pu, au moyen de l'analyse mathématique et de diverses expériences, rechercher quelle est l'action propre à chacun de ces principaux éléments, et en apprécier jusqu'à un certain point les effets, autant que le permet le nombre d'observations encore restreint que l'on possède sur ce sujet. C'est l'exposition de ces phénomènes généraux, et de leurs conséquences géologiques les plus importantes, qui fait le principal sujet de cette thèse.

Les mouvements de l'air et des eaux, l'étendue des mers, l'élévation et la forme du sol, les effets de l'industrie humaine, et une foule d'autres causes contribuent à modifier les résultats qui se déduisent des considérations théoriques; mais les caractères des phénomènes dus aux causes générales subsistent toujours, et il est intéressant de les étudier; seulement les effets thermométriques observés à la superficie, sont différents de ceux qui auraient lieu sans l'influence des causes accessoires.

D'ailleurs, la question de la chaleur propre du globe, rattache immédiatement ce sujet aux principes fondamentaux de la géologie; quoique les observations qui s'y rapportent aient été faites sur un espace trop borné pour que l'on puisse en déduire quelque chose de certain, il importe néanmoins de discuter les faits que nous possédons, et cela me conduira naturellement à effleurer quelques-unes des vues profondes de M. Elie de Beaumont, dont j'ai eu l'avantage de suivre le cours à l'École des Mines. J'exposerai succinctement comment les grands phénomènes qui se sont manifestés à la surface de la terre depuis les périodes les plus anciennes, peuvent être regardés comme des effets dus à des causes physiques et mécaniques, si on part de l'état de fluidité du globe.

Ainsi, l'état de tiraillement de la croûte terrestre qui a donné lieu au surgissement de grandes chaînes de montagnes, et à d'autres phénomènes de dislocation très-violents; ce même élément, qui aujourd'hui encore est la cause de la mobilité tantôt lente, tantôt saccadée de certains continents, s'explique d'une manière simple et satisfaisante comme étant un résultat de la chaleur primitive. En outre, les variations remarquables que les masses d'éruption ont subies depuis les premières périodes jusqu'à nos jours, les modifications postérieures qui sont principalement survenues dans les formations sédimentaires les plus anciennes; enfin l'abaissement progressif des climats qui nous est attesté par toute la nature organique de ces époques, sont autant de séries de faits importants qui se rattachent plus ou moins immédiatement à la chaleur terrestre.

Le globe ne paraissant pas renfermer en lui-même de source calorifique considérable, la chaleur qu'il possède aujourd'hui dérive principalement de trois sources que nous examinerons successivement :

1° Il participe à la température des régions célestes que parcourt notre système planétaire ;

2° La terre est en outre échauffée par les rayons solaires dont l'inégale distribution produit la diversité des climats ;

3° Enfin , cette planète conserve dans l'intérieur de sa masse une quantité considérable de chaleur qui , si elle ne provient pas de son état originel , y a au moins été introduit à une époque extrêmement éloignée de nous. Nous considérerons surtout leurs effets produits par ces éléments sur la partie solide du globe , et nous nous arrêterons plus spécialement à cette dernière partie à cause de sa connexion avec les faits géologiques.

I. *De la température des espaces planétaires.*

La température propre à l'espace où se meut notre système planétaire , serait celle que marquerait un thermomètre placé dans un point de la région céleste que nous occupons , si l'on pouvait concevoir que le soleil et toutes les planètes qui l'accompagnent cessassent d'exister.

Fourier s'est le premier occupé de rechercher quelle devait être actuellement cette température , pour que les effets thermométriques fussent tels que nous les observons.

Opinion de Fourier
sur la température de
l'espace.

Il a d'abord remarqué , que , si l'espace dans lequel est placé le système solaire était dénué de chaleur , les régions polaires subiraient un froid immense , et , le décroissement des températures depuis l'équateur jusqu'aux pôles , malgré l'influence modératrice due à la mobilité de l'atmosphère et des eaux , serait incomparablement plus rapide et plus étendu que le décroissement observé. Dans la même hypothèse , tous les effets de la chaleur que nous observons à la surface résulteraient de la présence du soleil ; car la théorie et les observations nous apprennent que la chaleur propre de la terre n'augmente pas sensiblement la température superficielle. Les moindres variations dans la position du soleil , par rapport à la terre , occasionneraient donc des changements très-considérables dans les températures ; et la différence entre la température des jours et celle des nuits serait beaucoup plus tranchée que nous la voyons.

C'est de ces diverses remarques , et principalement de l'examen

mathématique de la question, que Fourier conclut, qu'il existe une cause physique toujours présente qui modère les températures à la surface de notre globe; et les phénomènes actuels lui firent assigner à cette température de l'espace que nous parcourons, une température d'environ 50 degrés centigrades au-dessous de zéro. Quant à l'origine de cette chaleur, elle est évidemment produite par le rayonnement de la multitude des étoiles, dont la chaleur peut arriver jusqu'à nous. Cette température de l'espace n'est sans doute pas la même dans les différentes régions de l'univers; mais nous reviendrons plus loin sur cette considération, en parlant de la température que la terre possède dans son intérieur.

Influence de l'atmosphère sur la chaleur du globe et sur la température de l'espace, d'après les recherches de M. Pouillet.

M. Pouillet a récemment publié des recherches sur ce sujet dans un travail fort étendu; je vais en donner brièvement les principaux résultats.

Ces résultats reposent sur un théorème qui établit, d'une manière générale, les conditions d'équilibre de température d'un globe, protégé par une enveloppe diathermane quelconque, et suspendu avec son enveloppe au milieu d'une enceinte sphérique. Démonstration de ce théorème.

Les relations générales auxquelles on arrive, dépendent essentiellement des pouvoirs absorbants que l'enveloppe diathermane exerce sur la chaleur du globe et sur celle de l'enceinte; et, en discutant ces valeurs, on met en évidence les effets remarquables produits par des enveloppes diathermanes, en raison de l'inégalité des actions absorbantes qu'elles peuvent exercer sur les différents rayons de chaleur qui les traversent.

Maintenant, il faut remarquer qu'il y a une distinction à faire dans les effets produits par la chaleur de l'espace. Cette chaleur doit être considérée par rapport à sa quantité et par rapport à sa nature.

Considérée par rapport à sa quantité, on la mesure comme toute autre chaleur par la quantité de glace qu'elle peut fondre, ou par

l'élévation de température qu'elle imprimerait à une masse d'eau donnée. Aussi dans le raisonnement, on substitue à l'ensemble des corps célestes, une enceinte fictive, ou une surface athermane à pouvoir émissif maximum, maintenue partout à une certaine température que des expériences permettent de déterminer approximativement.

Mais, au lieu d'être analogue par sa nature à des sources de température très-basse, telles que celles que nous savons produire artificiellement, la chaleur de l'espace doit être assimilée à la chaleur solaire, qui d'ailleurs, a sans doute le même mode d'origine : et notre atmosphère, qui peut exercer des absorptions inégales sur des sources de chaleur de natures différentes, doit se comporter avec la chaleur stellaire, comme avec les rayons émanant du soleil, c'est-à-dire qu'elle doit absorber les rayons émis par la terre, en moindre proportion que ceux qui lui arrivent de l'espace.

Par conséquent, en faisant abstraction de l'action du soleil et des effets de la chaleur intérieure du globe, M. Pouillet a déduit, d'après le théorème cité plus haut :

« 1° Que la température de la surface de la terre est considérablement plus élevée que celle de l'espace ;

» 2° Que la température moyenne de l'atmosphère est nécessairement inférieure à celle de l'espace, et à plus forte raison, à celle de la terre elle-même ;

» 3° Que le décroissement de la température de l'atmosphère n'est point un résultat de l'action du soleil ; il aurait lieu même si le soleil n'échauffait ni la terre, ni l'atmosphère, parce qu'il est une des conditions d'équilibre des substances diathermanes, et sa véritable cause est dans l'inégalité des actions absorbantes que l'atmosphère opère sur les rayons de chaleur venant de l'espace, et sur ceux qui sont émis tout autour du globe, par la surface du sol ou par celle des eaux. »

Ces déductions s'accordent avec la conséquence à laquelle M. Poisson est arrivé par des considérations mécaniques, savoir que la température des hautes régions de l'atmosphère devait être inférieure de beaucoup à la température de l'espace.

M. Pouillet a établi un théorème qui peut servir à déterminer des limites de la température de l'espace, quand on connaît un certain nombre de valeurs, de ce que ce physicien appelle la *température zénithale*; élément que l'on détermine à l'aide d'un actinomètre de l'invention de M. Pouillet. Mais comme la formule renferme la température moyenne de la colonne atmosphérique dont l'évaluation présente de l'incertitude, il semble préférable à M. Pouillet d'avoir recours à cet autre moyen.

Les phénomènes qui se manifestent dans les régions équatoriales, et qui s'y soutiennent d'une manière constante pendant toute l'année, conduisent à une équation dont il est inutile de répéter ici la démonstration. Cette relation se transforme définitivement en :

$$a^t = 1,008 - 0,748b,$$

t étant la température inconnue de l'espace, b le pouvoir absorbant que l'atmosphère exerce sur la chaleur terrestre.

Ainsi, on obtiendra une limite inférieure de t , en attribuant à b sa valeur maxima qui est 1; la température de l'espace qui correspond à cette hypothèse est -175° . Les expériences zénithales faisant voir que b est nécessairement plus grand que 0,8, leur limite supérieure de t correspondra à cette dernière valeur, il en résulte que la température de l'espace est moindre que $-1,5^{\circ}$.

Pour déterminer le nombre compris entre les limites, qui représente la vraie température de l'espace à l'époque actuelle, il faudrait sans doute des expériences très-multipliées, qui l'étendissent à toutes les latitudes et à toutes les hauteurs. M. Pouillet présume, d'après des expériences qu'il a faites, que la valeur -142° , qui correspond à $b = 0,9$, ne s'écarte pas beaucoup de la vérité; qu'ainsi, si le soleil ne faisait pas sentir son action sur notre globe, la température de la surface du sol serait uniforme, et égale à -89° .

Cette température de l'espace est beaucoup plus basse que les valeurs qu'on lui avait attribuées jusqu'à présent; on pouvait conjecturer qu'elle devait être de bien des degrés au-dessous de zéro, d'après

différentes observations de M. Pouillet, et d'après ce fait, qu'un thermomètre exposé sur le sol, pendant un temps serein et dans un lieu découvert, se refroidit, à peu près de la même quantité au-dessous de l'air ambiant, soit pendant l'été, soit pendant les mois les plus froids de l'année.

La quantité de chaleur que l'espace envoie dans le cours d'une année à la terre et à l'atmosphère, serait capable de fondre sur notre globe, une couche de glace de 26 mètres d'épaisseur.

II. *Des effets de la chaleur solaire sur la température terrestre.*

Passons maintenant à l'examen des effets produits par la chaleur à la partie superficielle du globe.

Dans les parties de la croûte terrestre les plus voisines de la surface, le thermomètre s'élève et s'abaisse pendant la durée de chaque jour. Ces variations, qui ne s'étendent guère au delà de un ou deux mètres de profondeur, sont dues comme on le voit facilement à l'action de la chaleur du soleil, combinée avec le rayonnement vers les espaces planétaires. Pendant six mois de l'année, de janvier en août, dans nos climats, la position du soleil est telle que l'influence calorifique l'emporte généralement chaque jour sur la perte par rayonnement, et la température de la surface chaque jour va en augmentant; puis il arrive une époque à partir de laquelle la surface rayonne chaque jour une plus grande quantité qu'elle n'en reçoit du soleil; elle va donc en se refroidissant, et cet effet inverse du premier, continue jusqu'en janvier suivant.

Des variations thermométriques à diverses profondeurs.

Si on descend un peu plus, à trois ou quatre mètres, par exemple, la température observée reste constante pendant la durée de chaque jour; mais elle change très-sensiblement pendant le courant de l'année. Les variations annuelles sont encore appréciables dans nos climats à plus de vingt mètres de profondeur; mais au delà de vingt-cinq mètres, le thermomètre conserve, pendant le cours de l'année, une température à

peu près constante (1); de sorte que l'on peut concevoir, au-dessous du sol, deux *couches limites*, l'une pour les variations diurnes, l'autre pour les variations annuelles. Les alternatives des saisons, sont entretenues par cette immense quantité de chaleur solaire, qui oscille constamment dans l'enveloppe terrestre, s'accumulant au-dessous de la surface durant six mois, et se reversant à l'extérieur pendant l'autre partie de l'année.

Le très-petit nombre d'observations sur les températures souterraines que nous possédons, n'a pas permis de déterminer la position de ces couches, ni les particularités qu'elles doivent présenter; seulement on sait par la théorie que, dans un même lieu, les variations diurnes produisent les mêmes effets que les variations annuelles, mais dans des limites de terrain moins étendues, dans le rapport des racines quarrées des temps, ou comme 19 : 1.

Lois de ces variations déduites de la théorie.

Fourier et Laplace ont examiné analytiquement les lois de ce mouvement; M. Poisson a repris la question de plus haut, en déterminant la température de la terre, à une profondeur et sur une verticale données, d'après la quantité de chaleur qui traverse sa surface à chaque instant. Cette quantité de chaleur est une fonction discontinue du temps, nulle pour les instants où le soleil est sous l'horizon, et qui, à toutes les autres époques, peut s'exprimer au moyen de l'angle horaire et de la longitude du soleil. Après avoir transformé cette fonction en une série de sinus et de cosinus des multiples de ces angles, M. Poisson a déterminé, pour chaque terme de cette série, la température qui, à une profondeur quelconque, correspond à chacune des variations extérieures, et des expres-

(1) Un point situé à cette profondeur peut encore éprouver, pendant plusieurs années consécutives, des variations très-lentes; ces variations paraissent résulter des irrégularités qui surviennent d'une année à l'autre dans l'état de l'atmosphère; de sorte que pour avoir une moyenne que l'on puisse regarder comme constante, abstraction faite des variations séculaires auxquelles elle peut être soumise, il faut prendre la moyenne des températures d'un assez grand nombre d'années.

sions, il a déduit les principaux phénomènes que présentent ces inégalités.

Il en résulte pour cette température des séries d'inégalités diurnes dont les périodes sont d'un jour ou d'un sous-multiple de jour, et d'inégalités annuelles dont les temps périodiques composent une année ou un sous-multiple de l'année. Sur chaque verticale, le *maximum* de chacune de ces inégalités se propage dans le sens de la profondeur avec une vitesse qui ne dépend que de la nature du terrain. A la surface, l'intervalle qui sépare le *maximum* de l'une de ces inégalités de celui de l'inégalité correspondante de la chaleur solaire, ne varie pas non plus avec les positions géographiques; mais il dépend à la fois de la nature du terrain et de l'état de la superficie. Il en est de même à l'égard du rapport entre ces deux *maxima*; dont le premier est toujours beaucoup moindre que le second; le long de chaque verticale, le *maximum* de chaque inégalité décroît en progression géométrique quand les profondeurs croissent par des différences égales, et le rapport de cette progression ne dépend que de la nature du terrain. Enfin on voit d'après les expressions de ces quantités, que parmi les inégalités de température, dont les périodes sont différentes, celles qui ont les plus courtes périodes se propagent avec le plus de rapidité, et décroissent aussi le plus rapidement.

Une certaine quantité de chaleur rayonnée par l'atmosphère traverse la surface de la terre, et s'ajoute à la chaleur solaire à une profondeur donnée. Elle produit, comme la chaleur solaire, des variations diurnes et annuelles qui se distinguent des inégalités dues à la chaleur solaire par leur amplitude et les époques de leurs *maxima*; mais leur effet est sans doute insensible. On conçoit aussi que les variations produites par les variations de température de la couche d'air en contact immédiat avec le sol, doivent être encore plus faibles que celles dues à la cause précédente. Enfin, la partie de la température moyenne due à la

chaleur solaire variant avec l'obliquité de l'écliptique, il doit correspondre à cette inégalité séculaire une variation qu'on ne peut déterminer exactement, puisqu'on ne connaît pas l'expression de l'obliquité en fonction du temps; mais les données que l'on a sur l'extrême lenteur des déplacements de l'écliptique et sur son peu d'amplitude suffisent pour montrer que les variations de température sont extrêmement faibles, et qu'elles doivent entrer pour fort peu de chose dans l'accroissement observé dans les lieux profonds.

États des températures à la couche inva-
riable.

Si on place un thermomètre un peu au-dessous des variations périodiques, cet instrument, comme on l'a déjà dit, marque une température qui est sensiblement constante pour un lieu déterminé; mais la profondeur à laquelle on atteint la température fixe varie avec les localités: il est remarquable qu'en général cette température fixe correspond presque parfaitement dans tous les lieux du globe à la température climatérique moyenne, qui est celle indiquée par un thermomètre suspendu à l'air, dans l'ombre, et à quelques mètres au-dessus du sol. Cet état des températures provient de la chaleur solaire qui s'est accumulée dans l'intérieur du globe, et qui s'y renouvelle continuellement en pénétrant les parties de la surface voisines de l'équateur et s'écoulant à travers les régions polaires. Il en résulte donc un flux continu et toujours semblable à lui-même qui traverse toute la masse du globe, de chaque côté du plan de l'équateur jusqu'aux pôles. Ce mouvement concourt avec les courants de la mer et de l'atmosphère, à égaliser les climats à la surface de la terre.

Résultats généraux
dédiés de l'observa-
tion.

On ne possède encore qu'un assez petit nombre de séries d'observations exactes, qui puissent aider à bien déterminer l'allure de ces inégalités souterraines. Depuis longtemps, M. Arago a fait placer à l'Observatoire plusieurs thermomètres, dont les réservoirs sont enterrés à différentes profondeurs; la tige de chaque instrument s'élève jusqu'à la surface du sol et un peu au-dessus, et c'est sur la division adaptée à la partie extérieure de cette tige que l'on mesure les variations de température. Il faut évidemment faire subir à la valeur observée une correction

qui est due à la manière dont varie la température sur la hauteur de la tige, et qui dépend du rapport des volumes de liquide renfermé dans le tube et la boule de l'instrument. On possède aussi des expériences très-exactes qui ont été faites à Freyberg, par M. le professeur Reich, et à l'Observatoire de Bruxelles par M. Quételet. Les variations de température qui ont été observées dans différentes localités concordent bien avec ce qu'annonce la théorie. Voici quelques-uns des résultats que M. Quételet a conclus de l'examen des principales observations faites jusqu'à ce jour :

1° En descendant, à partir de la surface de la terre, à des profondeurs toujours croissantes, la température moyenne de l'année augmente graduellement; néanmoins il paraîtrait qu'immédiatement au-dessous de la surface du sol, et à la profondeur d'un demi-pied ou d'un pied environ, il se présente une couche dont la température est un *minimum*.

2° La vitesse avec laquelle les variations *annuelles* de température se transmettent à l'intérieur de la terre peut être considérée comme étant de six à sept jours pour une couche d'un pied d'épaisseur.

3° L'observation montre que, conformément à la théorie, les différences des températures extrêmes de l'année décroissent en progression géométrique, pour des distances à la surface qui augmentent selon une progression arithmétique.

4° Les variations des températures *annuelles* peuvent être considérées comme à peu près nulles aux profondeurs de 20 à 25 mètres, c'est-à-dire vers la couche où les *maxima* et les *minima* des températures devraient arriver aux mêmes époques qu'à la surface du sol, (d'après l'observation n° 3).

5° Quand on descend à plusieurs pieds de profondeur, les variations *annuelles* des températures, comptées à partir de la valeur moyenne, sont entre elles comme les sinus des temps, en supposant que la circonférence représente la période de l'année ;

6° La vitesse avec laquelle les variations *diurnes* de températures

se transmettent dans l'intérieur de la terre, peut être considérée comme étant d'un peu moins de trois heures pour une couche de terre de 1 décimètre d'épaisseur ;

7° Les variations *diurnes* sont à peu près nulles à la profondeur de 1^m,33 ; c'est-à-dire à une profondeur dix-neuf fois moindre que celles où s'éteignent également les variations annuelles, conformément à la théorie.

Quantité de chaleur que nous envoie le soleil ; proportion de cette chaleur qui est absorbée par l'atmosphère.

Après avoir parlé du mouvement de la chaleur dans la partie de l'écorce du globe, qui est située au-dessus de la couche invariable, il me reste à rapporter brièvement ce que les expériences de M. Pouillet ont appris relativement à la quantité de chaleur que la terre reçoit du soleil dans le cours d'une année, et sur la proportion de cette chaleur qui est absorbée par l'atmosphère.

1° En comparant les évaluations de température observées avec son pyréliomètre et les épaisseurs atmosphériques correspondantes, M. Pouillet a vu que l'on pouvait très-bien représenter l'élévation de température t produite par le soleil, en fonction de l'épaisseur atmosphérique ε , par la formule

$$t = A p^\varepsilon.$$

A et p étant deux constantes ; mais A est une constante indépendante de l'état de l'atmosphère ; p est une constante qui ne varie pas pour un même jour, quand le temps est bien fixe, et qui varie d'un jour à l'autre, suivant que la sérénité du ciel est plus ou moins parfaite. A est donc la *constante solaire*, ou la constante qui contient, comme élément essentiel, la puissance calorifique constante du soleil, tandis que p est la *constante atmosphérique*, ou celle qui contient comme élément essentiel le pouvoir de transmission variable, dont l'atmosphère se trouve douée pour laisser arriver, jusqu'à la surface de la terre, les proportions plus ou moins grandes de la chaleur solaire incidente :

Les expériences donnent, pour la valeur de A , $6^\circ 72$; p a varié de 0,7244 à 0,7888 ;

serait capable de fondre une couche de glace qui envelopperait la terre

2° Si dans la formule précédente on suppose $p=1$ ou $\varepsilon=0$, on a $t=6^{\circ},72$; c'est-à-dire que le pyrhéliomètre prendrait une température de $6^{\circ},72$, si l'atmosphère pouvait transmettre intégralement toute la chaleur solaire, ou si l'appareil pouvait être transporté aux limites de l'atmosphère. Or, il a été facile de calculer la quantité de chaleur reçue par l'instrument en une minute, sur chaque centimètre carré: elle est égale à $0,2624t$. Ainsi $6^{\circ},72 \times 0,2624$ ou $1,7633$, est la quantité de chaleur que le soleil donne sur 1 centimètre carré aux limites de l'atmosphère, et qu'il donnerait pareillement à la surface de la terre si l'air atmosphérique n'absorbait aucun des rayons incidents;

3° Les valeurs de p et de $1-p$, qui correspondent à $\varepsilon=1$, montrent que dans le trajet vertical, l'atmosphère absorbe entre les $\frac{18}{100}$ et les $\frac{25}{100}$ de la chaleur incidente, sans qu'il soit possible de distinguer dans le ciel des vapeurs qui en troublent la transparence;

4° Au moyen de cette donnée, et de la loi selon laquelle diminue la quantité de chaleur transmise quand l'obliquité augmente, M. Pouillet a calculé la proportion de chaleur incidente qui arrive à chaque instant sur l'hémisphère éclairée; et il a reconnu que, pour la valeur moyenne $p=0,75$, la proportion qui arrive au sol est comprise entre 0,5 et 0,6, et par conséquent la proportion absorbée par l'atmosphère se trouve comprise entre 0,5 et 0,4, mais très-voisine de 0,4. Ainsi, quand l'atmosphère a toute l'apparence d'une sérénité parfaite, elle absorbe encore, près de la moitié de la quantité totale de chaleur que le soleil envoie vers la terre :

5° Connaissant la quantité de chaleur que le soleil envoie à la terre pendant 1', par son action perpendiculaire sur 1 centimètre carré, on peut déterminer la quantité totale de chaleur qui est versée à chaque minute sur le globe entier et l'atmosphère. Le résultat peut se traduire de cette manière:

Si la quantité de chaleur que la terre reçoit du soleil dans le cours d'une année, était uniformément répartie sur tous les points du globe, et qu'elle y fût employée, sans perte aucune, à fondre de la glace, elle

serait capable de fondre une couche de glace qui envelopperait la terre entière, et qui aurait une épaisseur de 30^m,89.

III. De la chaleur actuellement propre au globe terrestre.

Accroissement graduel de température dans les lieux profonds.

L'observation a appris depuis longtemps, qu'à la profondeur où les inégalités diurnes et annuelles ne sont plus sensibles, la température croît suivant chaque verticale avec la distance à la surface. Les mesures prises avec soin dans un grand nombre de mines, et de puits artésiens, ne laissent aucun doute sur ce phénomène ; il a lieu près de l'équateur comme à notre latitude et plus près du pôle ; on l'observe également dans les mines dont l'ouverture est à une très-grande hauteur au-dessus du niveau des mers.

Le moyen le plus direct de connaître la loi plus ou moins rapide de l'accroissement de la température de la terre, est de déterminer un certain nombre de températures, le long de chaque verticale, dans des parties où les inégalités diurnes et annuelles ne se manifestent plus ; quelle que soit la cause de l'accroissement observé, on pourra, à toutes les distances que l'on peut atteindre et beaucoup au delà, le supposer proportionnel à la profondeur. On pourra donc représenter la température u du point situé à la profondeur x par la formule

$$u = f + gx,$$

f et g étant des quantités indépendantes de x et que l'on calculera pour chaque verticale. Pour cela on aura autant d'équations de conditions que l'on aura mesuré de températures, le long de cette verticale ; et si le nombre de ces équations est assez considérable, on en déduira les valeurs de f et g par la méthode des moindres carrés des erreurs.

En un même point, les deux quantités pourront varier par l'effet des variations séculaires de la température ; elles éprouveront aussi d'une année à l'autre des variations extrêmement faibles et inappréciables ; mais

d'un point à l'autre, elles varieront avec l'épaisseur de la partie solide de l'écorce, la perméabilité des roches à la chaleur, l'état plus ou moins humide de ces roches; la nature du sol à la surface, c'est-à-dire son état de culture, etc. La valeur de *g* est assez moyennement comprise entre 25 et 30 mètres.

Les mesures thermométriques qui ont été prises dans les roches elles-mêmes, n'ont pas donné une température supérieure à 37° c.; mais la présence fréquente de sources thermales dans des positions fort variées, force à admettre que si l'on pénétrait au delà des parties qu'ont atteintes les excavations artificielles, on trouverait une température d'au moins 100°.

Cette augmentation de température doit être regardée comme une trace de l'ancienne fluidité de l'écorce terrestre.

Si on sort des considérations physiques, pour consulter les phénomènes que nous présente la géologie, on reconnaît, qu'à des époques assez nombreuses dans l'histoire du globe, il a pénétré à travers les fractures des dépôts sédimentaires, des masses minérales qui étaient alors à l'état de fluidité ignée; et de plus, la manière dont varie l'ensemble de ces phénomènes, depuis les époques les plus reculées où nous puissions pénétrer jusqu'à nos jours, prouve d'une manière évidente qu'il y a eu un refroidissement continu et sensiblement graduel, pendant tout cet énorme espace de temps. Il faut donc admettre que la cause de l'accroissement de température que nous observons aujourd'hui dans la profondeur, est la continuation de la haute température qui a joué un rôle dans les diverses périodes géologiques.

Ainsi, on est *au moins* en droit de conclure rigoureusement, qu'une portion de l'écorce terrestre, et même une portion bien plus considérable que celle qu'il nous est possible d'explorer, a éprouvé, à une époque fort éloignée de nous, une température capable de fondre les roches granitiques; et que l'accroissement de température avec la profondeur que nous observons actuellement, est un reste de cet ancien état.

Mais, si nous voulons pénétrer au delà, nous ne pouvons plus nous

appuyer sur des faits assez positifs pour sortir du domaine des hypothèses.

La forme des couches du sphéroïde terrestre, leur disposition régulière autour de leur centre de gravité, leur accroissement de densité de la surface au centre, ne permettent pas de douter que notre planète n'ait été originairement à l'état fluide, comme l'ont en effet supposé, dans leurs recherches, Newton et tous les géomètres qui, depuis lui, se sont occupés de la théorie mathématique de la figure de la terre. Or, si on remarque que le volume de la masse terrestre est incomparablement plus considérable que celui de la masse des eaux (au moins 10,000 fois plus grand), et surtout si on tient compte de diverses considérations d'un ordre plus élevé, il devient à peu près évident que la fluidité initiale du globe était due à la chaleur.

Hypothèse de Fourier sur la chaleur centrale. Théorèmes qui en résultent.

Il semblait assez naturel de conclure du rapprochement de ces deux idées, que la manière dont croît la température, à mesure que l'on s'enfonce plus profondément, n'est autre chose qu'une trace de la fluidité initiale du globe, à laquelle se rattachent en même temps les phénomènes ignés des anciennes périodes.

Or, des explorations souterraines qui se bornaient à une très-petite portion de l'enveloppe superficielle, ne pouvaient conduire à la loi de distribution de température; il fallait nécessairement pour cela avoir recours à l'analyse, et ce fut principalement dans le but d'étudier cette grande question cosmologique, que Fourier établit sa théorie mathématique de la chaleur.

Dans l'expression à laquelle est arrivé Fourier, pour représenter le refroidissement d'une sphère échauffée d'une manière quelconque, les températures sont exprimées par une série dont tous les termes sont fonctions à la fois du temps et de la distance au centre, et qui pour un temps très-grand se réduit sensiblement à la valeur des premiers termes. Mais ici l'analyse présentait une difficulté assez grave. Les premiers termes contenaient une fonction circulaire qui, dans le cas général, paraît devoir passer alternativement du positif au négatif, de manière que l'intérieur de la terre sem-

blerait présenter , depuis la surface jusqu'au centre , une suite alternative de couches, dont les unes se trouveraient à des températures fort élevées, et les autres se trouveraient au-dessous de zéro. M. Libri a démontré ne effet que cette conséquence , qui est contraire à toutes les lois de la physique , ne résultait pas de l'analyse ; mais que la température , même en supposant le globe terrestre composé de couches hétérogènes , doit aller toujours en augmentant ou en diminuant ; et comme le signe de la variation est positif dans les couches superficielles , il en résulte que les températures vont toujours en croissant , à mesure qu'on s'approche du centre de la terre. Ce résultat analytique subsiste , quelle qu'ait été la distribution de la chaleur dans l'intérieur du globe.

En supposant que le temps écoulé depuis l'origine du refroidissement soit assez grand , pour que la température de chaque point de la terre soit réduite au premier terme de son expression , en série d'exponentielles (M. Poisson, *Traité de la Chaleur*, n° 171), la température v à une profondeur x , est représentée par une expression de la forme

$$v = f + gx ,$$

où f et g sont des quantités indépendantes de la profondeur ; g représente , comme plus haut , l'accroissement observé de la température moyenne le long de la verticale ; la quantité f est celle dont la chaleur initiale augmente encore la température de la surface à l'époque actuelle. On reconnaît immédiatement d'après l'expression de f et de g , que , le temps croissant par des différences égales , ces deux quantités décroîtront suivant une même progression géométrique , qui est extrêmement lente à cause de la grandeur du rayon terrestre. En outre des observations faites à Paris , donnent pour la valeur de f dans ce lieu , le nombre 0,0357 ; de sorte qu'à Paris , la chaleur d'origine augmenterait la température de la surface , d'un peu plus d'un trentième de degré.

L'extrême lenteur du refroidissement , qui était indiquée par la théorie , a été confirmée par les recherches historiques de M. Arago et celles de M. Libri. En outre , Laplace a démontré , d'après les anciennes observa-

tions des éclipses , que la durée moyenne du jour n'a pas varié d'un centième de seconde depuis les observations des Chaldéens. Or , suivant Laplace , si la température moyenne de la terre , considérée depuis la surface jusqu'au centre , avait diminué d'un centième de degré , le rayon terrestre se serait raccourci d'un dix-millionième , et par suite , la vitesse angulaire de rotation aurait varié de $\frac{1}{50}$ de seconde. Ainsi , on est loin de pouvoir assigner $\frac{1}{100}$ de degré à la variation de température du globe pendant l'espace de 2,500 ans. Laplace , il est vrai , n'a pas considéré dans son analyse le refroidissement possible de la lune , qui aurait dû accompagner celui de la terre ; mais , comme l'a observé M. Libri , le refroidissement de ce satellite , s'il avait eu lieu , n'aurait pu influencer que sur la vitesse de son mouvement de rotation , et , le mouvement de translation restant le même , le calcul des éclipses n'en aurait été aucunement affecté.

Si on suppose que les températures terrestres ne diffèrent pas beaucoup de l'état final , les refroidissements , pour des points situés sur le même rayon , sont proportionnels à leur température ; en sorte que pour qu'un élément de la surface perde une faible partie de sa chaleur , il faut que les points situés à une profondeur un peu considérable , perdent une quantité extrêmement grande de chaleur. Cela fait comprendre *à priori* , comme M. Libri l'a montré il y a longtemps , la raison de l'excessive lenteur du refroidissement à la surface , puisque ce refroidissement ne saurait être même très-petit , sans qu'il y ait un écoulement d'une quantité fort grande de chaleur. Or , on peut juger de la difficulté avec laquelle des couches , situées à la profondeur de plusieurs milliers de mètres , doivent éprouver des pertes énormes de chaleur , en se rappelant que les variations annuelles de température deviennent à très-peu près insensibles à la profondeur de 20 ou 25 mètres , c'est-à-dire qu'il faut plus que six mois à la chaleur solaire pour pénétrer une couche ayant à peine 25 mètres d'épaisseur.

D'après ce même théorème sur la vitesse du refroidissement des couches successives , M. Libri a aussi observé que c'est surtout à des profondeurs considérables qu'il faudrait établir des appareils thermométriques , pour étudier les variations futures de la température moyenne de la surface de la terre , puisque les variations y sont théoriquement plus grandes.

D'ailleurs la température de la surface est liée aux températures de l'espace, à celle émanant du soleil, à la hauteur de l'atmosphère, et à d'autres grands phénomènes, dont la constance est plutôt soupçonnée que démontrée; tandis que les variations qui ont lieu dans l'intérieur de la terre, ne dépendent guère que du refroidissement de notre planète.

Enfin Fourier a aussi déterminé, par l'analyse, la quantité de cette chaleur centrale qui traverse pendant un siècle, un mètre carré de superficie, pour se répandre dans l'espace. Elle serait capable de fondre une colonne de glace qui aurait un mètre carré pour base, et une hauteur d'environ 0^m,0066. Cette conséquence dérive d'une proposition fondamentale sur le mouvement de la chaleur, qui est d'autant plus importante, qu'elle subsiste indépendamment de la forme et des dimensions des corps, et quelle que soit la nature des substances homogènes ou diverses, dont la masse intérieure serait composée.

L'hypothèse précédente, qui jusqu'à présent a été généralement adoptée, offre des difficultés qui, selon M. Poisson, la rendraient peu vraisemblable.

Objections faites à l'hypothèse de Fourier. Hypothèse de M. Poisson.

Si l'accroissement de température observé aux distances accessibles, se prolonge jusqu'au centre de la terre, il doit exister dans le noyau du globe une chaleur dont on ne peut assigner le degré, même approximativement, puisqu'on ne connaît nullement la chaleur spécifique et le coefficient de conductibilité des substances qui constituent la plus grande partie de la terre. Mais, selon M. Poisson, elle doit y être excessive, au moins de 200,000 degrés. Néanmoins ces matières à l'état de gaz incandescents, seraient tellement condensées, que leur densité moyenne surpasserait cinq fois celle de l'eau. Pour les contenir à ce degré de compression de chaleur, il faudrait, dit M. Poisson, une force extraordinaire, dont on ne saurait se former aucune idée, et l'on peut même douter si la couche solidifiée du globe aurait une épaisseur et une cohésion suffisantes pour résister à l'effort des couches fluides intérieures.

En outre, si on admet que l'accroissement observé dans le sens de la

profondeur provienne de la chaleur d'origine, il faut, pour remonter à une époque où la chaleur de la surface fût assez considérable pour produire les anciens phénomènes géologiques, rétrograder d'un nombre de siècles qui, dit M. Poisson, effraie l'imagination la plus hardie, quelle que soit d'ailleurs l'idée qu'on puisse avoir de l'ancienneté de notre planète.

Pour expliquer comment la terre aurait pu perdre depuis longtemps toute sa chaleur d'origine, M. Poisson remonte au commencement du phénomène, et il conçoit à peu près de la manière suivante, ce qui s'est passé, lorsque les corps de notre système planétaire étaient encore à l'état du fluide aériforme. Indépendamment des attractions et des répulsions qui n'ont lieu qu'entre des molécules voisines, et qui produisent dans les corps gazeux, la force élastique, égale et contraire à la pression qu'ils supportent, les molécules de la terre étaient aussi soumises à leur attraction mutuelle, en raison inverse du carré des distances; de cette force il résulte, sur toutes les couches de la masse fluide, une pression nulle à la surface, croissant de la surface au centre, et qui a dû être extrêmement grande au centre même. C'est cette pression excessive, et non pas une température extérieure beaucoup moindre que celle du fluide qui a réduit successivement toutes ces couches à l'état solide, en commençant par les couches centrales, en continuant de proche en proche jusqu'à ce qu'il ne soit plus resté que les matières qui forment aujourd'hui la mer et notre atmosphère. Mais cette réduction n'a pas été instantanée; car il a fallu un certain temps à chaque couche fluide pour se rapprocher du centre vers lequel elle était poussée par la pression qu'elle éprouvait. Or, si l'on a égard à la vitesse considérable du rayonnement, on conçoit que les couches, en se solidifiant l'une après l'autre, aient dû perdre toute la chaleur dégagée pendant ce changement d'état, et qui s'en est échappée sous forme rayonnante à travers les couches supérieures, encore à l'état de vapeur; en sorte, conclut M. Poisson, qu'il ne reste plus, ni à l'époque actuelle, ni depuis bien longtemps, aucune trace de cette quantité de chaleur initiale, quelque grande qu'elle ait pu être.

En renonçant à la chaleur d'origine, pour rendre compte de l'élévation de température des lieux profonds, M. Poisson regarde ce phénomène comme produit par la chaleur inégale des régions de l'espace que la terre traverse, en s'y mouvant ainsi que tout notre système planétaire, avec une vitesse que l'observation n'a pas encore fait connaître.

Les étoiles, vu leur nombre presque infini, peuvent être regardées comme formant autour de chaque point de l'espace une enceinte immense, mais fermée de toutes parts. Or, quelles que soient sa forme et ses dimensions, si cette enceinte avait partout la même température, celle de l'espace serait aussi partout la même; mais il n'en est pas ainsi.

La chaleur propre de chaque étoile, aussi bien que sa lumière, étant entretenue par une cause particulière, les corps incandescents ne tendent pas à prendre une même température par l'effet d'un échange continuel de chaleur rayonnante. D'ailleurs, on sait aussi que ces astres ne nous paraissent pas uniformément répandus dans les profondeurs de l'espace; telle est au contraire l'inégalité de leur distribution, que sir William Herschel conclut de ces observations que les étoiles forment une sorte de couche (peu épaisse en comparaison de sa longueur et de sa largeur), dans laquelle la terre se trouve occuper à peu près le milieu de l'épaisseur.

Cela étant, la température de l'espace doit donc varier d'un point à l'autre; mais, en raison de l'immensité de l'enceinte stellaire, il faut, pour que cette variation soit sensible, qu'il s'agisse de deux points séparés par une très-grande distance. Ainsi la terre, comme chacune des autres planètes, éprouvera des variations de chaleur correspondantes aux régions que notre système parcourt dans son mouvement général. Toutefois, à cause de la grandeur de sa masse, on conçoit qu'en passant d'un lieu plus chaud dans un lieu plus froid, notre globe n'aura pas perdu dans la seconde région toute la chaleur qu'il avait acquise dans la première; et la terre, arrivée dans la région la plus froide, présentera, comme on l'observe effectivement, une température *croissante*, à partir de la surface. Le contraire aura lieu dans des circonstances inverses.

Nous ne pouvons connaître ni les grandeurs ni les périodes de ces variations de température; mais, comme toutes les inégalités de chaleur à longues périodes, elles produiront des variations qui s'étendront jusqu'à de très-grandes profondeurs. A une certaine distance plus grande que toutes celles que nous pouvons franchir, mais qui peut être une fraction peu considérable du rayon, l'accroissement ou le décroissement atteindra son *maximum*; au delà, il se changera en un accroissement ou en un décroissement, disparaîtra ensuite complètement.

Telle est, selon M. Poisson, la cause véritable de l'augmentation de température qui a lieu sur chaque verticale, à mesure que l'on s'abaisse au-dessous de la surface du globe. Dans cette théorie, la température moyenne de la superficie varie avec une lenteur extrême; mais plus rapidement que la partie de la température qui serait due à la chaleur d'origine si elle était encore sensible à l'époque actuelle.

On peut faire, sur les inégalités de température des régions de l'espace que la terre traverse, une infinité d'hypothèses différentes; pour que l'influence de ces inégalités soit sensible, il faut et il suffit en général que le *maximum* et le *minimum* consécutifs de la chaleur diffèrent beaucoup l'un de l'autre, et qu'ils soient séparés par un très-long intervalle de temps. Mais l'examen des faits géologiques impose certaines conditions à ces hypothèses. Il est d'abord nécessaire que la température ait pu s'élever au point de fondre toutes les roches qui composent la croûte primitive de la terre. Pour cela il suffit de concevoir :

1° Qu'il existe des portions de l'espace, dans lesquelles un très-grand nombre de rayons stellaires viennent se croiser, et où la température soit par conséquent extrêmement élevée (comme cela a peut-être lieu dans la *voie lactée*).

2° Que leur étendue est telle, que la terre, d'après la vitesse inconnue de son mouvement, a pu traverser l'une de ces zones torrides en quelques milliers de siècles, c'est-à-dire en un nombre de siècles suffisants pour que sa couche extérieure ait pris une température peu différente de celle de l'espace.

En outre, d'après les variations de la chaleur terrestre que les

phénomènes géologiques permettent d'apprécier jusqu'à un certain degré, et de suivre depuis des périodes extrêmement reculées jusqu'à nos jours, il faut que la température de l'espace stellaire se soit abaissée rapidement à partir du *maximum*, pour arriver à une valeur qui depuis lors n'a diminué que très-lentement.

Or, si l'on choisit la formule des températures de l'espace de manière à satisfaire à ces conditions, il en résulte pour les températures de l'écorce terrestre, depuis les époques de l'histoire du globe dont il nous reste des traces jusqu'aujourd'hui, une distribution qui est à peu près analogue à ce qui aurait lieu, si un globe, d'abord échauffé d'une manière uniforme, se refroidissait dans un espace de température sensiblement constante. Ainsi l'hypothèse de M. Poisson et celle de Fourier, qui, au premier aspect, semblent si différentes, et qui en effet diffèrent totalement pour l'époque initiale de la formation de la terre, peuvent être ramenées à une sorte de concordance, quand on ne remonte pas au delà du domaine géologique proprement dit.

IV. *Des principaux phénomènes géologiques en connexion avec la chaleur propre du globe.*

L'origine des principaux phénomènes géologiques peut être dérivée d'une manière très-satisfaisante, en partant d'un état de fusion de l'écorce terrestre qui se serait étendu au moins à quelques milliers de mètres de la surface, soit qu'on regarde cette haute température comme provenant de l'époque de la formation des planètes, soit, comme l'explique M. Poisson, qu'elle résulte du passage de notre système à travers des régions torrides des espaces stellaires. Mais comme une discussion à ce sujet, appuyée comme il le faudrait sur des faits, serait d'une étendue trop considérable, pour pouvoir être développée autrement que dans une argumentation orale, je ne puis présenter ici qu'un exposé succinct, sans l'accompagner de démonstration.

1° Des grandes dislocations qui se sont produites dans l'écorce terrestre.

L'histoire de la terre se compose , comme on sait , d'une série de périodes de tranquillité dont chacune a été séparée de la suivante par une violente révolution , dans laquelle une portion de la croûte du globe a été disloquée , phénomène qui a dû entraîner un déplacement plus ou moins considérable des mers.

Le nombre , la périodicité et la similitude de ces grands événements a fait voir qu'il ne fallait pas en chercher l'origine dans des causes astronomiques ; et un examen attentif des faits a amené à les regarder comme des effets de la haute température dont on observe les traces à une certaine profondeur.

Un globe , comme la terre , d'abord à l'état de fluidité incandescente , étant supposé se refroidir dans un milieu d'une température très-inférieure , il doit se former rapidement une première croûte solide. Cette croûte se comprimant par l'effet de l'abaissement de température , comprimera l'intérieur encore liquide , jusqu'à ce qu'il se forme des fractures par lesquelles une partie de la masse liquide ou pâteuse s'épanche à la surface. Tel fut peut-être le phénomène des éruptions les plus anciennes.

Mais à mesure que le refroidissement fait des progrès , les résultats de cette première cause se modifient , et il arrive une période , période dans laquelle la terre semble se trouver depuis longtemps , où la température de la surface ne s'abaissant plus que d'une quantité insensible , l'enveloppe solide ne se contracte plus qu'avec une lenteur extrême , tandis que la température de la masse fluide , en contact avec cette enveloppe , diminue plus rapidement. Nous ne connaissons pas , il est vrai , quelles sont les propriétés physiques des corps qui composent l'intérieur de la terre ; mais les analogies les plus naturelles portent à penser que cette inégalité du refroidissement doit mettre son enveloppe dans la nécessité de diminuer sans cesse de capacité , malgré la constance presque rigoureuse de sa température , pour ne pas cesser d'embrasser exactement la masse interne dont la température

décroit sensiblement. Elle doit, par suite, s'écarter légèrement et d'une manière progressive de la figure sphéroïdale qui lui 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 notre globe peut renfermer, semble pouvoir rendre complètement raison de ces sortes de débâcles; c'est-à-dire de la formation subite des rides et des diverses tubérosités qui se sont produites par intervalles dans la croûte de la terre, et probablement aussi de tous les autres corps planétaires.

Cet écrasement tend en général à se faire suivant des grands cercles; mais souvent des dislocations antérieures peuvent empêcher cette régularité dans les phénomènes. En outre, ces grands événements ont dû devenir d'autant plus rares que l'écorce solide du globe devenait plus épaisse, et par conséquent les dernières dislocations doivent être les plus considérables.

Une portion de la sphère, ayant la forme d'un fuseau, cède donc à cet effort latéral, et se plisse longitudinalement suivant une surface cylindroïde. La masse pâteuse et même la masse liquide qui sont comprises sous ce bombement, étant pressées latéralement, réagissent et tendent à soulever les portions de l'écorce situées au-dessus d'elles. Les couches supérieures, qui en général sont sédimentaires, commencent donc à se soulever en se brisant, et, au milieu des parties disloquées, sont poussées les masses solides d'origine ignée, sur lesquelles les premières reposaient; enfin les masses pâteuses, violemment poussées, s'injectent dans les interstices. D'après la manière dont s'explique le phénomène, on conçoit que les masses tout à fait liquides, comme les basaltes, n'aient pas été généralement lancées comme les masses pâteuses, non seulement parce qu'elles se trouvaient à une profondeur considérable, mais surtout parce qu'elles ne pouvaient être pincées dans le ridement; et effectivement ces matières sont en général venues au jour dans d'autres circonstances que celles qui accompagnent le soulèvement des chaînes de montagne.

Tel est en gros le mécanisme du phénomène, tel qu'il peut être déduit des lois générales du phénomène, particularisées par les observations faites dans les chaînes de montagne. On expliquera, s'il le convient, comment ces actions violentes ont été accompagnées de plissements de couches, de systèmes de fissures, etc., et d'autres accidents, qui en général sont alignés parallèlement à la direction générale de la dislocation.

Du reste, les phénomènes dynamiques, tels que nous les observons actuellement, malgré leur faible intensité, viennent confirmer la base de cette explication. Ainsi l'élévation graduelle du sol de la Suède tandis que le Groënland s'abaisse, l'affaissement de l'Égypte, observé par M. Cordier, le mouvement des côtes du Chili nous montrent que l'écorce du globe, loin d'être dans un état d'immobilité et de repos, est perpétuellement tourmentée par des tiraillements qui, au bout d'un certain temps, doivent amener une catastrophe violente. Les tremblements de terre paraissent être les effets de cette tension qui se rompt subitement, en produisant des vibrations sur de grandes portions de l'écorce terrestre. On reconnaît d'ailleurs, d'après l'étude des formations des diverses périodes, que ces changements de niveau ne datent pas de l'époque actuelle, et que, depuis les plus anciens dépôts fossilifères, la coque terrestre jouit de cette mobilité, qui devait être d'autant plus facile que la partie solide était plus mince. Ainsi il y a déjà bien des siècles que le globe se trouve dans la phase actuelle de son refroidissement.

2° De la nature des roches d'éruption aux diverses époques.

La nature des masses qui sont sorties à l'état pâteux ou fluide de l'intérieur de la terre a varié d'une manière remarquable depuis les temps les plus anciens auxquels nous puissions remonter jusqu'à nos jours, et on peut en rapporter la cause à une solidification progressive qui s'est accrue de la surface vers l'intérieur. On conçoit facilement que les couches qui composent l'écorce terrestre doivent être disposées, l'une par rapport à l'autre, d'après une sorte de résultante de

deux éléments, de leur pesanteur spécifique et de leur degré de fusibilité.

Après avoir longtemps admis que le granite constituait le terrain fondamental qui supportait tous les autres, il est actuellement reconnu que cette roche s'est épanchée à l'état fluide au milieu de roches sédimentaires, peut-être jusqu'à une époque contemporaine de la formation houillère. Mais on trouve si généralement comme base des terrains stratifiés, une telle quantité de roches analogues au granite, et il existe un si grand nombre de dépôts dont les matériaux résultent de la destruction de ces mêmes roches, que l'on est porté à conclure que la constitution granitoïde est celle que prenait la matière lors de sa première consolidation à la surface du globe. Les roches ignées qui sont ensuite venues s'intercaler dans les formations fossilifères successives, sont de compositions minéralogiques assez variées. Quoiqu'il y ait enchevêtrement entre les époques de l'apparition de chacune d'elles, on peut cependant les classer en masse dans l'ordre d'ancienneté suivant : les granites, les porphyres, puis plus récemment sont venus les trapps, les basaltes et les trachytes. On conçoit bien qu'il soit survenu des irrégularités dans leur ordre chronologique; car les roches des terrains inférieurs peuvent être refondues d'après des causes purement locales, par exemple, par suite d'une courbure de l'écorce vers l'intérieur, et elles ont pu être ensuite poussées de nouveau à la surface.

Mais si on considère l'ensemble de ces roches d'éruption, on reconnaît d'abord que la silice est plus abondante dans les roches les plus anciennes, tandis que la proportion de la chaux et de la magnésie augmente dans les roches dites *trapéennes*, qui renferment comme élément essentiel l'amphibole ou le pyroxène. Cette variation de composition chimique correspond à des différences de fusibilité qui sont surtout évidentes dans les termes extrêmes de cette série de roches. On reconnaît aussi facilement, d'après les pesanteurs spécifiques des minéraux qui constituent les roches, que leur densité a été en augmentant des granites aux basaltes.

3° Des terrains modifiés par l'influence de la chaleur du globe.

Beaucoup de roches anciennes, ayant une disposition stratiforme, ont une nature minéralogique plus ou moins différente de celles qui ont été déposées dans les dernières périodes. On a cru pendant longtemps que toutes les couches avaient été formées telles que nous les observons aujourd'hui. Mais différents faits avancés d'abord par Hutton, et développés par les géologues écossais, ont montré clairement que certaines roches ont été modifiées postérieurement à leur dépôt, et que, dans beaucoup de cas, ce *métamorphisme* s'est produit sous l'influence de la chaleur. Ainsi, par exemple, on peut en suivant un groupe de couches, rencontrer des transformations de schiste argileux en micaschiste ou en gneiss. On observe des altérations postérieures du même genre, et d'une manière plus évidente encore, mais sur une moindre échelle, dans des roches de formation assez récente qui sont en contact avec des masses d'éruption.

Des expériences de M. Mitscherlich, et d'autres faits, apprennent que des différences de température peuvent donner lieu à des groupements moléculaires différents, sans que le corps cesse d'être à l'état solide. On conçoit donc qu'il ait pu se produire un mouvement intestin, et diverses réactions chimiques entre les éléments contenus dans ces roches, sans qu'elles aient été amenées à l'état liquide ou même à l'état pâteux, surtout si on tient compte de l'immense espace de temps pendant lequel la chaleur a pu agir; et il n'est pas étonnant que les masses aient conservé la disposition stratiforme qu'elles possédaient originellement.

Mais comme les roches sont de très-mauvais conducteurs de la chaleur, les roches d'origine ignée qui sont venues s'intercaler au milieu des dépôts, n'ont dû produire par leur voisinage d'effet permanent que sur des distances fort restreintes, et cela seul ne peut expliquer l'état général des roches anciennes. Toutefois l'échauffement a pu être transmis par le dégagement de matières gazeuses venant de l'intérieur, et même ces vapeurs ont pu introduire de nouveaux éléments chimiques dans des couches déjà formées. Mais la cause qui paraît avoir le plus puissamment contri-

bué à cette modification , est le flux de chaleur qui traversait ces roches pour se propager de l'intérieur vers les espaces célestes. A l'époque , par exemple , à laquelle l'accroissement par mètre était de $\frac{1}{3}$ de degré , au lieu de $\frac{1}{30}$ de degré comme aujourd'hui , la température de 1000 degrés existait à 3000 mètres de profondeur , tandis qu'actuellement , cette température ne se trouve que vers une distance de 30,000 mètres de la surface , en supposant uniformité dans la loi d'accroissement. Or si , après la formation d'une certaine série de couches , il s'est déposé par dessus un dépôt sédimentaire très-épais , il aura fallu , pour que l'équilibre de température s'établît de nouveau , que les anciennes couches prissent progressivement une température plus élevée qu'auparavant ; et souvent leur échauffement aura pu être assez intense pour qu'à une certaine profondeur , les schistes aient acquis l'éclat satiné qu'on leur connaît , tandis qu'à une profondeur plus grande ils auront été transformés en schistes cristallins , en micaschistes ou en gneiss. On conçoit aussi que , dans certains cas , le granite ait été refondu , puis ait été injecté en filons. Enfin si les couches ont été repliées , les effets de la chaleur auront pu être bien plus avancés dans certaines parties que dans d'autres.

Cette explication rend bien compte des différents faits que l'on observe , et elle montre pourquoi le phénomène a eu lieu dans les époques anciennes , plus fréquemment , et d'une manière beaucoup plus complète que dans les époques modernes.

Les substances organiques qui ont donné naissance aux dépôts de diverses natures de combustible , ont aussi subi des altérations plus ou moins considérables depuis leur dépôt. Les expériences de sir James Hall , et celles de M. Beudant , font concevoir comment ces modifications sont le plus souvent en rapport avec l'âge du terrain , au milieu desquels ces combustibles sont enfouis.

4° De la température à la surface du globe aux anciennes périodes géologiques.

En examinant la nature végétale et la nature animale aux diverses époques de l'histoire du globe , on remarque des différences assez tranchées , qui montrent clairement qu'il y a eu une variation considé-

nable dans la température des climats depuis les temps les plus reculés jusqu'à la période actuelle. Cet abaissement progressif de température s'observe surtout d'une manière très-sensible dans les latitudes élevées, parce qu'autrefois la chaleur était répandue sur la surface du globe avec beaucoup plus d'uniformité qu'aujourd'hui.

On sait qu'il existe un rapport constant entre l'excès de température que la terre présente à sa surface au-dessus de celle que le soleil et l'atmosphère tendent à lui communiquer, et l'augmentation graduelle dans la température des lieux profonds. Actuellement, lorsqu'on s'enfonce dans la terre, la température augmente d'environ $\frac{1}{30}$ de degré, et l'excès de température est à peu près $\frac{1}{30}$ de degré. A l'époque du terrain houiller, l'augmentation de température par mètre de profondeur pouvait, sans doute, s'élever $\frac{1}{3}$ de degré; mais des considérations géologiques s'opposent à ce qu'on la suppose plus considérable. L'excès de température ne pouvait donc dépasser $\frac{1}{3}$ de degré centigrade, quantité trop faible pour rendre compte directement de la différence avec les climats actuels. M. Elie de Beaumont a attribué cette différence, qui paraît être un résultat indirect et complexe du refroidissement du globe, aux *effets accessoires* suivants :

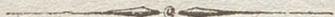
1° Dans les anciennes périodes géologiques, les glaces polaires ne devaient pas exister, et cette suppression suffirait probablement à elle seule pour relever jusqu'à 0° la température moyenne du pôle, qui peut être aujourd'hui de 25° au-dessous zéro.

2° Lorsque les glaces polaires n'existaient pas, les mers présentaient, depuis la surface jusqu'au fond, une température beaucoup moins inégale qu'aujourd'hui; de plus, la température de la surface ne pouvait s'abaisser que d'une très-petite quantité au-dessous de la température de la masse. Cette mer devait donc se couvrir de brouillards quand le soleil disparaissait sous l'horizon.

3° A l'époque où la température des lieux profonds croissait dix fois plus vite qu'actuellement, un très-grand nombre de sources devaient être thermales, et elles contribuaient aussi à la formation de brouillards, qui s'opposaient au rayonnement nocturne et hivernal.

4^e Enfin, on sait que la température de la terre dépend du rôle que joue son atmosphère, comme substance diathermane. Or, il n'est nullement invraisemblable qu'à l'époque du terrain houiller, la pression barométrique ait été plus grande que de nos jours. Les recherches de M. Ad. Brongniart ont, en effet, rendu très-probable que la quantité d'acide carbonique contenue dans l'atmosphère était plus grande qu'aujourd'hui; l'oxygène pouvait aussi être en quantité notablement plus grande, et avoir disparu par combustion à la surface ou dans l'intérieur de la terre. Enfin, lorsque les calottes de glace des pôles n'existaient pas, la quantité de vapeur d'eau contenue dans la masse de l'atmosphère était certainement beaucoup plus considérable.

Ainsi, sans pouvoir apprécier numériquement le rôle de ces quatre éléments, on conçoit très-bien que tous ces effets réunis aient pu contribuer à rendre la température moyenne du globe plus élevée, surtout dans les hautes latitudes, et à égaliser les climats sur toute la terre.



PROGRAMME DE THÈSE

SUR

LE RAPPORT QUI EXISTE

ENTRE

LA COMPOSITION CHIMIQUE ET LA FORME CRISTALLINE
DES CORPS INORGANIQUES.

On reconnaît dans beaucoup de substances que le même nombre d'atomes, combinés de la même manière, produit la même forme primitive, sauf de légères différences dans la valeur des angles. Ainsi la forme cristalline d'une substance semble dépendre plutôt de la forme de sa constitution chimique que de la nature même de ses principes composants, comme l'avait supposé Haüy; et l'isomorphisme paraît être une conséquence mécanique de la similitude d'arrangement des molécules élémentaires.

Mais ces molécules élémentaires restant identiquement les mêmes, elles peuvent se grouper dans des états d'équilibre qui varient sous certaines influences, telles que celle de la chaleur, comme on le voit clairement pour le soufre, le carbonate de chaux et d'autres substances. Le fait du dimorphisme aide à faire concevoir comment, d'un autre côté, des substances de la composition la plus différente ont des formes qui appartiennent au même système cristallin.

Examen des principaux faits qui se rapportent à ce sujet.

De l'isomorphisme. Cette propriété s'observe dans les composés de toutes les classes. Son utilité pour déterminer les poids atomiques de divers corps simples.

Fer oligiste et corindon ; oxide d'étain et rutilé ; fer oxidé magnétique, fer chromé, franklinite, spinelle, gahnite, et pléonaste ; arsenio-sulfure, antimonio-sulfure de nickel, et arsénio-sulfure de cobalt ; sulfates de baryte, de strontiane et de plomb ; molybdate et tungstate de plomb, etc., etc.

Un certain nombre des bases que l'on suppose composées d'un atome d'oxygène pour un atome de métal, paraissent se partager en deux groupes, d'après leurs carbonates. Ainsi les carbonates de chaux, de magnésie, de manganèse, de fer, de zinc, cristallisent dans la forme rhomboédrique, tandis que les carbonates de baryte, de strontiane et de plomb, affectent une autre forme ; mais ces deux groupes sont réunis par l'isomorphisme des tungstates de plomb et de chaux, de l'apatite et des chloro-phosphate et chloro-arséniate de plomb, etc.

Enfin les silicates présentent des exemples nombreux et variés de substitutions ; diverses espèces de grenats, d'amphiboles, de pyroxènes, etc.

Il existe ordinairement de petites différences dans les valeurs des angles des formes fondamentales, à moins toutefois que les axes géométriques du type cristallin ne soient égaux entre eux. Ainsi, par exemple, les combinaisons de la baryte, de la strontiane et de l'oxide de plomb, n'ont généralement pas des angles identiques ; mais les nitrates de ces trois bases ont la forme de l'octaèdre régulier. Cela montre qu'on ne peut attribuer ces différences d'angles à des différences dans les formes primitives des corps composants.

Relation entre les diverses proportions de mélanges et les variations dans la valeur des angles, d'après M. Beudant.

Du dimorphisme. Double forme de soufre selon la manière dont on le fait cristalliser. Circonstances dans lesquelles on obtient le carbonate de chaux, tantôt sous la forme du spath d'Islande, tantôt sous la forme de l'arragonite. Le carbonate de magnésie a été aussi obtenu par M. Gustave Rose sous la forme de l'arragonite, et de la même manière que cette substance. Enfin, le fer carbonaté, dont la seconde forme a été observée par M. Dufrénoy dans la junckérite, présente une analogie remarquable avec ces composés. Transformation spontanée de sulfate de nickel et du séléniate de zinc sous la seule influence des rayons solaires, etc.

La connexion qui existe entre le dimorphisme proprement dit, et d'autres genres de modifications qui surviennent dans certaines propriétés physiques (telles que la cohésion, la couleur) porte à étendre le sens de ce mot. Certains liquides à dilatation anormale, comme l'eau, présentent même des faits comparables au dimorphisme des corps solides.

Il y a généralement une différence de stabilité dans les états d'équilibre de deux corps dimorphes, soit naturels, soit artificiels. Ainsi, non seulement l'arragonite se transforme en spath calcaire si on la laisse sous l'eau après sa précipitation, mais à une faible chaleur rouge elle se réduit en poussière sous la forme de petits rhomboédres.

Différence entre l'isomerisme et le dimorphisme ou hétéromorphisme.

La forme primitive restant la même, le cristal peut être diversement modifié dans ses limites extérieures par certaines circonstances. Causes fondamentales qui, d'après les expériences de M. Beudant, font varier les formes cristallines. Influence des mélanges mécaniques ;

altération de la dissolution par des matières solides, liquides ou gazeuses qu'on y introduit.

Relation remarquable, annoncée par Kuppfer, entre la forme cristalline, le poids de l'atome et la pesanteur spécifique de beaucoup de substances.

Valeur relative de la composition chimique et de la forme cristalline, considérées comme base d'une classification minéralogique, c'est-à-dire pour servir à la détermination de l'espèce.

Spécification cristallographique établie par Haüy.

Autre notion de l'espèce mieux en rapport avec les faits de l'isomorphisme et du dimorphisme; difficultés résultantes du mélange des corps.