

fait un axiome, on considère naturellement comme entachés d'erreur les faits qui établissent la dissociation de ces vapeurs au lieu d'établir leur décomposition.

L'un des plus illustres représentants de la théorie atomique a cherché, en utilisant la méthode hygrométrique que j'ai imaginée, les conditions dans lesquelles les expériences donnent des résultats différents des miens et plus conformes aux hypothèses atomistiques. Les lecteurs des *Annales* pourront juger, par les détails dans lesquels je suis entré, quelles sont les recherches qui ont satisfait à toutes les conditions de la méthode hygrométrique, et quelle est la valeur des déductions qu'on en a tirées.

Quant à moi, je me crois autorisé à maintenir mes résultats et mes conclusions premières, c'est-à-dire l'existence de l'hydrate de chloral à l'état gazeux.

Ce résultat est d'ailleurs conforme à celui auquel M. Berthelot est arrivé par ses études calorimétriques sur l'hydrate de chloral à l'état solide, à l'état liquide et à l'état gazeux ⁽¹⁾.

RECHERCHES SUR LA PROPRIÉTÉ QUE POSSÈDENT LES CORPS DE SE SOUDER SOUS L'ACTION DE LA PRESSION;

PAR M. WALTHERÉ SPRING,

Correspondant de l'Académie royale de Belgique,
Professeur à l'Université de Liège.

INTRODUCTION.

On se rappelle que Faraday découvrit, en 1850, que deux fragments de glace, pressés l'un contre l'autre, se

⁽¹⁾ *Annales de Chimie et de Physique*, 5^e série, t. XII, p. 536, et t. XX, p. 521.

soudaient avec une facilité d'autant plus grande que leur température était plus voisine du point de fusion.

Ce fait, connu aujourd'hui sous le nom de *regel*, ne paraissait pas témoigner par lui-même d'une grande importance; mais il fut appliqué immédiatement, par l'esprit ingénieux et sagace du célèbre physicien Tyndall, à l'interprétation de la formation et du mouvement des glaciers, sur lesquels on avait, à cette époque, bien peu d'idées exactes ou seulement plausibles.

Les expériences au moyen desquelles le savant professeur de Royal Institution démontra que la glace, cette substance presque dépourvue de plasticité dans le sens généralement attribué à ce mot ⁽¹⁾, pouvait, à cause du regel, se mouler dans les formes les plus variées, sont trop connues pour qu'il puisse en être question ici. Il en est de même de celles que MM. Tresca ⁽²⁾, Helmholtz ⁽³⁾ et Bottomley ⁽⁴⁾ ont fait connaître de leur côté. Je n'examinerai ici que les explications que l'on a données de ces faits, et je serai ainsi amené à montrer que, de l'avis même de Helmholtz et de Tyndall, nous ne sommes pas encore en possession d'une solution satisfaisante de la question.

Faraday considéra le phénomène du regel comme une

⁽¹⁾ M. Pfaff (*Ann. von Poggendorff*, t. CLV, 1875, p. 169), a montré, en effet, que la glace n'est pas absolument dépourvue de plasticité à la température de 0°, mais cette faible plasticité diminue beaucoup quand la température baisse. Ainsi un cylindre en fer de 11^{mm}, 5 de diamètre et de 1^{mm}, 7 d'épaisseur s'enfonça de 1^{mm}, 25 en douze heures dans la glace sous une pression de 2^{atm} à une température de -4° à -1° et seulement de 1^{mm} en cinq jours sous 5^{atm} à la température de -12° à -6°.

Avant M. Pfaff, M. Reusch (*id.*, t. CXXV, p. 304) et M. Kane étaient aussi parvenus à déformer, d'une manière permanente, des lamelles de glace en les chargeant de poids. Voir aussi REUSCH, *Elasticitäts modulus des Eises* (*Annalen von Wiedemann*, t. IX, p. 329).

⁽²⁾ TRESCA, *Sur l'écoulement des solides*. Paris, 1872.

⁽³⁾ HELMHOLTZ, *Populäre wissenschaftliche Vorträge; Eis und Gletscher*, p. 95 à 129. Braunschweig, 1865.

⁽⁴⁾ BOTTOMLEY, *Nature*, 4 January 1872.

fait un axiome, on considère naturellement comme entachés d'erreur les faits qui établissent la dissociation de ces vapeurs au lieu d'établir leur décomposition.

L'un des plus illustres représentants de la théorie atomique a cherché, en utilisant la méthode hygrométrique que j'ai imaginée, les conditions dans lesquelles les expériences donnent des résultats différents des miens et plus conformes aux hypothèses atomistiques. Les lecteurs des *Annales* pourront juger, par les détails dans lesquels je suis entré, quelles sont les recherches qui ont satisfait à toutes les conditions de la méthode hygrométrique, et quelle est la valeur des déductions qu'on en a tirées.

Quant à moi, je me crois autorisé à maintenir mes résultats et mes conclusions premières, c'est-à-dire l'existence de l'hydrate de chloral à l'état gazeux.

Ce résultat est d'ailleurs conforme à celui auquel M. Berthelot est arrivé par ses études calorimétriques sur l'hydrate de chloral à l'état solide, à l'état liquide et à l'état gazeux ⁽¹⁾.

RECHERCHES SUR LA PROPRIÉTÉ QUE POSSÈDENT LES CORPS DE SE SOUDER SOUS L'ACTION DE LA PRESSION;

PAR M. WALTHER SPRING,

Correspondant de l'Académie royale de Belgique,
Professeur à l'Université de Liège.

INTRODUCTION.

On se rappelle que Faraday découvrit, en 1850, que deux fragments de glace, pressés l'un contre l'autre, se

⁽¹⁾ *Annales de Chimie et de Physique*, 5^e série, t. XII, p. 536, et t. XX, p. 521.

soudaient avec une facilité d'autant plus grande que leur température était plus voisine du point de fusion.

Ce fait, connu aujourd'hui sous le nom de *regel*, ne paraissait pas témoigner par lui-même d'une grande importance; mais il fut appliqué immédiatement, par l'esprit ingénieux et sagace du célèbre physicien Tyndall, à l'interprétation de la formation et du mouvement des glaciers, sur lesquels on avait, à cette époque, bien peu d'idées exactes ou seulement plausibles.

Les expériences au moyen desquelles le savant professeur de Royal Institution démontra que la glace, cette substance presque dépourvue de plasticité dans le sens généralement attribué à ce mot ⁽¹⁾, pouvait, à cause du regel, se mouler dans les formes les plus variées, sont trop connues pour qu'il puisse en être question ici. Il en est de même de celles que MM. Tresca ⁽²⁾, Helmholtz ⁽³⁾ et Bottomley ⁽⁴⁾ ont fait connaître de leur côté. Je n'examinerai ici que les explications que l'on a données de ces faits, et je serai ainsi amené à montrer que, de l'avis même de Helmholtz et de Tyndall, nous ne sommes pas encore en possession d'une solution satisfaisante de la question.

Faraday considéra le phénomène du regel comme une

⁽¹⁾ M. Pfaff (*Ann. von Poggendorff*, t. CLV, 1875, p. 169), a montré, en effet, que la glace n'est pas absolument dépourvue de plasticité à la température de 0°, mais cette faible plasticité diminue beaucoup quand la température baisse. Ainsi un cylindre en fer de 11^{mm}, 5 de diamètre et de 1^{mm}, 7 d'épaisseur s'enfonça de 1^{mm}, 25 en douze heures dans la glace sous une pression de 2^{atm} à une température de -4° à -1° et seulement de 1^{mm} en cinq jours sous 5^{atm} à la température de -12° à -6°.

Avant M. Pfaff, M. Reusch (*id.*, t. CXXV, p. 304) et M. Kane étaient aussi parvenus à déformer, d'une manière permanente, des lamelles de glace en les chargeant de poids. Voir aussi REUSCH, *Elasticitäts modulus des Eises* (*Annalen von Wiedemann*, t. IX, p. 329).

⁽²⁾ TRESCA, *Sur l'écoulement des solides*. Paris, 1872.

⁽³⁾ HELMHOLTZ, *Populäre wissenschaftliche Vorträge; Eis und Gletscher*, p. 95 à 129. Braunschweig, 1865.

⁽⁴⁾ BOTTOMLEY, *Nature*, 4 January 1872.

propriété étrange appartenant en propre à la glace. Il admettait que l'intérieur d'un fragment de glace avait un point de fusion plus élevé que la surface et que, si deux morceaux de glace étaient mis en contact, l'eau de la surface de contact, se trouvant alors au milieu, devait se congeler et souder les deux fragments.

Forbes (1) et d'autres encore supposèrent que la glace présentait, avant de fondre, un certain degré de mollesse, et que, dans cet état, des fragments isolés pouvaient se souder, comme le fait, par exemple, le fer à une température élevée.

La première explication scientifique qui a été donnée du phénomène du regel est due à James Thomson (2), qui a déduit du principe de Carnot les équations relatives à la fusion des corps. Le second principe de la Théorie mécanique de la chaleur permet de simplifier, dans leur forme, l'expression des idées de Thomson. C'est ce qu'a montré Clausius. En effet, ce principe conduit à l'équation suivante, qui exprime la relation existant entre la pression et la température de fusion d'un corps (3),

$$\frac{\zeta}{T} = \frac{s - \sigma}{J} \frac{dp}{dT},$$

ζ étant la chaleur latente de fusion, σ le volume spécifique du corps solide, s le volume spécifique du corps liquide, $\frac{dT}{dp}$ le coefficient différentiel partiel de la pression, par rapport à la température, sous volume constant, et J l'équivalent mécanique de la chaleur.

(1) FORBES, *Philosophical Magazine*, 4^e série, t. XVI, p. 544.

(2) JAMES THOMSON, *Theoretical considerations regarding the effect of pressure in lowering the freezing point of water*. (Edinburgh, *Transactions*, t. XVI, 1849, p. 5).

(3) *Handbuch der mechanischen Wärmetheorie von Rühlmann*, t. I, p. 653. Braunschweig, 1876.

On peut écrire

$$(s - \sigma) \frac{dp}{dT} = \frac{J\zeta}{T}.$$

Or le second membre de cette équation est positif pour tous les corps, car ζ n'est jamais négatif; donc le premier membre de l'équation doit être aussi positif, et il faut que $(- \sigma)$ et $\frac{dp}{dT}$ soient toujours de même signe.

Il résulte de là que pour tous les corps qui ont un volume spécifique plus grand à l'état liquide qu'à l'état solide $\frac{dT}{dp}$ devra être positif. Cela nous apprend que, si l'on augmente la pression supportée par un corps fusible, son point de fusion s'élèvera.

C'est le cas général qui a été vérifié expérimentalement par Bunsen (1); mais on connaît jusqu'à présent deux corps qui font exception à cette règle: l'eau et le bismuth. Le volume spécifique de ces corps étant plus grand lorsqu'ils se trouvent à l'état solide qu'à l'état liquide, il en résulte que la pression abaissera leur point de fusion au lieu de l'élever. La glace, par exemple, a pour point de fusion 0° sous la pression atmosphérique; mais, si la pression que supporte un bloc de glace grandit, le point de fusion se trouvera sous 0°, et, comme la quantité de chaleur de la glace ne change pas dans ces conditions, il y aura fusion: l'eau de fusion aura une température inférieure à 0°.

Ces conséquences théoriques ont été vérifiées expérimentalement, en premier lieu par William Thomson (2), qui montra que, sous des pressions de 8^{atm}, 1 et 16^{atm}, 8, de la glace mélangée à de l'eau fondait, et que la température s'abaissait respectivement de 0°, 059 et 0°, 129. On déduit de ces résultats que, par atmosphère de pression, le

(1) *Ann. von Poggendorff*, t. LXXXI, p. 562.

(2) *Philosophical Magazine*, 3^e série, t. XXXVII, p. 123.

point de fusion de la glace baisse de $0^{\circ},0075$ ou

$$\frac{dT}{dp} = -0,0075.$$

Ensuite Mousson ⁽¹⁾ a soumis, de son côté, de la glace à une pression de 13 000^{atm} et il a pu la liquéfier complètement sans qu'elle reçût cependant de la chaleur de l'extérieur.

Ces résultats acquis, il n'est plus difficile de se rendre compte d'une manière satisfaisante, en apparence du moins, du phénomène du regel, et par conséquent de la plasticité de la glace.

« En effet, lorsqu'on presse l'un contre l'autre deux morceaux de glace, dit James Thomson, ou bien si l'on pose seulement un morceau sur l'autre, les parties comprimées deviendront liquides. L'eau qui s'est formée de cette façon a rendu latente une partie de la chaleur de la glace, et sa température doit être inférieure à 0° . Si la pression cesse, l'eau se congèlera de nouveau et soudera les morceaux de glace. »

On le voit, cette interprétation paraît rendre très facilement compte du phénomène du regel; Helmholtz la regarde même comme la plus satisfaisante qu'on ait donnée. Cependant, si l'on prend en considération, comme Faraday l'avait déjà fait, qu'il suffit d'une *pression presque nulle* pour amener le regel de la glace, on doit forcément se rendre à l'avis de Tyndall, qui, de concert avec Faraday et Forbes, a toujours pensé que l'interprétation de James Thomson était insuffisante.

Il me sera permis d'indiquer, en peu de mots, les motifs les plus évidents qui ont déterminé Tyndall à penser de la

sorte : ils se trouvent développés dans son intéressant Ouvrage *In den Alpen* ⁽¹⁾.

Dans l'explication de Thomson, la raison essentielle du regel se trouve dans le fait que l'eau provenant de la fusion de la glace par la pression a une température inférieure à 0° , et qu'elle doit se solidifier dès que sa pression diminue. Il en résulte que, si l'on enlevait cette eau à mesure qu'elle se forme ou si on l'échauffait, ne fût-ce que faiblement, le regel ne pourrait plus se produire.

Tyndall, pour vérifier expérimentalement cette conséquence, a pressé l'un contre l'autre deux petits morceaux de glace sous l'eau chaude. Dans ces conditions, l'eau de fusion devait s'écouler dans l'eau chaude; elle était à la fois enlevée et chauffée. Néanmoins le regel eut lieu. Il plaça ensuite deux morceaux de glace dans une capsule contenant de l'eau chaude et les amena au contact le plus légèrement possible : dès qu'ils se touchèrent, la liaison eut lieu. Les parties de la glace qui se trouvaient dans le voisinage du lieu de contact fondirent rapidement, mais les deux morceaux demeurèrent unis, pendant un certain temps, par un petit pont de glace. Ce pont fondit à son tour et les morceaux se trouvèrent séparés pour un instant; ils se rapprochèrent ensuite par l'action capillaire de l'eau et le regel se fit de nouveau. Ces phénomènes se succédant d'une manière continue, les morceaux de glace furent animés d'une sorte de mouvement de trépidation jusqu'à ce qu'ils fussent entièrement fondus.

Il est clair que la théorie de Thomson ne peut s'appliquer aux expériences de Tyndall, puisqu'elle nécessite que les fragments de glace soient *pressés* pour qu'ils puissent prélever sur eux-mêmes la quantité de chaleur nécessaire à la fusion de l'eau; cette eau doit s'échapper, puis se congeler; or elle se trouvait noyée dans l'eau chaude, et cepen-

⁽¹⁾ MOUSSON, *Einige Tatsachen betreffend das Schmelzen und Gefrieren des Wassers* (Ann. von Poggendorff, t. CV, p. 161).

⁽¹⁾ Traduction de M. G. Wiedemann. Braunschweig, 1875.

dant le regel eut lieu. Tyndall pense pour cela que la cause physique du regel n'est pas encore connue.

Une chose encore paraît difficile à comprendre dans la théorie de Thomson : c'est pourquoi, lorsque l'on presse deux morceaux de glace l'un contre l'autre, seule la couche qui forme le contact entre les morceaux fond. Le corps des fragments de glace, transmettant la pression, est comprimé lui-même, et il faut, dès lors, qu'il y ait fusion jusqu'à ce que la quantité de chaleur devenue latente corresponde à la pression exercée. Il n'y a pas de motif évident pour que l'eau de fusion ne soit pas répartie uniformément dans la masse de glace et ne lui donne un certain degré de mollesse qu'on est loin de constater.

On a aussi essayé d'expliquer le phénomène du regel par d'autres considérations.

Pfaundler (¹), par exemple, a fait connaître à l'Académie de Vienne, en 1869, une théorie qui interprète le phénomène du regel non seulement dans les cas où il n'y a pas de pression, mais même lorsqu'il n'y a pas de contact immédiat entre les fragments de glace. Voici, en résumé, les idées de ce savant.

Pfaundler admet, conformément aux conséquences de la théorie de Clausius sur la nature de la chaleur, que les molécules d'un liquide sont animées de mouvements divers, parmi lesquels il faut distinguer le *mouvement de translation des molécules* et le *mouvement des parties constituant ces molécules*. La somme de la force vive de ces deux mouvements doit être constante pour une quantité de chaleur donnée. Comme les molécules considérées isolément peuvent se mouvoir d'une manière très différente, il s'ensuit qu'une égalité parfaite de la température dans toute la masse d'un corps ne peut pas exister. Ainsi, dans un bloc de glace que nous disons être à 0°, il y a des parties,

(¹) *Der Naturforscher*, t. II, p. 371; 1869.

très petites, où la température est plus élevée, d'autres où elle est plus basse, et ces variations de température se transportent, d'une manière continue, par toute la glace ; en d'autres termes, dans un bloc de glace à 0°, il y a d'une manière permanente de la glace en fusion et de l'eau en congélation.

Il s'agit, comme on le voit, de l'application à un corps solide d'une partie des idées que Clausius a développées dans sa célèbre théorie des gaz.

On conçoit facilement, si l'on admet l'hypothèse de Pfaundler, qu'un morceau de glace, se trouvant dans de l'eau à 0°, devra échanger perpétuellement de sa propre substance contre celle de l'eau ; c'est-à-dire que, par suite des inégalités de température qui se produisent dans toute la masse, certains endroits de la glace seront frappés de fusion et d'autres, par compensation, recevront de nouvelles couches de glace formées aux dépens de l'eau. Si deux blocs différents se touchent, il est clair qu'ils devront finir par se souder et que, si même le contact n'est pas parfait, la croissance de la glace dans chaque morceau devra finir par l'amener.

Cette théorie, très ingénieuse, a le grand avantage de s'adapter entièrement à la manière de voir moderne sur la constitution de la matière ; elle n'en est même que la conséquence : aussi est-elle loin d'avoir été stérile, et nous la retrouvons aujourd'hui dans l'interprétation d'un grand nombre de phénomènes d'ordre différent de celui qui nous occupe.

D'un autre côté, Rühlmann (¹) fait valoir les considérations suivantes dans la question du regel : « Puisque l'eau se dilate par la congélation, dit-il, les cristaux de glace, obligés de se former entre d'autres déjà existants, exerceront une certaine pression sur ceux-ci et réciproquement.

(¹) RÜHLMANN, *Mechanische Wärmetheorie*, t. I, p. 666.

La cohésion de la glace ne cédant pas entièrement à cette pression, il en résulte que le centre du bloc de glace devra être comprimé et avoir, dès lors, un point de fusion un peu inférieur à celui de la surface. Les choses étant telles, si deux morceaux de glace arrivent au contact, même sans aucune pression, les portions d'eau qui se trouvent sur les surfaces de contact gagneront, par conductibilité, la température des portions de glace comprimées, se congèleront et détermineront ainsi la réunion des deux fragments.

Je signalerai encore que Carl Schultz⁽¹⁾ pense que la présence de l'air atmosphérique n'est pas étrangère au phénomène du regel. Les expériences qu'il a faites lui ont appris, en effet, que l'eau qui tient un gaz en solution se congèle à une température un peu plus basse que l'eau privée de gaz. D'après cela, de la glace pure ne peut conserver sa température de 0° que dans l'eau pure; pendant le dégel lent à l'air ou dans de l'eau aérée, sa température sera plus basse. Une couche d'eau pure ou d'eau non saturée d'air, qui se trouverait entre des morceaux de glace se touchant, peut donc se congeler si la glace est aérée.

Ces conditions sont souvent réalisées, à la vérité, mais il est hors de doute que des morceaux de glace provenant d'eau non aérée subissent le regel à l'abri du contact de l'air ou d'un autre gaz (Faraday).

Enfin, C.-G. Jungk⁽²⁾, qui a étudié, comme on sait, l'influence de la capillarité sur le point de fusion de la glace, croit, de son côté, que la condensation qu'éprouve l'eau au contact de la glace peut servir à rendre compte, d'une manière satisfaisante, du phénomène du regel. Il est clair qu'ici aussi la cause invoquée n'est pas assez en rap-

(1) *Ueber den Gefrierpunkt des Wassers aus wässrigen Gasauflösungen und die Regelation des Eises* (Ann. von Poggendorff, t. CXXXVII, p. 252.)

(2) *Ueber die Regelation* (Ann. von Poggendorff, t. III, p. 647).

port avec l'effet produit pour que l'on puisse la prendre en considération sans que des expériences positives en aient montré la valeur.

Les théories si diverses que je viens de résumer aussi brièvement que possible suffisent à montrer, je pense, que les physiciens qui se sont occupés de la question du regel de la glace sont loin de lui avoir donné une solution qui soit à l'abri de toute critique.

Si l'on quitte le terrain particulier sur lequel on s'est trouvé jusqu'à présent et si l'on se demande, comme Faraday l'a fait⁽¹⁾, si d'autres corps, jouissant d'ailleurs, comme l'eau, de la propriété d'être plus denses à l'état liquide qu'à l'état solide, ne présenteraient pas également le phénomène du regel, les difficultés augmentent encore, et l'on apprend bientôt que même l'explication si plausible de Helmholtz et de Thomson doit être écartée, le phéno-

(1) Je ne mentionnerai pas que Faraday a obtenu un résultat à peu près semblable avec l'azotate de potassium chauffé à la température de fusion. Il pensait, en effet, que ce corps avait aussi une densité plus faible à l'état solide qu'à l'état liquide, mais c'est là une erreur, comme j'ai pu le constater.

Si l'on fond l'azotate de potassium dans un vase étroit, un tube à réaction par exemple, on observe que pendant la solidification la matière se dilate de près d'un sixième de son volume : il sort du centre de la substance de l'azotate encore liquide, comme s'il était exprimé par les cristaux qui se forment sous lui. Si l'on place cette masse d'azotate sur une portion fondue, elle surnage; cela pourrait faire croire à une densité plus faible du sel solide, mais il n'en est rien.

Quand on examine les fragments d'une masse d'azotate qui a été fondue une première fois, on remarque qu'elle présente des cavités. Après une première fusion elle se dilate déjà moins par la solidification, et après cinq ou six fusions la dilatation fait place à une contraction. *Le sel tombe alors au fond d'une portion fondue.*

La dilatation apparente de ce corps provient de ce que le sel cristallisé qui vient d'être fondu renferme ou donne naissance à des gaz qui restent dissous dans le bain fondu et qui *rochent* pendant la solidification. On connaît plusieurs cas semblables. Je n'ai pas fait l'examen, jusqu'à ce jour, de la nature de ce gaz; je me propose de le faire ultérieurement.

Je signalerai encore que l'azotate de potassium est malléable quand sa température dépasse 100°.

mène du regel n'appartenant pas en propre aux substances de cette catégorie.

Faraday a expérimenté en effet avec le bismuth, corps qui, comme l'eau, se contracte pendant la fusion ; mais il n'a obtenu que des résultats négatifs. En mélangeant au moyen d'un morceau de bois des fragments de métal flottant sur un bain ayant une température à laquelle le bismuth peut exister aussi bien à l'état fondu qu'à l'état solide, il put facilement briser les grains cristallins formés ; mais, lorsqu'il les pressait sous la surface du bain, il ne put jamais constater la moindre tendance à la cohésion. Il a soumis aussi à ses investigations de l'acide acétique cristallisé et divers sels dans leurs solutions saturées, tels que les azotates de plomb, de sodium, de potassium, les sulfates de sodium, de magnésium, de cuivre et de zinc, l'alun, le borax, le chlorure d'ammonium, etc., etc. ; mais toujours le résultat fut négatif.

On doit conclure de ce qui précède que le phénomène du regel est spécial à l'eau. Il est cependant difficile de croire que, dans ce nombre considérable de corps que la nature nous présente, il en existe un seul jouissant de propriétés dont on ne trouverait rien chez d'autres, ne fût-ce qu'un léger vestige. L'ensemble de nos connaissances physiques et chimiques a fait naître la conviction qu'une propriété quelconque se manifeste à des degrés divers chez des corps appartenant à une même classe, qu'elle est peu prononcée chez les uns, qu'elle est mieux accusée chez d'autres et qu'enfin elle paraît avoir achevé son évolution dans certains corps particuliers. C'est ainsi que le phénomène du regel pourrait bien être le mieux accusé dans la glace, sans faire défaut, cependant, à d'autres corps. Pour s'en assurer, il suffit d'exalter chez les corps les conditions dans lesquelles le phénomène peut se produire. Quelles sont ces conditions ? On vient de le voir : *la pression supportée par le corps, un certain degré de température et*

enfin *le temps*. Helmholtz et Tyndall ont montré en effet que, chaque fois que la pression était faible, le regel de la glace se faisait *lentement*.

Avant d'aller plus loin, j'invoquerai déjà des faits connus à l'appui de ce que je viens de dire. On sait, dans les laboratoires de Chimie, que l'azotate de sodium, pur et sec, versé en poudre, même grossière, dans un bocal, se prend en une masse qui est d'autant plus cohérente qu'on a abandonné le sel plus longtemps à lui-même ; le phosphate secondaire de sodium se comporte d'une manière plus nette encore, et la liste des corps chez lesquels on retrouve cette propriété à un degré plus ou moins fort est longue. A quoi est due cette cohésion, sinon à un commencement d'union entre les particules des corps ? On objectera que cette cohésion n'est jamais très considérable. Est-il besoin de répondre que le nombre de points de contact possible dans une poudre abandonnée à elle-même ne peut pas l'être non plus et que, si l'on pouvait augmenter ces derniers, on parviendrait à changer cette cohésion en une union intime ?

Or, pour augmenter le nombre de points de contact d'une poudre d'un corps, il suffit de la soumettre à une pression assez forte pour que tous les espaces compris entre les fragments des corps soient comblés par les débris de ceux-ci. C'est là précisément ce que j'ai réalisé et ce sont les résultats obtenus que je désire faire connaître par les quelques pages suivantes. Je n'ignore pas que l'on a tenté de réunir de cette manière des fragments de verre et des fragments de quartz (¹) ; on a échoué. A mon tour, j'ai échoué en partie pour ces substances, mais on verra, par l'ensemble des résultats obtenus, que la non-réussite n'a pas une cause

(¹) Voir RÜHLMANN, *Handbuch der mechanischen Wärmetheorie*, t. I, p. 664.

essentielle, mais qu'elle dépend seulement de ce qu'on ne peut construire un compresseur ni assez rigide ni assez solide pour atteindre la pression sous laquelle le verre et le quartz se soudent.

La liaison des poudres des corps solides sous l'influence de la pression, c'est-à-dire d'un rapprochement des particules, peut être comparée, d'un autre côté, à la liquéfaction des gaz par la pression. A première vue, cette comparaison peut paraître téméraire, mais il n'en est rien si l'on accepte les idées de Clausius sur la nature des gaz et des liquides.

On le sait, d'après cet illustre physicien, dans l'état gazeux les molécules matérielles sont parfaitement indépendantes l'une de l'autre; elles sont à des distances telles qu'il ne s'exerce plus aucune attraction entre elles et que chacune se meut librement, en ligne droite, jusqu'à ce qu'un obstacle l'oblige à briser sa trajectoire et à changer sa vitesse. En réalité, les gaz que nous connaissons ne remplissent pas tout à fait ces conditions, mais nous disons que l'état gazeux est d'autant plus parfait que le rapprochement de cet état idéal est plus grand. Si l'on diminue de force, à une température convenable, les distances des molécules des corps gazeux, on pourra arriver à les contraindre à se mouvoir dans les sphères d'action les unes des autres et en ce moment le corps passera de l'état gazeux à l'état liquide.

Mais, quand nous pulvérisons un corps, faisons-nous autre chose que séparer des molécules qui étaient unies? Ne les portons-nous pas hors de leurs sphères d'action? Il est évident que dans une pulvérisation mécanique, c'est-à-dire réelle, ce sont des monceaux de molécules que nous détachons d'autres monceaux. Il n'importe. C'est là simplement une imperfection mécanique de laquelle on ne peut rien arguer quant au principe, et nous devons nous

rendre à cette considération que si nos moyens nous le permettaient, nous pourrions gazéifier un corps par la pulvérisation.

Ceci admis, il devient à peine nécessaire de faire remarquer que, si nous plaçons de nouveau ces amas de molécules dans leurs sphères d'action, elles se lieront et que, de cette manière, un paquet de poudre pourra devenir un bloc solide.

Ce qui montre, d'ailleurs, que cette proposition ne manque pas de fondement, c'est que l'on sait déjà, par expérience, qu'un mélange de poussière de houille et d'air atmosphérique détone comme un mélange de grisou et d'air à l'approche d'un corps enflammé. On a signalé aussi, chose plus curieuse certainement, des explosions de moulins à farine, dues à l'inflammation d'un mélange de farine et d'air⁽¹⁾.

RÉSULTATS OBTENUS.

Je passe maintenant à la relation des résultats obtenus en soumettant à une pression plus ou moins forte des substances diverses. Celles-ci, au nombre de quatre-vingt-trois, se divisent comme il suit :

1. Métaux	8
2. Métalloïdes	6
3. Oxydes et sulfures	10
4. Sels	32
5. Corps carbonés	19
6. Mélanges différents, au nombre de huit, comprimés en vue de vérifier l'action de la pression sur la combinaison des corps.	

J'en n'ai pas comprimé toutes les substances avec lesquelles j'ai expérimenté, à haute température; celles qui m'ont donné de bons résultats à la température ordinaire

(¹) Voir *Ann. de Chim. et de Phys.*, 3^e série, t. XIV, p. 144.

n'ont été comprimées qu'au moyen du premier appareil. On verra, du reste, que pour plusieurs corps une élévation de température est de moindre influence qu'on aurait pu le supposer.

I. — MÉTAUX.

Ils sont rangés suivant la facilité avec laquelle ils se soudent et ont été essayés, excepté le zinc, à la température de 14°.

1. *Plomb*. — De la limaille de plomb, comprimée dans le vide, sous une pression de 2000^{atm} environ, se prend en une masse compacte dans laquelle il est impossible de retrouver le moindre vestige des grains de limaille, même à l'examen microscopique. La limaille de plomb se soude en un seul bloc, identique à un bloc obtenu par fusion.

Sous une pression de 5000^{atm}, le plomb ne résiste plus à la poussée du piston de l'appareil. Il fuit, comme s'il était liquide, dans toutes les fentes de l'appareil, et le piston est pressé jusqu'au fond du cylindre. Quand on ouvre l'appareil, on trouve partout des lamelles minces de plomb qui ont exactement l'aspect de celles qu'on obtient par le laminage.

Le poids spécifique du plomb soudé sous pression a été trouvé égal à 11,5013 au lieu de 11,3.

J'appelle dès maintenant l'attention sur ce fait que le plomb ne résiste pas à une pression de 5000^{atm}, non seulement parce qu'on trouvera souvent par la suite des faits semblables, mais surtout parce qu'il y a là une confirmation des expériences de M. Tresca sur l'écoulement des solides.

2. *Bismuth*. — Le bismuth est un métal très cassant : il est facile de le pulvériser ; nonobstant cela, il se soude sous pression avec facilité.

De la poudre fine de bismuth, soumise à une pression de 6000^{atm}, se prend en un bloc identique à ceux obtenus

par fusion. Quand on casse ce bloc au marteau, on trouve la cassure cristalline comme celle du métal qui a été fondu. Ce fait remarquable ne se produit pas seulement chez le bismuth ; nous le rencontrerons chez presque tous les corps qui se soudent sous pression et nous examinerons les conséquences qu'on peut en tirer.

La densité du bismuth comprimé est 9,8935 au lieu de 9,9 ; elle est donc identique.

3. *Étain*. — La liaison de la limaille d'étain est tout aussi parfaite que celle de la limaille de plomb ou de la poudre de bismuth sous une pression de 3000^{atm}. A 5000^{atm} l'étain commence à couler par les joints de la matrice, mais cet écoulement s'arrête bientôt ; il reprend sous une pression de 5500^{atm}, s'arrête de nouveau, reprend sous une charge plus forte et ainsi de suite jusque 7500^{atm} où la coulée est continue.

4. *Zinc*. — La limaille de zinc se soude complètement sous 5000^{atm} ; le bloc commence à peine à couler sous 7000^{atm}.

La liaison de la limaille de zinc est intéressante à observer de plus près, parce que, se faisant avec assez de peine, on peut voir facilement qu'elle ne dépend, en somme, que du contact intime des particules. Ce que révèle l'examen des blocs de zinc s'applique, d'ailleurs, à tous les corps sans aucune exception.

Quand on presse de la limaille de zinc sous 2600^{atm} seulement, les grains ne se soudent pas. Sous une pression de 700^{atm} il y a un commencement de liaison ; on peut retirer un bloc du compresseur, mais il se laisse casser très facilement et tombe alors en poussière. Quand on le regarde au microscope sous un grossissement de 50 diamètres seulement, on voit très distinctement l'existence de vides entre les grains de limaille ; ceux-ci ne se touchent que par quelques points. Sous 2000^{atm} l'union est telle, qu'on peut limer le bloc ; mais, quand on le martèle,

il se brise. La cassure, vue au microscope, présente encore des espaces vides entre les grains de limaille, en nombre bien moins considérable cependant; de plus, on distingue très nettement des grains qui se sont entièrement soudés. Sous 400^{atm} les vides ont disparu davantage encore; il n'en reste que de très rares, qu'on a souvent de la peine à découvrir, et enfin, sous 5000^{atm} , la continuité est parfaite dans le bloc; aussi peut-on le pincer fortement dans un étau, le limier, le marteler comme un bloc obtenu par fusion.

J'ai comprimé ensuite de la poudre de zinc à la température de 130° environ, température à laquelle ce métal est le plus malléable. La poudre se soude mieux encore: le bloc a une *cassure cristalline*.

5. *Aluminium*. — Sous une pression de 4000^{atm} , la liaison de la limaille est encore faible: on ne peut limier le bloc obtenu sans arracher les grains de limaille primitifs. Sous 5000^{atm} le bloc peut être limé, mais il est encore cassant au marteau. 6000^{atm} de pression rendent la liaison parfaite; l'aluminium commence à être plastique. Le poids spécifique du bloc est de 2,5615, c'est-à-dire égal à celui d'un bloc fondu.

6. *Cuivre*. — Le cuivre en limaille se comporte comme l'aluminium.

7. *Antimoine*. — J'ai comprimé de la poudre d'antimoine aussi fine que possible et non de la limaille, parce que, l'antimoine en poudre fine étant tout à fait dépourvu d'éclat métallique, il devenait intéressant de savoir à quel moment cet éclat reparaitrait.

L'antimoine se soude plus difficilement que le cuivre ou l'aluminium. Sous une pression de 5000^{atm} , la surface du bloc obtenu reprend l'éclat métallique, mais le centre reste pulvérulent et gris mat. En variant la pression à partir de 5000^{atm} , on peut suivre les progrès de la liaison; l'éclat métallique, qui paraît d'abord à la surface, gagne de

plus en plus la profondeur, ce qui est naturel, puisque dans le milieu de la poudre il y a plus de force perdue qu'à la surface.

8. *Platine*. — Enfin j'ai soumis à la pression de la mousse de platine. Sous 5000^{atm} il y a un commencement de liaison; la surface du bloc obtenu a l'éclat métallique, mais le bloc lui-même est encore friable, la cassure terne. Je ne suis pas parvenu, à l'aide de pressions plus élevées, à obtenir une liaison aussi parfaite qu'avec les métaux précédents.

Si l'on récapitule les résultats obtenus, on remarque que les métaux ont la faculté de se souder sous pression, mais que cette faculté est variable d'une espèce à l'autre; elle est très développée chez le plomb et, sous pression égale, se manifeste faiblement chez le platine. Si l'on se demande avec quelle propriété physique cette faculté est en rapport, il saute aux yeux qu'elle est en relation inverse avec la *dureté*; l'ordre des métaux précédents est précisément celui de leur dureté.

Cela étant, on peut généraliser ce résultat et dire que des métaux plus mous que le plomb, tels que le sodium ou le potassium, se souderont sous une pression plus faible que le plomb, et que des fragments de métaux plus durs que le platine ne se souderont que sous des pressions plus considérables. La dureté d'un corps allant en général en diminuant quand sa température grandit, nous pourrions conclure que les métaux se souderont d'autant plus facilement à des températures élevées qu'ils deviendront plus mous. Ainsi le fer, qui se ramollit fortement avant de fondre, se soude avec facilité.

Il est à peine nécessaire d'ajouter que l'on ne pourra pas, en pratique, souder par la pression de la poudre d'acier ou de la poudre de corps plus durs encore, parce que, pour réussir, il faut que la matière qui sert à la construction

de la matrice soit plus dure que le corps à souder, sinon elle serait pénétrée par celle-ci. D'un autre côté, de ce résultat, *négalif a priori*, on ne peut pas conclure que l'acier n'ait pas la faculté de se souder sous pression, pas plus qu'on ne peut conclure de ce que l'on n'a pas encore fondu l'osmium que ce métal soit infusible.

II. — MÉTALLOÏDES.

1. *Soufre*. — Le soufre se présentant sous trois états allotropiques différents, j'ai essayé successivement ces trois variétés.

1° *Du soufre prismatique* transparent, fraîchement préparé, a été soumis à une pression de 5000^{atm} à la température de 13°; il s'est moulé en un bloc opaque, beaucoup plus dur que ceux qu'on obtient par fusion. Examiné au microscope dans la cassure, il s'est montré identique au soufre octaédrique. Il y avait lieu de soupçonner la transformation de la variété prismatique en variété octaédrique.

Pour m'assurer de la chose, j'ai déterminé le point de fusion d'un fragment du bloc de soufre formé et je l'ai trouvé à 115°: or le soufre prismatique fond, comme on sait, à 120°, et le soufre octaédrique de 111° à 114°. La densité du bloc était d'ailleurs de 2,0156 au lieu de 2,05, qui est celle du soufre octaédrique; le soufre prismatique a une densité de 1,96. Ces faits s'accordent pour témoigner de la transformation du soufre prismatique en soufre octaédrique.

2° *Soufre plastique*. — Du soufre plastique, fraîchement préparé, supporte sans modification *immédiate* une pression de 3000^{atm}; mais une pression de 6000^{atm} le change en quelques instants en soufre octaédrique. Ce changement commence à s'effectuer sous 5000^{atm}; la surface du bloc se

couvre alors d'une croûte cassante de soufre octaédrique, tandis que l'intérieur reste plastique.

Ainsi, si l'on oblige, par un effort mécanique, le soufre prismatique ou le soufre plastique à prendre la densité plus grande du soufre octaédrique, le soufre prend l'état allotropique qui correspond à la plus grande densité. Ce fait n'est pas isolé: nous le rencontrerons par la suite sous une forme variée.

3° *Soufre octaédrique*. — Ce soufre se soude sous pression avec grande facilité; il suffit d'une pression de 3000^{atm} pour obtenir des blocs irréprochables.

2. *Phosphore amorphe*. — Le phosphore rouge qui a servi a été lavé, au préalable, à l'alcool et à l'eau, puis séché à 120°.

Sous une pression de 6000^{atm} la poudre ne se soude presque pas dans l'intérieur du bloc, elle s'agglomère seulement; mais il en est autrement de la surface et surtout des endroits où il y a eu glissement ou bien laminage du phosphore entre le piston et le cylindre de l'appareil. Là, le phosphore a pris, d'une manière complète, un *éclat métallique gris d'acier*, et il est compacte. Cette pellicule métallique était trop mince pour que l'on pût s'assurer si elle était bien formée de phosphore de la variété métallique que l'on obtient en chauffant du phosphore amorphe, dans le vide, à une température de 500°, ou en dissolvant au rouge du phosphore dans du plomb et laissant cristalliser; mais elle en avait entièrement l'aspect.

Sous une pression plus forte, 10000^{atm}, les phénomènes précédents ont été mieux accusés, mais ils n'ont pas changé de caractère.

S'il est permis de tirer une conclusion du fait précédent, il paraîtrait que le phosphore amorphe se changerait, sous pression suffisante, en phosphore métallique qui est cristallin, comme on sait, et d'une densité plus grande que le

phosphore amorphe⁽¹⁾; en un mot, on serait en présence d'un phénomène du même ordre que celui que le soufre a permis de constater.

3. *Carbone amorphe*. — Le carbone amorphe obtenu par la calcination en vase clos du sucre ne se soude absolument pas, même sous la plus forte pression que j'aie pu déterminer. Ce corps paraît doué d'une élasticité énorme. En effet, la matrice de l'appareil ayant été remplie de ce carbone en poudre jusqu'à une certaine hauteur, le piston a été enfoncé à la main d'abord, puis par l'action de la plus forte pression; lorsque l'appareil a été ouvert ensuite, j'ai retrouvé le carbone occupant le même volume dans la matrice que celui qu'il avait pris sous l'effort de la main, et les fragments n'accusaient aucune trace de liaison ni même d'agglomération.

4. *Graphite*. — Cette variété de carbone a donné des résultats différents. Sous une pression de 5500^{atm} déjà, le graphite en poudre se prend en un bloc qui présente la même solidité qu'un morceau de graphite naturel.

III. — OXYDES.

1. *Peroxyde de manganèse*. — Du peroxyde de manganèse pur, obtenu par réduction du permanganate de potassium séché et privé d'eau d'hydratation par l'action de la chaleur, a été soumis à une pression de 5000^{atm}. Il s'est formé un bloc d'une grande dureté, absolument noir, tandis que la poudre était brun foncé; la cassure de ce bloc était brillante, et, vue au microscope, elle se présentait avec un aspect cristallin identique à celui de la *pyrolucite naturelle*. J'ai montré ce produit, comme les

(1) Voir V. v. RICHTER, *Kurzes Lehrbuch der unorganischen Chemie*; Bonn, 1875, p. 120.

autres d'ailleurs, à un assez grand nombre de personnes compétentes, entre autres à mon collègue et ami M. L.-L. de Koninck, et toutes ont été de cet avis qu'il n'y avait aucune différence apparente entre le peroxyde de manganèse en bloc que j'avais obtenu et la *pyrolucite naturelle*.

Je ferai remarquer qu'ici encore le fait de la liaison de la poudre est accompagné de la cristallisation de la matière.

2. *Alumine*. — La substance employée a été obtenue par précipitation du sulfate d'aluminium par le carbonate d'ammonium, lavage et dessiccation à 140°.

Sous 5000^{atm}, cette matière se soude; elle devient *translucide* avec tendance à la *transparence*; elle acquiert un reflet bleuâtre et ressemble entièrement à l'espèce minérale connue sous le nom de *halloysite*, qui est un silicate hydraté d'aluminium.

Dans aucun cas les blocs d'alumine obtenus n'ont présenté une grande dureté; ils se laissaient facilement entailler au couteau: il paraît donc sans fondement de conclure que si la pression avait été plus forte l'alumine se serait changée en *corindon* ou en une variété analogue. Sous cette pression de 5000^{atm} elle coule déjà comme un liquide; je n'ai donc pu la soumettre à une pression plus forte.

3. *Oxyde jaune de mercure*. — Ce corps se soude difficilement sous l'action de la pression; 4000^{atm} laissent le centre de la masse pulvérulent, mais à la surface, et surtout où il y a eu glissement ou laminage, l'oxyde devient transparent et se soude. L'examen microscopique révèle que toute la surface du bloc est comme couverte d'un vernis jaune brunâtre transparent; on peut l'enlever en écailles. Toute cette surface était parsemée de fines gouttelettes de mercure, d'autre part le cylindre du compresseur était terni: il y a donc eu réaction chimique entre l'oxyde de mercure et le fer de l'appareil.

Une pression plus forte donne plus de vigueur aux phénomènes précédents.

4. *Oxyde rouge de mercure*. — Se comporte comme le précédent; la surface du bloc est, comme tantôt, transparente, jaune brunâtre.

5. *Silice*. — Ce corps donne un résultat nul. J'ai employé du sable fin et de la silice précipitée et séchée: sous les plus fortes pressions, il n'y a qu'un commencement de liaison.

Cet échec provient de la dureté trop grande de la silice: en effet, le cylindre d'acier du compresseur était *incrûsté de grains de sable* et fortement détérioré.

Il est clair que, si le cylindre n'offre pas la résistance nécessaire pour s'opposer à la fuite de la substance à comprimer, il devient impossible de lui faire supporter une pression suffisamment élevée.

IV. — SULFURES.

1. *Sulfure de zinc*. — Je me suis servi de sulfure de zinc amorphe obtenu par voie chimique.

Une pression de 5000^{atm} soude la poudre blanche amorphe de ce sulfure en une masse compacte, très dure et qui est intéressante à plus d'un point de vue. Ainsi toute la surface extérieure du bloc obtenu avait un commencement d'éclat métallique gris; l'intérieur, au contraire, avait un aspect saccharoïde et se composait d'un amas de fragments de cristaux parfaitement transparents: ils rappelaient tout à fait la blende naturelle.

2. *Sulfure de plomb*. — La poudre a été obtenue par précipitation chimique.

La poudre noire amorphe de cette substance se soude sous une pression de 6000^{atm} et cristallise. Le bloc obtenu possède, à sa surface, un éclat métallique parfait, identique à celui de la galène naturelle. Au microscope on ne saisit pas de différence entre ces corps.

La cassure du bloc est conchoïde, noire, mais elle présente des points cristallins assez nombreux, brillants, feuilletés comme la galène. Nous voyons donc ici également que les parties de la surface qui ont été mieux soutenues dans la matrice ont pris un éclat métallique plus continu; le centre est un mélange de cristaux et de sulfure de plomb amorphe.

3. *Sulfure d'arsenic*. — Obtenu aussi par précipitation chimique.

Ce corps cristallise, en se soudant, sous une pression de 6000^{atm}. La poudre amorphe jaune se change en une *masse compacte rougeâtre*, à cassure saccharoïde, dans laquelle on découvre, au microscope, des cristaux brisés de dimension relativement forte.

Le sulfure d'arsenic obtenu par précipitation n'est pas amorphe; on y découvre, au microscope, de très petits cristaux; ces cristaux paraissent s'être soudés en d'autres plus grands sous la pression à laquelle ils ont été soumis.

4 et 5. *Sulfure de mercure et sulfure de fer*. — Ces corps se soudent difficilement sous l'action de la pression; ils s'agglomèrent, mais la masse obtenue reste friable. On n'observe aucun changement physique après la compression, aucun vestige de cristallisation. L'agglomération est surtout imparfaite chez le sulfure de fer, qui a été fondu; ce corps est très dur et s'incrûste, sous pression, dans le cylindre de l'appareil.

V. — SELS.

a. CHLORURES, BROMURES, IODURES.

1. *Chlorure d'ammonium*. — De la poudre obtenue par sublimation s'est soudée d'une manière parfaite sous une pression de 4000^{atm}. Le bloc obtenu était comparable à de la gélatine sèche sous le rapport de la transparence. Il avait un aspect corné et présentait une grande dureté.

2. *Chlorure de potassium*. — Des fragments de ce corps se soudent avec facilité sous une pression de 5000^{atm} ; on obtient des blocs qui présentent des parties transparentes comme du verre.

3. *Chlorure de sodium*. — La liaison de ce corps est également facile et conduit à des blocs très translucides, parfaitement transparents sur les bords.

4. *Chlorure de plomb*. — Les petits cristaux de chlorure de plomb se soudent en un bloc très dur, opaque en masse, mais transparent comme du verre où il a subi un laminage.

5. *Chlorure mercurique* (Hg Cl^2). — Bloc opaque très dur.

6. *Bromure de potassium*. — Se comporte comme le chlorure de potassium; la liaison est parfaite, le bloc obtenu est transparent et sous une pression dépassant 5000^{atm} la substance s'écoule comme un liquide.

7. *Bromure de plomb*. — Identique au chlorure de plomb.

8. *Iodure de potassium*. — Ne diffère en rien du chlorure ou du bromure de potassium.

9. *Iodure de mercure* (Hg I^2). — Ce corps est le plus intéressant de cette série, parce qu'il montre, d'une façon saisissante, le rôle que joue le pouvoir de cristalliser dans la soudure des poudres.

L'iodure de mercure que j'ai employé a été obtenu par précipitation et lavé à froid; la poudre, rouge vif, était amorphe et ne présentait, vue au microscope, que de rares cristaux.

Sous une pression de 4000^{atm} déjà, elle se soude en un bloc dont la surface est transparente jusqu'à une faible épaisseur. La cassure du bloc scintille dans un rayon de lumière vive; elle a une couleur un peu violacée, et, au microscope, elle se présente comme un *amas de fragments de cristaux transparents*. Par places isolées, on trouve

encore de la poudre amorphe qui contraste avec les cristaux et dont la couleur moins violacée appelle l'attention.

Des fragments de blocs d'iodure de mercure ainsi formés ont été comprimés de nouveau: ils se sont soudés et l'on peut même dire *pétris*, comme s'ils avaient été pâteux (¹).

b. SULFATES.

10. *Sulfate de sodium cristallisé* ($\text{Na}^2\text{SO}^4, 10\text{H}^2\text{O}$). — Se soude avec grande facilité sous 3000^{atm} et ne supporte pas une pression de 5000^{atm} ; il s'écoule complètement sous cette charge.

11. *Sulfate de zinc cristallisé* ($\text{ZnSO}^4, 7\text{H}^2\text{O}$). — Se soude sous 5000^{atm} en un bloc très dur, d'une homogénéité parfaite, transparent sur les bords.

12. *Sulfate de cuivre cristallisé* ($\text{CuSO}^4, 5\text{H}^2\text{O}$). — On sait que ce sel, qui est bleu foncé quand il est en grands cristaux, est presque blanc en poudre fine. Le retour de cette couleur bleu foncé permet de saisir facilement le degré de liaison de la poudre.

Sous une pression de 3000^{atm} , il y a un commencement de liaison, la masse n'est bleue que sur les bords; à 4000^{atm} , elle est bleue partout, mais plus pâle, cependant, qu'un cristal de la même substance; enfin, à 6000^{atm} , la couleur bleue a entièrement reparu, et le bloc obtenu était transparent et plus dur qu'un cristal.

(Ce sulfate de cuivre réagit, quoique à l'état solide, avec le fer du compresseur: le cylindre était couvert, intérieurement, d'une légère pellicule de cuivre métallique.)

13. *Sulfate d'aluminium sec*. — Liaison imparfaite

(¹) Il eût été intéressant de comparer l'iodure rouge et l'iodure jaune.
(Note du Rédacteur.)

même sous 6000^{atm}; il ne se manifeste aucune tendance à la transparence.

14. *Alun ammoniacal*. — Semblable au précédent.

15. *Gypse*. — La liaison de la poudre de ce corps est aussi imparfaite; les blocs qu'on obtient sont durs, à la vérité, mais en les forant on les brise en morceaux.

16, 17 et 18. *Sulfate de zinc anhydre, sulfate de plomb et sulfate d'aluminium anhydre*. — La poudre d'aucun de ces trois sulfates ne se soude, même à la plus forte pression. Remarquons encore une fois que ces trois corps sont amorphes et qu'ils n'ont aucun, lorsqu'ils sont anhydres, un pouvoir de cristalliser bien prononcé.

A chaud, à la température de fusion de l'étain, la liaison a lieu: on obtient des blocs durs, dont la surface est couverte d'une couche transparente, épaisse pour le sulfate de plomb et faible pour les autres corps.

c. AZOTATES.

19. *Azotate de potassium*. — Comme je l'avais déjà constaté lors de mes expériences préliminaires, ce corps se soude avec facilité. Il suffit d'une pression de 2000^{atm} pour obtenir, au moyen d'une poudre, un bloc parfaitement homogène, translucide sur les bords. Sous une pression de 3000^{atm}, il devient plastique comme de la cire.

20. *Azotate de sodium*. — Semblable au précédent. Il en diffère seulement par une tendance moins marquée à la transparence.

d. CARBONATES.

21. *Carbonate de sodium sec amorphe*. — Ce sel s'agglomère sous une pression de 5500^{atm} et forme un bloc solide opaque dans lequel on trouve encore facilement les grains constituants.

22. *Carbonate de sodium cristallisé* ($\text{Na}^2\text{CO}_3, 10\text{H}^2\text{O}$). — Le sel cristallisé se soude avec facilité; on obtient des blocs transparents comme du verre par places. Sous une pression de 5500^{atm}, le sel s'écoule lentement.

23. *Carbonate de zinc précipité*. — Se soude en blocs durs opaques sous une pression de 7000^{atm}.

24. *Craie*. — Ce carbonate se lie sous une pression de 5000^{atm} en blocs qui ont la même consistance et la même dureté que les bâtons de craie qui servent à l'écriture; il ne devient jamais plastique.

25. *Spath d'Islande*. — Le spath d'Islande forme des blocs sous 6000^{atm}, mieux soudés, plus durs que les blocs de craie, mais la liaison est cependant imparfaite.

26. *Carbonate de plomb (précipité)*. — Résultat nul sous toute pression.

e. HYPOSULFITE.

27. *Hyposulfite de sodium*. — Ce sel se soude facilement. Sous une pression de 4000^{atm} on obtient des blocs transparents comme du verre, dans lesquels toute trace de fragments a par conséquent disparu. Sous une pression plus forte ce corps est plastique et coule comme un liquide.

f. PHOSPHATES.

28. *Phosphate de sodium* ($\text{Na}^2\text{HPO}_4, 10\text{H}^2\text{O}$) — Sous 5000^{atm} il se prend en un bloc qui a tous les caractères physiques du précédent.

29. *Phosphate d'aluminium précipité*. — 6000^{atm} de pression transforment la poudre de ce corps en une masse translucide, transparente sur les bords, très dure, à cassure porcelanique.

30. *Borax cristallisé*. — Ce corps se soude difficilement. Sous une pression de 7000^{atm} on obtient un bloc, dur à la

vérité, mais dans lequel la cassure passe entre les fragments soudés et non à travers ceux-ci.

31. *Borax fondu*. — Union presque nulle.

32. *Verre*. — Le verre est également trop dur pour se souder sous pression dans un appareil en acier. Les fragments de verre s'incrustent déjà dans le cylindre sous une pression de 6000^{atm}. Quand on ouvre l'appareil, le bloc en voie de formation se brise immédiatement.

VI. — CORPS CARBONÉS.

1. *Cire*. — Le résultat de la compression de fragments de cire était à prévoir ; aussi ai-je eu plutôt pour objet, en expérimentant avec cette substance, de connaître avec quelle facilité la liaison a lieu.

A une température de 13°, sous la pression minima de l'appareil, soit 260^{atm}, la liaison est déjà parfaite ; la plus forte pression que la cire puisse supporter à cette température est environ 500^{atm} ; sous 700^{atm}, elle s'écoule comme de l'eau.

2. *Paraffine*. — Ce corps se soude presque aussi facilement que la cire ; mais, chose assez curieuse, bien que la paraffine cède plus facilement, dans les conditions ordinaires, que la cire à un instrument tranchant et paraisse alors plus molle, elle supporte mieux la pression ; c'est ainsi qu'elle ne s'écoule que sous 2000^{atm}, et on peut l'obtenir en blocs plus transparents que ceux qui ont été fondus.

3. *Camphre*. — Des fragments de cristaux de camphre représentent la masse qui se soude le plus parfaitement sous l'action de la pression. On obtient déjà sous 3000^{atm} un bloc de camphre de la plus grande transparence, dans lequel n'existe même plus la moindre fissure.

4. *Gomme arabique*. — De la gomme arabique en poudre fine se soude, sous une pression de 5000^{atm}, en un bloc translucide dans lequel on ne peut trouver la trace

de grains. La cassure de ce bloc est identique à celle d'un morceau de gomme obtenu par évaporation de sa solution. Ce corps, qui est très cassant dans les conditions ordinaires, est plastique sous la pression de 5000^{atm} et reçoit avec la plus grande facilité l'empreinte d'objets durs.

5. *Amidon*. — Les résultats obtenus avec ce corps sont intéressants. Lorsque la pression a atteint 6000^{atm}, l'amidon se soude en un bloc d'une grande dureté et *transparent sur les bords*. A l'aide du microscope, on voit que toute la surface du bloc est d'une transparence parfaite jusqu'à une certaine profondeur. En enlevant cette pellicule et en l'examinant attentivement, il est impossible d'y trouver la trace de grains d'amidon, même avec un fort grossissement. On ne peut mieux comparer cette pellicule qu'à celle qui se forme quand on abandonne à l'évaporation une couche mince d'empois.

La cassure du bloc d'amidon est porcelanique, et les arêtes des fragments sont assez dures pour trancher la peau de la main.

J'ai comprimé ensuite de l'amidon humide sous 5000^{atm}. Il s'est produit un partage dans la masse. Toute l'eau a formé avec une partie de l'amidon de l'empois qui s'est écoulé du cylindre, et il est resté dans celui-ci de l'amidon sec. Quand l'amidon est assez humide pour former pâte, il fuit sous le piston de l'appareil et l'on ne peut le comprimer. En résumé, l'amidon perd sa texture organisée sous forte pression, et il forme à froid de l'empois avec l'eau.

6. *Ouate*. — Les résultats obtenus avec l'amidon m'ont engagé à comprimer de la cellulose. Celle-ci se comporte autrement que l'amidon : lorsque la ouate est sèche, il n'y a pas de liaison entre les fibrés, même sous une pression de 10000^{atm} ; quand elle est humide, au contraire, et qu'on la soumet à une pression de 6000^{atm}, elle perd complète-

ment sa texture organisée. Les longues fibres sont comme hachées en fragments imperceptibles. Au microscope, on reconnaît cependant la texture fibreuse des fragments.

Ce résultat est facile à interpréter; en effet, les fibres humides sont gonflées par l'eau, et, par la compression, les poches qui retiennent l'eau se déchirent, les fibres se coupent.

7. *Cire à cacheter.* — Se soude et se moule, sous une pression de 5000^{atm}, à la température de 16°, comme si elle était fondue.

8. *Colophane.* — Se soude plus difficilement; la trace de la réunion des fragments ne s'efface pas.

9. *Éosine.* — Cette substance colorante est fournie aujourd'hui par le commerce à l'état de poudre rouge; au microscope, on voit que les grains de cette poudre sont de petits cristaux.

Sous une pression de 4000^{atm} déjà, ces petits cristaux se soudent en un bloc de couleur verte chatoyante. Brisé, les surfaces de rupture montrent un mélange de parties vertes et de parties rouges. L'examen microscopique apprend que toutes les parties vertes sont des surfaces de cristaux et les parties rouges des fragments de cristaux.

L'éosine devient donc, par la pression, comme la fuchsine, verte par réflexion.

10 et 11. *Houille maigre et houille grasse.* — De la poudre fine de houille, grasse ou maigre, se soude sous une pression de 6000^{atm} en un bloc solide, brillant et qui, sous cette pression, se moule avec la plus grande facilité. Ainsi la houille, si cassante dans les conditions ordinaires, devient plastique sous une pression suffisante; cela peut servir à faire comprendre comment les plis de terrains anciens ont pu se faire.

12. *Tourbe.* — J'ai comprimé de la tourbe hollandaise de la province de Drente et de la tourbe belge des environs

de Spa. Ces deux variétés étaient de couleur brunâtre et présentaient encore beaucoup de matières à texture organisée.

Sous une pression de 6000^{atm} la tourbe se change en un bloc noir brillant, dur, ayant tout l'aspect physique de la houille; la cassure des bords de ces blocs présentait même, vue au microscope, l'allure feuilletée de la houille. La texture organisée avait complètement disparu. Enfin, sous cette pression de 6000^{atm}, la tourbe est plastique et s'écoule dans les fentes du compresseur.

La ressemblance physique de ce produit avec la houille était telle que toutes les personnes auxquelles je l'ai montré, sans les prévenir de l'origine, l'ont pris pour un fragment de houille.

J'ai chauffé des morceaux de ces blocs en vase clos et j'ai obtenu un coke gris, à éclat métallique imparfait, compacte, ne différant en rien du coke obtenu au moyen de la houille.

Ces résultats montrent, je crois, que la pression n'a pas dû être étrangère à la formation de la houille dans la nature. On se souvient que M. Fremy a présenté à l'Académie des Sciences de Paris un travail⁽¹⁾ dans lequel il a démontré que les principaux corps contenus dans les cellules des végétaux, soumis à la double influence d'une température de 200° à 300° et de la pression, produisent des substances qui présentent une grande analogie avec la houille.

D'après ce que je viens de faire connaître, une élévation de température est inutile pour changer la tourbe en houille, et il est infiniment probable même que la surface de la Terre n'a pas été soumise, depuis l'époque houillère, à une température de 200° à 300°. Du reste, M. Fremy pense lui-même que les végétaux, avant de devenir de la

(1) *Comptes rendus*, t. LXXXVIII, p. 1048.

houille, se seraient changés en tourbe, ce qui se fait sans grande élévation de la température. Le procédé de la formation de la houille pourrait donc avoir été celui-ci :

1° Changement des substances végétales en tourbe par la fermentation sous l'eau ;

2° Changement de la tourbe en houille sous l'action de la pression.

13. *Noir animal*. — Résultat négatif sous toute pression.

14. *Acide oxalique*. — Se soude facilement en un bloc présentant un commencement de transparence.

15. *Acide tartrique*. — Liaison moins parfaite que celle de l'acide oxalique.

16. *Sucre*. — Liaison imparfaite ; le bloc reste friable même lorsque la pression a été de 6000^{atm}.

17. *Acétate de potassium*. — Ce sel se soude parfaitement : les blocs obtenus sont très durs ; ils commencent à s'écouler sous la pression de 4000^{atm}.

18. *Ferrocyanure de potassium*. — Ce sel jaune est blanchâtre quand il est en poudre.

Il se soude, sous 5000^{atm}, en une masse très dure, jaunâtre, mais qui manque de transparence.

19. *Ferricyanure de potassium*. — Il se soude beaucoup plus difficilement que le précédent.

VII. — RÉACTIONS CHIMIQUES DÉTERMINÉES PAR LA PRESSION.

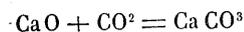
On sait que, si l'on compare la somme des volumes occupés par deux corps *avant* leur réaction chimique à la somme des volumes occupés *après* la réaction, on peut diviser les actions chimiques en deux classes bien distinctes : la première comprend les actions qui sont accompagnées d'une *augmentation* du volume occupé par les corps ; la seconde comprend celles qui sont accompagnées d'une *diminution* du volume des corps réagissants.

Ainsi l'action de l'acide sulfurique sur le carbonate de calcium appartient à la première classe



parce que la somme des volumes $\text{CaSO}^4 + \text{H}^2\text{O} + \text{CO}^2$ est plus grande que la somme des volumes $\text{CaCO}_3 + \text{H}^2\text{SO}^4$ (la pression restant la même, bien entendu).

D'autre part, la réaction



appartient à la seconde classe.

L'influence de la pression sur les réactions de la première classe a été étudiée surtout par MM. Cailletet (¹) et Pfaff (²).

D'après M. Cailletet, une pression variant de 60^{atm} à 120^{atm} empêcherait l'action des plus forts agents chimiques ; ainsi le zinc ne réagirait plus sur l'acide sulfurique dans ces conditions.

M. Pfaff a vérifié les résultats de M. Cailletet. Il s'est servi, pour cela, d'un cristal de quartz dans lequel on avait foré une cavité cylindrique ; celle-ci était fermée par une plaque en gutta-percha couverte d'une autre en acier. L'appareil pouvait être exposé à une pression de 2000^{atm} sans s'ouvrir.

Ayant introduit dans la cavité de l'acide azotique étendu d'eau et du spath calcaire, M. Pfaff constata que la réaction s'arrêtait à la pression de 60^{atm}, la température étant 10°-15°. Pour l'acide sulfurique et le zinc, la pression monta jusqu'à 80^{atm}, puis la réaction s'arrêta aussi. On constata également que le plâtre ne s'hydratait pas sous une pression de 40^{atm} et que le papier ne s'imbibait plus d'eau sous pression.

(¹) *Naturforscher*, t. V, p. 4.

(²) *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, 1871.

Je me suis surtout attaché à chercher l'effet de la pression sur les réactions de la seconde classe.

1° Quand on mélange à froid de la limaille de cuivre avec du soufre grossièrement pulvérisé, il ne s'établit aucune action chimique entre ces deux corps sous la pression atmosphérique, mais sous une pression de 5000^{atm} la combinaison est *complète*. Il se forme du sulfure cuivreux (Cu^2S) *cristallisé* noir, et l'on ne peut plus découvrir, à l'aide du microscope, la moindre parcelle de cuivre métallique. La réaction ne s'est donc pas seulement établie là où le cuivre et le soufre se touchaient, mais elle a gagné toute la masse du cuivre. L'examen du produit de la réaction fait naître cette conviction que le soufre a pénétré, pour ainsi dire, dans le cuivre, et non le cuivre dans le soufre; en effet, le soufre ayant été en excès par rapport au cuivre, on voit disséminés dans toute la masse les grains de soufre qui n'ont pas pris part à la réaction.

Ainsi, la réaction du soufre et du cuivre, qui n'a lieu, dans les conditions ordinaires de pression, qu'à une température élevée, se produit sous forte pression à la température ordinaire. La raison de ce fait se trouve sans doute dans la diminution qu'éprouve la somme des volumes de cuivre et de soufre mélangés, pendant la combinaison; la contraction est telle, que 138^{vol} de $\text{Cu} + \text{S}$ deviennent 100^{vol} de Cu^2S .

2° Un mélange grossier de chlorure mercurique et de limaille de cuivre a été exposé à une pression de 5000^{atm}: il y a eu un échange complet entre le cuivre et le mercure. Vu au microscope, le produit de la réaction montrait, à la place de chaque grain de limaille de cuivre, une gouttelette de mercure: le cuivre avait formé du chlorure cuivreux (Cu^2Cl^2) avec la totalité du chloré; il ne s'est pas produit de chlorure cuivreux.

3° On peut mélanger imparfaitement de l'*iodure de po-*

tassium bien sec avec du *chlorure mercurique également sec* sans que les deux corps réagissent sensiblement; mais, quand on comprime le mélange de ces corps, *qui est blanc*, à 2000^{atm}, il se forme un bloc *rouge* composé d'iodure de mercure et de chlorure de potassium; toute trace de sel incolore disparaît, et la masse se présente comme si les deux sels avaient coulé l'un dans l'autre.

4° Les réactions précédentes sont conformes aux lois de l'affinité. Ce sont des réactions directes, car le chlore a plus d'affinité pour le potassium que l'iode, et le cuivre a plus d'affinité pour le chlore que le mercure. Ces réactions ont donc lieu suivant la pente des affinités. On peut se demander si des réactions inverses ne se produiraient pas sous pression comme elles ont souvent lieu lorsque les corps sont dissous ou lorsqu'ils sont portés à une température élevée.

Pour m'assurer de la chose, j'ai comprimé un mélange d'*iodure de potassium* et de *sulfure de mercure*. Le mélange s'est soudé en un bloc, mais il n'y a eu aucun vestige de réaction chimique.

5° J'ai comprimé un mélange de sulfure ferreux et de soufre dans l'espoir d'arriver à former du bisulfure de fer ou de la pyrite. Le produit de la compression n'a pas pris l'éclat métallique jaune de la pyrite, mais il était formé de sulfure de fer de couleur noire, *insoluble dans l'acide sulfurique*. Le soufre paraissait s'être dissous dans le sulfure ferreux. Je n'ai pas procédé à une analyse quantitative de cette substance, parce que le degré de pureté indispensable n'a pu lui être donné.

6° Pour vérifier l'action de la pression sur les réactions de la première classe, j'ai comprimé un mélange d'oxyde de mercure et de soufre. Aucune réaction chimique n'a eu lieu; le soufre paraît seulement avoir dissous l'oxyde de mercure.

7° J'ai comprimé ensuite un mélange intime d'acide tar-

trique et de carbonate de sodium sec; il ne s'est pas dégagé la moindre trace d'anhydride carbonique.

8° Si l'on comprime, au contraire, du carbonate de sodium mélangé à de l'anhydride arsénique, il y a production abondante d'anhydride carbonique et formation d'arséniate de sodium.

S'il demeure donc vrai que la pression empêche les réactions qui sont accompagnées d'une augmentation de volume, on ne doit pas perdre de vue cependant que l'affinité chimique joue un rôle considérable dans le phénomène : c'est ce qui découle des expériences 7° et 8°.

CONCLUSIONS.

De l'ensemble des expériences que je viens de faire connaître on peut conclure en premier lieu, je crois, que les corps solides jouissent de la propriété de se souder lorsqu'ils sont en contact intime.

Cette propriété est plus ou moins prononcée chez les différents corps, et elle paraît être une fonction de la dureté. Des corps mous se soudent facilement, des corps durs difficilement. Cependant il semble que cette propriété dépende d'un autre élément encore.

D'après ce qui précède, nous pouvons diviser les corps en deux classes : les corps cristallisés ou accidentellement amorphes, et les corps amorphes à proprement parler. Tous les corps cristallisés ont montré la propriété de se souder, sans aucune exception, et même, lorsque la poudre d'un corps accidentellement amorphe était comprimée, on retirait du compresseur un corps à cassure cristalline : la cristallisation s'était opérée sous l'influence de la pression. On doit conclure de là que l'état cristallin est, aussi bien que la mollesse, une des conditions de la liaison des corps solides et de plus que, pendant que les grains d'une poudre se soudent, l'attraction des particules a lieu suivant les directions des axes cristallins.

Il est même probable que la mollesse n'est qu'une condition secondaire dans la production du phénomène de la liaison, qu'elle n'agit pas comme cause active, mais seulement parce qu'elle favorise le rapprochement parfait des particules solides sous l'influence de la pression et qu'elle n'empêche pas l'orientation des molécules dans la direction des axes cristallins.

D'un autre côté, la classe des corps amorphes, à proprement parler, comprend des substances qui se soudent très facilement : telle est la cire, et d'autres qui ne se soudent pas, comme le carbone amorphe. Nous devons donc distinguer deux qualités chez ces derniers, et l'on est naturellement amené à rappeler une remarque faite depuis longtemps déjà : il est des corps mous, tels que la poix, qui coulent lentement à la température ordinaire sous une charge faible ou seulement sous l'action de leur propre poids; il en est d'autres, plus mous cependant, tels que le suif, qui se comportent d'une manière différente et ne coulent pas. Cette différence qui se révèle chez les corps mous sous le rapport de la *fluidité* sous la pression ordinaire pourrait bien se traduire aussi sous une forte pression. On pourrait dire alors que des corps amorphes, comme la gomme arabique, seraient comme la poix, sous forte pression.

Si la chose était nécessaire, on pourrait même nommer le groupe des corps amorphes qui se soudent *le groupe des corps cirôides* et l'autre *le groupe des corps aci-roïdes*.

Le résultat général est, en un mot, que l'état cristallin favorise la liaison des corps solides, mais que l'état amorphe ne l'empêche pas toujours.

Quant à la raison intime de la liaison des corps, elle ne découle pas nécessairement des expériences précédentes, mais il est permis de remarquer que les faits qui viennent d'être décrits ne diffèrent pas, au fond, de ceux qu'on ob-

serve tous les jours quand deux gouttes d'un même liquide arrivent à se toucher, et qui se terminent par la confusion des gouttes en une seule. On objectera qu'il n'y a rien de commun, sous ce rapport, entre un corps liquide et un corps solide. Cependant la différence ne paraît plus si grande si l'on se rappelle que sous forte pression les solides s'écoulent comme les liquides. L'idée de la dureté, en d'autres termes, nous apparaît comme une idée relative, et l'on peut même dire subjective. Si l'eau est liquide pour nous, c'est que nous constatons qu'elle se moule sous son poids dans les vases qui la contiennent ; mais, si nous imaginons que l'on introduise du sel marin, par exemple, dans un vase de profondeur suffisante, les couches inférieures de sel finiront aussi par couler et se mouler sous l'influence de la pesanteur. Il y a plus : l'eau, qui ne nous présente presque pas de dureté, doit certes paraître un corps d'une certaine dureté à l'araignée d'eau, et, si notre poids était tel que nos pieds exerçassent une pression suffisante sur le sol, nous trouverions le pavé de nos rues trop mou pour nous porter.

Passons à un autre ordre d'idées.

L'expérience nous a montré que, si l'on comprime suffisamment du soufre prismatique ou du soufre plastique, on obtient du soufre octaédrique ; de même le phosphore amorphe *paraît* se changer en phosphore métallique ; enfin des corps amorphes changent leur état sous pression, et des mélanges de corps réagissent chimiquement si le volume spécifique du produit de la réaction est plus petit que la somme des volumes spécifiques des corps réagissants.

Dans tous ces cas, le corps soumis à la pression s'est changé en une variété plus dense ; le soufre prismatique, qui a un poids spécifique exprimé par 1,96, s'est changé en soufre octaédrique, dont le poids spécifique est 2,05, et ainsi de suite. On peut tirer de là cette conclusion que

l'état que prend la matière est en relation avec le volume qu'elle est obligée d'occuper lorsque des forces extérieures agissent sur elle. Ainsi l'existence du soufre prismatique ne serait possible qu'à la condition que son volume spécifique ne fût pas diminué, les conditions de température restant les mêmes ; s'il en est autrement, le soufre prend l'état allotropique correspondant à ce volume spécifique.

On le voit, cette conclusion n'est que la généralisation d'un fait bien connu dont il a été question dans le premier Chapitre de ce travail. Thomson a démontré que, si l'on comprime suffisamment, à la température du point de fusion, un corps qui est moins dense à l'état solide qu'à l'état liquide, on doit le faire passer de l'état solide à l'état liquide. En somme, les corps prennent, bien qu'on ne leur enlève ni qu'on ne leur communique de la chaleur, l'état d'agrégation qui convient au volume qu'ils doivent occuper.

Cette conclusion paraît même se vérifier quand, au lieu de diminuer le volume spécifique d'un corps, on l'augmente, car c'est en dilatant par la chaleur le soufre octaédrique, en le fondant, qu'on l'amène à se transformer dans la variété prismatique. En poursuivant les conséquences de cette conclusion, on est conduit à un résultat assez curieux, qui semble être la vérification *a posteriori* des expériences que je viens de faire connaître. Supposons qu'au lieu de dilater un corps par l'action de la chaleur on le dilate par un effort mécanique, c'est-à-dire qu'on le soumette à une traction. Dans ces conditions, le volume spécifique augmentera et le corps devra devenir liquide dans les tranches les plus dilatées : en un mot, *il se brisera*. La rupture des solides par traction ou par dilatation serait donc le contre-pied de leur liaison par la pression ou par la contraction. Pour les corps qui, comme l'eau et le bismuth, sont plus denses à l'état liquide qu'à l'état solide, un effet

différent devrait se produire aux environs de leur point de fusion. Le bismuth, par exemple, dilaté de force près de son point de fusion, acquerrait un volume spécifique appartenant *au liquide dilaté*; il devra donc se briser plus facilement, sans extension préalable, et c'est bien là ce que montre l'expérience. Il en sera de même de la glace, et l'on peut se demander si la raison de la faible résistance de la glace à la traction ne se trouve pas dans le fait que je signale.

Enfin, les résultats précédents peuvent être de quelque utilité pour le minéralogiste et le géologue. En effet, le pouvoir qu'ont plusieurs corps de cristalliser lorsqu'ils sont suffisamment comprimés expliquerait la formation de certains minéraux. On ne peut pas douter, en effet, que la pression n'ait existé pendant la formation des cristaux de quartz: la preuve en est que l'on a trouvé dans des cristaux de cette espèce de l'anhydride carbonique liquide ⁽¹⁾. Il est évident que celui-ci n'a pu être emprisonné qu'à la condition qu'il régnât, pendant la cristallisation du quartz, une pression considérable.

S'il était nécessaire de prouver davantage encore que la pression n'a pas été sans influence sur la forme et l'état de nos terrains, je citerais les observations microscopiques que M. Zirkel ⁽²⁾ a faites sur les phyllades, et qui ont montré que ces roches ne sont pas formées, comme on l'a cru, de débris de minéraux et de substances provenant seulement du limon arraché par l'action des eaux aux roches préexistantes, mais qu'elles renferment des mélanges cristallins et cristallisés qui sont souvent si abondants qu'ils forment la masse principale du phyllade. Ces cris-

(1) H. VOGELSANG UND GEISSLER, *Ueber die Natur der Flüssigkeitseinschlüsse in gewissen Mineralien* (Ann. von Poggendorff, t. CXXXVII, p. 56).

(2) *Ueber die mikroskopische Zusammensetzung von Thonschiefern und Dachschiefern* (ibid., t. CXLIV, p. 319).

tallisations, qui se sont opérées au sein de ces roches, sont très probablement le résultat d'une compression.

Si l'on tient compte, d'autre part, que sous une pression suffisante non seulement les corps se soudent, mais qu'ils coulent comme des liquides, ainsi que M. Tresca l'a montré, il n'est pas sans fondement d'assimiler un terrain ancien, avec ses plis et ses fentes, à nos glaciers modernes. De même que ceux-ci proviennent de la liaison des flocons de neige tombés au sommet des montagnes élevées en blocs de glace qui s'écoulent, se brisent, se soudent continuellement sous l'action de la pression et remplissent des vallées immenses, les assises de nos terrains primaires résulteraient de la liaison des grains de sable ou du limon amené par les eaux; la pression les aurait également moulés et poussés en les brisant et les soudant de nouveau, de manière à leur donner la forme que nous leur voyons aujourd'hui; les failles et les fentes de toute nature de nos terrains anciens seraient à comparer aux crevasses des glaciers.

DESCRIPTION DES APPAREILS EMPLOYÉS.

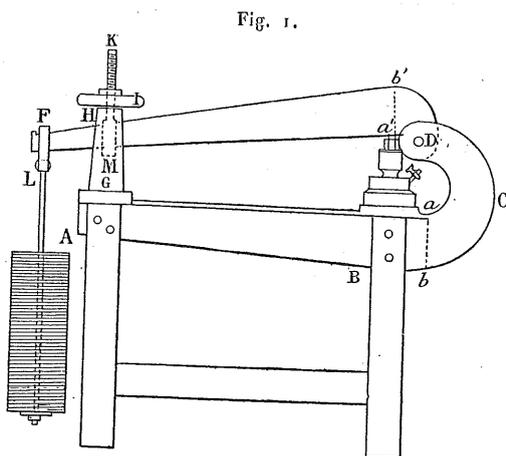
Dans les expériences préliminaires que j'avais faites, il y a deux années, je m'étais servi, pour produire de fortes pressions, d'une vis dont l'écrou était actionné par une clef de 1^m, 50 de long. L'écrou enfonçait un piston dans un cylindre en acier avec une pression qu'on pouvait estimer à 20 000^{atm}.

Cet appareil avait plusieurs défauts: il ne permettait pas d'agir dans le vide; on n'était qu'imparfaitement renseigné sur la grandeur de la pression supportée effectivement par les poudres à comprimer; enfin, les blocs de matière solide formés se trouvaient serrés dans le cylindre au point qu'il était très difficile, et parfois impossible, de les extraire en entier.

Comme je l'ai dit plus haut déjà, je me suis servi de deux appareils différents. Le premier avait spécialement pour objet de comprimer dans le vide et le second de comprimer dans l'air et à chaud : je pouvais ainsi connaître l'influence de la présence de l'air sur la liaison des poudres. J'ai constaté que l'effet de la présence de l'air n'est guère sensible.

Dans le premier appareil, la pression était donnée au moyen de poids agissant à l'extrémité d'un levier puissant.

La *fig. 1* représente cet appareil dans son ensemble.



Comme on le voit, il se compose d'un bâti solide en fonte ABC, construit de manière à résister sans danger de rupture, dans la partie où la pression se donne directement, à un effort de 30000^{atm} .

La section de cette pièce a la forme d'un T, et ses dimensions sont les suivantes :

Hauteur dans la partie dangereuse <i>ab</i>	^m	0,240
» à l'extrémité A		0,180
Épaisseur en tous lieux		0,030
Longueur <i>Aa</i>		1,300

Cette pièce est portée par quatre pieds en chêne reliés par des traverses de même bois. Sa table supérieure se trouve à $1^m,030$ du sol.

A partir de la section *ab* cette pièce se courbe, comme l'indique la figure, pour se terminer par une fourche à joues larges, dans laquelle est fixée l'une des extrémités du levier.

Celui-ci est en fer forgé et mesure, depuis son point d'appui D jusqu'au point d'application de la puissance F, $1^m,50$; son épaisseur est de $0^m,020$, et sa largeur dans la section dangereuse *a'b'*, $0^m,200$; à partir de là elle va en diminuant jusqu'à l'extrémité F, où elle n'a plus que $0^m,050$.

La partie libre F du levier passe par une rainure verticale pratiquée dans une colonne en fonte GH qui lui sert de guide et empêche tout déplacement latéral; en outre, le levier est saisi par-dessous, en M, par un étrier qu'on peut abaisser ou élever au moyen de la vis K et de son écrou volant I. Cette dernière disposition a pour objet de supporter le levier de manière à permettre de l'abaisser aussi lentement qu'on le désire.

Enfin, les poids dont on charge le levier consistent en plaques de fonte qui se placent sur un plateau terminant la tringle L.

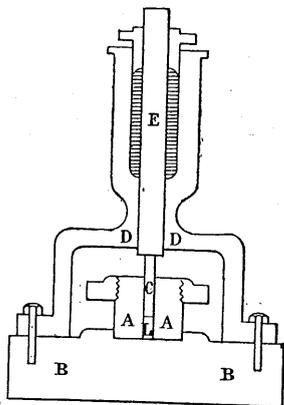
Je passe maintenant à la description de la partie de l'appareil dans laquelle la compression se fait.

Elle se compose d'une matrice en acier fondu AA (*fig. 2*, réduction au sixième). C'est un cylindre de $0^m,038$ de diamètre et $0^m,050$ de haut coupé en deux suivant un plan passant par son axe et percé d'outre en outre d'un trou cylindrique C, dont l'axe se confond exactement avec celui du cylindre. Ainsi composée de deux parties, cette matrice permet d'extraire facilement les blocs solides qui s'y sont formés par la pression.

Les deux parties du cylindre entrent exactement dans un logement pratiqué dans une pièce solide en fonte BB, de 0^m,220 de diamètre et 0^m,05 d'épaisseur, qui se trouve placée en M (*fig. 1*).

En outre, pour empêcher les deux moitiés de la matrice de s'ouvrir par le haut, l'extérieur du cylindre A est fileté

Fig. 2.



coniquement et un écrou puissant de 0^m,090 de diamètre permet de serrer ces moitiés l'une contre l'autre d'une façon inébranlable.

Dans le trou C s'engage un petit piston qui reçoit l'action du levier EF de la manière suivante. La pièce de fonte BB est couverte d'une cloche en bronze D, munie d'une boîte à bourrage par laquelle passe un piston en acier E, de 0^m,020 de diamètre, sur lequel vient s'appuyer le levier EF (*fig. 1*). Ce piston transmet la pression au petit piston C, qui comprime à son tour la poudre qui se trouve en L. La cloche en bronze est pourvue de robinets à ajutages qui permettent de la réunir à une machine pneumatique.

Cela posé, voyons quelle pression nous pouvons exercer avec cet appareil.

La distance entre le point d'appui du levier EF et la résistance étant de 0^m,120 et le levier ayant 1^m,50, toute action exercée en F devra être multipliée par 12,5 pour connaître son effet au point d'application du levier sur le piston.

Pour déterminer l'effort exercé par le poids du levier lui-même lorsqu'il ne se trouve chargé d'aucun autre poids, j'ai placé au point d'application M un dynamomètre et j'ai constaté, en moyenne, un effort de 130^{kg}. Je dis en moyenne, voici pourquoi : on peut se servir du dynamomètre de deux façons différentes, ou bien écraser le dynamomètre par l'abaissement du levier jusqu'à équilibre, ou bien élever lentement le dynamomètre jusqu'à entraînement du levier. Les résultats obtenus dans ces cas ont différenciés au maximum de 9^{kg}; le nombre 130^{kg}, cité plus haut résulte de déterminations faites en suivant les deux méthodes.

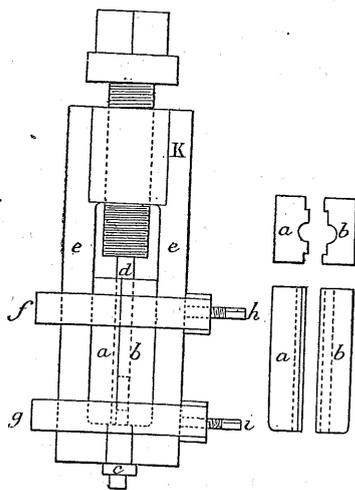
Comme le cylindre dans lequel s'effectue la pression a un diamètre de 0^m,008, soit une surface de 0^m,05 carré, on peut calculer que, à vide, l'appareil exerce déjà une pression de 260^{atm} sur un objet placé dans la matrice. La tige L pouvant être chargée de poids jusqu'à 1000^{kg}, vu les dimensions données aux parties de l'appareil, il est facile de voir que la pression qu'on pourra obtenir sera au minimum de 260^{atm} et au maximum de 25520^{atm}. Dans les expériences que j'ai faites jusqu'à ce jour, je n'ai cependant pas dépassé 10000^{atm}, parce que, sous cette pression déjà, le piston en acier C subit un écrasement permanent qui nécessite son remplacement après chaque opération.

Il est facile de se convaincre qu'avec cet appareil on ne peut que difficilement agir à des températures élevées. La nécessité d'avoir recours à un levier pour connaître la

pression exercée et d'opérer dans le vide obligent à mettre en contact des pièces métalliques très fortes qui rendent impossible d'élever exclusivement la température de la matrice. Ces motifs m'ont déterminé à renoncer à opérer dans le vide les compressions à température élevée, et j'ai fait construire à cet effet l'appareil suivant, qui ressemble beaucoup à celui que j'ai employé dans mes recherches préliminaires, mais dont une partie des défauts est éliminée.

Ici aussi la matrice est de deux pièces. Elle se compose (fig. 3) de deux blocs d'acier fondu *a* et *b*, s'emboîtant l'un

Fig. 3.



dans l'autre, grâce à une rainure large pratiquée dans *b* et à une languette ménagée dans *a*. Un trou cylindrique de $0^m,008$ de diamètre est foré dans l'axe de ces deux blocs réunis. C'est dans ce trou que l'on place les poudres à comprimer. Elles sont soutenues par-dessous par un piston fixe *c* et elles reçoivent par-dessus la pression par un piston *d*.

Cette matrice s'engage dans une rainure creusée dans une pièce d'acier fondu très solide *e*, dans la partie supérieure de laquelle on a taillé un écrou *K*. La partie inférieure reçoit, à pas de vis, le piston *c* dont il vient d'être question.

Deux étriers *f* et *g* servent à serrer les joues de la pièce *e* contre la matrice et à empêcher ainsi toute ouverture de ses parties. A cet effet, la pièce *e* forme légèrement *coin* à l'extérieur, et les étriers, enfoncés de force, agissent comme des frettes; de plus, ils sont encore serrés sur place par les vis *h* et *i*.

Dans l'écrou *k* s'engage une vis à tête carrée qui est manœuvrée par une clef de $1^m,50$ de long. Le pas de la vis est de $0^m,003$, comme il l'était dans mon appareil primitif; je puis donc évaluer la pression maximale réelle que l'on peut exercer à $20\,000^{atm}$.

Pour agir à chaud au moyen de cet appareil, voici comment on opère.

La matrice ayant été remplie à froid de la poudre à comprimer et l'appareil étant fretté, on le pince entre des doubles de bois dans un étau. On le chauffe ensuite au moyen d'une lampe à alcool et, quand un morceau d'étain qu'on a placé sur la matrice fond, on donne la pression: on est certain alors d'avoir agi à la température de fusion de l'étain, c'est-à-dire à 228° . Il est inutile d'ajouter que, si l'on veut opérer à d'autres températures, on remplacera l'étain par des substances convenablement choisies, telles que le bismuth qui fond à 267° , le plomb qui fond à 325° , le zinc qui fond à 412° , etc.