

Zeitschrift: Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali

Herausgeber: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

Band: 90 (1907)

Artikel: Les états de la matière

Autor: Guillaume, Ch.-Ed.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-90159>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

LES ÉTATS DE LA MATIÈRE

PAR

le Dr CH.-ED. GUILLAUME, Sèvres-Paris

Lorsque, dans une de nos paisibles vallées, s'allume dans chaque maison l'âtre familial, le regard aime à suivre les fumées ténues qui montent vers le ciel en gracieux tourbillons. Arrivée à une certaine hauteur chacune de ces légères colonnes s'élargit, s'étale, et bientôt rejoint ses voisines ; ainsi se constitue un nuage translucide, dans lequel l'œil ne distingue plus les séparations, si nettes encore l'instant auparavant. Mais que l'on observe attentivement ce nuage : bientôt on verra s'établir des couches de teintes un peu différentes, et l'étude détaillée de leur structure nous montrera qu'elles se sont étagées suivant les dimensions des minuscules grains de matières minérales entraînées du foyer.

C'est souvent ainsi que procède la science. Le premier groupement des phénomènes nous est donné par leur origine ; puis, plus tard, c'est leur nature intime qui marque leur place, et la classification, qui était artificielle, devient une classification naturelle.

La physique nous offre des exemples grandioses de ces deux étapes successives. L'étude du spectre en est peut-être la plus vaste et la plus frappante.

Je voudrais parler aujourd'hui d'une synthèse moins saisissante, moins populaire surtout, car d'admirables dé-

couvertes dans le domaine des radiations fascinent tous les regards. Mais la matière, avec son infinie complexité, appelle aussi de profondes études. D'ailleurs, n'est-ce pas d'elle qu'émane le rayonnement ? N'est-ce pas en elle qu'il revient et qu'il se transforme ? Par réciprocité, le rayonnement lui-même la modifie, et l'étude de l'un serait voué à une partielle stérilité, si l'étude de l'autre ne marchait pas de pair.

I.

L'observation immédiate, qui établit des catégories tranchées, avait conduit à la conception de trois états des corps, que l'on pourrait appeler massifs. Sir W. Crookes en dénomma un quatrième, l'état individuel ou ordonné de la matière raréfiée. Et déjà la brillante synthèse de van der Waals, fondée sur les conceptions d'Andrews, avait enseigné la continuité de deux des états, dans le passage par le point critique, où la matière n'est ni un liquide ni un gaz, mais à partir duquel elle peut devenir l'un ou l'autre, par une modification infiniment faible de sa température.

Des observations beaucoup plus élémentaires auraient pu, depuis longtemps, montrer la continuité de l'état fluide et de l'état solide.

Un liquide est, dit-on, un corps qui prend la forme du vase qui le contient. Mais que l'on y regarde de près. Si nous frappons un coup sec sur un morceau de glu marine, il éclate, et chacun de ses débris montre une cassure conchoïde ; si nous le plaçons sur une table, nous le retrouverons tel au bout de quelques minutes, et ces deux observations nous autorisent à dire que la glu marine est solide.

Abandonnons maintenant ce morceau de glu, et prenons, chaque heure, une photographie de sa forme, puis faisons défiler toutes ces photographies dans un cinématographe. Nous aurons l'impression nette de l'étalement

d'une grosse goutte d'eau, à cette seule différence près, que les phénomènes d'inertie n'interviendront pas. L'expérience est intéressante au simple point de vue cinématique, puisqu'elle nous donne une image de l'écoulement d'un liquide qui serait dénué de masse.

Une balle de plomb posée sur un plan ne se déforme pas visiblement. Mais empilons des balles de plomb dans un tube d'acier. Pour peu qu'il ait quelques kilomètres de hauteur, le fond du tube se remplira complètement, comme si, au lieu d'y mettre du plomb, nous y avions versé de l'eau.

Ainsi, solide ou fluide semble être une notion conventionnelle, qui dépend du temps ou des dimensions. Un corps possédera toutes les propriétés du solide ou toutes celles du liquide, suivant que nous sommes un nain ou un géant, que nous sommes un homme pressé ou que nous possédons une patience à toute épreuve.

Mais la notion des états solide et fluide n'est pas seulement, semble-t-il, de pure convention ; si nous faisons intervenir la température, nous pouvons établir en plus la continuité. Un fil de quartz, dont on connaît la merveilleuse élasticité, peut être chauffé graduellement, et atteindre l'état complètement fluide sans qu'à aucun moment on puisse dire, ici il est solide, un peu plus haut il sera liquide.

II.

Pour n'avoir pas voulu être dupes d'une illusion, ne nous sommes nous pas trompés nous mêmes ? C'est ce qu'un examen plus approfondi des phénomènes va nous montrer.

Si, au lieu de la glu marine, du plomb ou du fil de quartz, nous avons pris simplement un cristal de quartz, nous ne l'aurions vu s'écouler ni sous l'action du temps, ni sous un notable effort ; et, si celui-ci avait dépassé une certaine limite, le cristal se serait brisé. Nous ne l'aurions

pas vu davantage se ramollir graduellement sous l'action de températures de plus en plus élevées. Quelles que fussent les précautions prises pour le chauffer, nous l'aurions vu au contraire, à une certaine température, éclater et se réduire en poussière. Et c'est en agglomérant cette poussière au chalumeau que nous aurions obtenu la matière première de ces fils dont M. C.-V. Boys a doté la physique.

Nous pressentons, à l'examen de cet exemple, que, si les définitions classiques de l'état solide et de l'état liquide sont manifestement insuffisantes, au moins peut-il exister des cas dans lesquels aucun doute n'est possible ; il est certains corps pour lesquels l'état solide n'est pas une fiction.

Sur la pente de cette synthèse facile et séduisante, mais dangereuse, que nous venions de tenter, M. H. Le Chatelier a crié : *Prenez garde !* Et son argument, développé avec un talent consommé par M. Tammann, a apporté une subite clarté en un domaine naguère encore très obscur.

III.

Jusqu'ici, notre examen de la matière est resté limité à ses propriétés mécaniques ; il est donc incomplet, et notre jugement s'en est ressenti. La matière dont est fait le fil de quartz se comporte, vis-à-vis des déformations permanentes tentées à la température ordinaire, sensiblement comme le cristal de quartz, et c'est seulement lorsque nous le chauffons que la différence apparaît. Mais la raison pour laquelle elle s'est manifestée est précisément celle qui a servi à fonder une distinction bien tranchée entre deux états apparemment solides des corps : l'un des états du quartz est l'état cristallin, l'autre est l'état amorphe.

C'est là qu'est la vraie discontinuité ; c'est là que tous les genres d'investigation, pourvu qu'ils s'élèvent un peu au-dessus de l'expérience la plus vulgaire, font apparaître des différences que rien n'égale.

La matière peut être ordonnée ou désordonnée. Ses molécules peuvent être disposées en des ensembles symétriques, ou bien elles peuvent être distribuées suivant les lois du hasard, sans qu'aucun groupement déterminé se manifeste. Lorsqu'une ordonnance précise a présidé à la constitution du corps, toutes ses propriétés la révèlent. Les paramètres élastiques, le chemin que décrit la lumière, la propagation de la chaleur et de l'électricité, tout, jusqu'à la forme extérieure, qui, la première, attirera l'attention sur ces jeux de la nature, indique une organisation supérieure, où chaque partie concourt à l'harmonie de l'ensemble.

La matière amorphe, c'est de tous côtés l'indifférence complète; c'est la foule qui se groupe ou se disloque, grossit ou s'écoule, sans qu'une joie ou une douleur survienne. Le cristal, c'est le cercle de la famille, où l'on regrette l'absent, où la douleur est partagée, où la joie est intime. Et cette solidarité dans la matière cristalline est si frappante que M. Brillouin a pu émettre cette géniale hypothèse : Les actions capillaires sont plus faibles au dehors d'un cristal qu'au contact du même corps à l'état amorphe. C'est que, dans le premier, comme au foyer familial, l'intérêt se concentre, il en reste moins pour l'extérieur.

Mais quittons la fiction. Aussi bien, sans poursuivre le parallèle, il se présentera de lui-même à notre esprit.

J'ai tenté de montrer combien est souvent illusoire la distinction élémentaire entre les états solide et liquide. Celle que nous venons d'établir la remplace par une distinction de nature plus élevée, qui souvent classe les corps comme autrefois, mais souvent aussi rompt les anciens groupements.

Un corps peut exister sous un grand nombre d'états divers. Chacun d'eux possède un domaine particulier d'équilibre, défini par un ensemble de valeurs simultanées des agents extérieurs : pression, température, champ lumineux, champ électrique, champ magnétique. La plupart des recherches

se sont limitées aux deux premières de ces actions, parce qu'elles sont les plus évidentes et les plus générales. L'expérience permet de tracer la courbe joignant les couples de valeurs de la pression et de la température qui séparent deux états d'un corps. Dans le champ inférieur existera un certain cristal, dans le champ supérieur un autre cristal. Le champ qui surmonte tous les autres est généralement celui de l'état amorphe. Le passage est une ligne de transformation, dont la fusion proprement dite n'est qu'un cas particulier.

Il semble que le passage à l'état amorphe, que nous nommerons par extension la fusion, se produise toujours dans les mêmes conditions, et sans aucun de ces retards très fréquents dans le retour à l'état cristallin. Pour produire le cristal, au contraire, il faut un noyau qui grossit aux dépens de la matière environnante; les noyaux ont en général une très faible tendance à se former au voisinage de la température de fusion, et il faut descendre beaucoup plus bas pour les voir se produire en grand nombre. Au contraire, comme l'a montré M. Tammann, la tendance à l'accroissement des noyaux augmente sans cesse à mesure que la température s'élève, jusqu'au point de fusion lui-même, où brusquement elle se renverse; les noyaux se détruisent alors, en même temps que les cristaux déjà formés.

Le refroidissement rapide d'un corps peut lui permettre de traverser la région de facile cristallisation sans que les groupements se forment. La substance surfondue arrive alors à une température basse sans abandonner l'état amorphe, et peut devenir très dure par augmentation progressive de la viscosité. Le corps a toutes les apparences d'un solide dans le sens de l'ancienne définition; mais il n'est pas un solide vrai, parce qu'un réchauffement le ramène, sans aucune transformation brusque, à l'état fluide. Telle est la condition d'existence du fil de quartz, qui, au point de vue physique profond, et non pour le

chimiste ou le mécanicien, est beaucoup plus éloigné du quartz cristallisé que du verre, de la glycérine ou même de l'eau.

Ainsi s'explique, sans la plus légère difficulté, la fusion pâteuse, qui est la simple diminution graduelle de la viscosité, conformément aux lois depuis longtemps connues dans les liquides.

Le plus souvent, les corps présentent, aux températures basses, une complète inaptitude à changer d'état. Si nous nous éloignons de la cristallisation pour envisager la dissolution, les exemples abonderont.

Un verre à l'or, refroidi brusquement, reste indéfiniment incolore. Réchauffé, il prend la belle couleur pourpre qui le fait rechercher, et qu'il doit aux grains du précieux métal, agglomérés en masses ultramicroscopiques séparées de la solution.

La trempe de l'acier fixe, aux températures basses, une solution particulière de fer et de carbone, stable au rouge, alors que le recuit, ou simplement le refroidissement lent, permet la transformation, et livre des métaux doux. L'addition du tungstène à l'acier a pour effet de donner à la transformation une extrême lenteur, ce qui assure la conservation du carbone de trempe, même lorsque le passage par les températures de transformation s'est produit par refroidissement à l'air.

La multiplication des citations est superflue. Celles qui précèdent constituent d'intéressants exemples de ce que peut l'instinct du praticien pour enseigner des procédés industriels d'une grande importance bien avant que la science soit susceptible d'en donner la théorie complète.

Toutefois l'investigation scientifique, dans ce domaine comme dans tant d'autres, n'a pas été superflue, et c'est avec le guide sûr du diagramme des états que l'on est arrivé, par exemple, à la découverte des propriétés industrielles du bronze trempé.

IV.

Revenons à la cristallisation. M. Amagat, M. Spring, M. Tammann, ont consacré, à la variation de ce phénomène sous l'action de la pression, d'admirables expériences, qui ont transformé nos idées sur les états de la matière.

Je ne résiste pas au plaisir de citer deux résultats particulièrement frappants obtenus par M. Tammann.

Nous nous considérons comme suffisamment renseignés lorsque nous connaissions les trois états de l'eau : la glace, l'eau liquide et la vapeur d'eau. Mais si l'on refroidit la glace jusque vers -80° , et qu'en même temps on la soumette à une pression de l'ordre de 2000 à 3000 atmosphères, on voit, au bout d'un instant, sans que l'on ait modifié son volume, la pression s'abaisser graduellement de 600 à 700 atmosphères, et se fixer à une valeur nouvelle, indiquant qu'une transformation complète vient de s'accomplir.

Effectivement, la glace ordinaire s'est alors muée en une variété plus dense que l'eau, glace normale, qui se rencontre avec la glace anormale ordinaire et l'eau elle-même, en un triple point, dont les conditions sont définies par -22° et 2200 atmosphères. La température de fusion de cette glace nouvelle monte naturellement en même temps que la pression ; elle atteint -17° sous 3500 atmosphères, et l'on peut prévoir qu'en poussant plus loin l'expérience, on retrouverait son point de fusion à 0° un peu au-delà de 10000 atmosphères.

L'autre expérience, également instructive, se rapporte à un corps beaucoup moins répandu, le chlorure de phosphonium.

Aux pressions et aux températures ordinaires, ce corps est gazeux. Sous pression, il se solidifie, et peut, comme l'acide carbonique, exister en cristaux baignés dans leur vapeur. Mais aussi, il peut exister à l'état liquide, et

M. Van't Hoff a fixé sa température critique à 50°. Or, M. Tammann a pu suivre sa courbe de fusion jusqu'à 102° et 3040 atmosphères, et rien n'indique la proximité d'un arrêt dans cette courbe.

Voilà donc un corps qui reste solide à une température incompatible avec son état liquide. Le passage par sa température critique n'est, d'ailleurs, marqué par aucune inflexion dans la courbe de fusion, ce qui montre bien la réelle continuité des états liquide et gazeux.

Ce résultat peut paraître paradoxal. Nous avons l'habitude d'admettre comme évident qu'un corps ne peut pas être solide à une température où il lui est impossible d'exister à l'état liquide. Mais, pour peu que nous réfléchissions, nous nous apercevons que cette croyance n'est fondée sur rien, sinon sur un instinct, qui, dans ce cas, était trompeur, et que le résultat de M. Tammann, si surprenant soit-il, n'a rien de contradictoire avec les faits connus, et doit même être très général.

Dans ces deux expériences, il a suffi, sans s'écarter des températures atteintes avec la plus grande facilité, d'élever la pression jusque vers 3000 atmosphères, pour découvrir un domaine nouveau, que rien ne faisait pressentir; pour voir l'eau, par exemple, que nous croyions si bien connaître, devenir protéique, et abandonner la forme cristalline dont l'anomalie possède, pour notre vie sur la terre, une importance capitale.

Mais ce sont, dira-t-on, des conditions exceptionnelles, et dont l'intérêt, de pure curiosité scientifique, est limité au laboratoire, puisque nous ne rencontrons pas, à la surface de la terre, de pressions comparables à celles qui ont produit ces singuliers phénomènes.

Pensons-y un instant. S'il est vrai que la surface de notre terre et son voisinage immédiat présentent pour nous le maximum d'intérêt, nous ne saurions laisser hors du domaine de nos investigations les couches profondes de notre globe, où s'élaborent, comme en un gigantesque

creuset, les substances qui, de temps à autre, transsudent au travers de ce qu'on est convenu d'appeler l'écorce terrestre; ce creuset, dont les légers soubresauts causent les effrayants séismes qui rappellent à l'humanité combien peu de chose est sa puissance.

Il suffit de descendre à une dizaine de kilomètres au-dessous de la surface du sol pour rejoindre l'ère des pressions dont nous venons de parler. Mais que se passe-t-il à 100 kilomètres, à 1000 kilomètres, au centre de notre globe où la pression est de l'ordre d'un million d'atmosphères; au centre du soleil, où elle est mille fois plus grande?

Ce sont là des questions auxquelles notre connaissance de la nature est impuissante à répondre, et tout ce que nous pouvons faire, après nous être humiliés de savoir si peu de chose, est de chercher à obtenir quelques vues latérales vers ce domaine que nous ne pouvons pas attaquer de front.

V.

Mais avant d'aller plus loin, il convient de revenir encore en arrière, et de nous demander si, en admettant maintenant la discontinuité des états cristallisé et amorphe, nous n'avons pas été dupes des mêmes illusions qu'en voulant montrer la continuité des états solide et liquide. Voici une expérience, exécutée il y a quelques années par M. Clemens Schäfer, et qui peut donner à réfléchir.

On sait que, dans les liquides ou dans les corps qui éprouvent des déformations permanentes sans réactions élastiques linéaires, le coefficient de Poisson, de la contraction transversale à l'allongement, est égal à $\frac{1}{2}$, condition nécessaire pour que la déformation se produise sans changement de volume. Or, si l'on détermine les variations des paramètres élastiques d'un fil métallique aux températures basses, et que l'on extrapole jusqu'à ce que le coefficient de Poisson atteigne la valeur $\frac{1}{2}$, on trouve une tempéra-

ture qui, aux incertitudes près de l'extrapolation, se confond avec la température de fusion.

La fusion, qui est un phénomène bien défini pour les métaux, serait donc une conséquence continue de la variation des paramètres élastiques.

N'insistons pas pour le moment, sur ce doute, et cherchons à l'éclaircir en étudiant d'autres expériences.

Le regretté Kahlbaum, qui fut un des nôtres, exposait, à Fribourg même, il y a six ans, les résultats extrêmement curieux obtenus par la compression d'échantillons de divers métaux. Il s'agissait de corps très purs obtenus par distillation dans le vide, suivant la belle méthode qu'il avait si complètement élaborée. Les échantillons, sous la forme de petits cylindres bien polis, étaient soumis, dans l'huile de ricin, à une compression poussée graduellement jusqu'à 20000 atmosphères. Or, après une augmentation de la densité sous les pressions atteignant 10000 atmosphères, il observa, dans la majorité des cas, sous des pressions plus fortes, une diminution consécutive de la densité, faible, mais bien supérieure aux erreurs possibles des observations.

En même temps, les corps avaient changé de forme ; ils s'étaient allongés ou raccourcis, bien que soumis à des pressions rigoureusement hydrostatiques ; leur surface s'était dépolie, et présentait un aspect comme tourmenté. Kahlbaum ébaucha une théorie de ces phénomènes, mais le moment était un peu prématuré, et la solution devait être attendue de nouvelles expériences. Elles furent entreprises, après entente avec Kahlbaum, par M. W. Spring, l'éminent professeur de Liège, auquel l'étude des hautes pressions est redevable de tant de contributions de premier ordre.

Les expériences de M. Spring furent exécutées dans des conditions un peu différentes de celles de Kahlbaum. Les métaux furent forcés au travers d'un petit trou, de manière à subir un pétrissage sous d'énormes pressions.

Les résultats de Kahlbaum furent d'abord brillamment confirmés : la densité des échantillons étudiés se trouva diminuée de quantités notables, atteignant par exemple 2 pour 1000 dans le cas de l'argent. Un seul métal fit exception, le bismuth, dont la densité était augmentée.

Ce métal, d'ailleurs, se comporta de la plus singulière façon. On sait combien il est aigre et cassant ; or, le fil sorti de la filière par compression était tellement souple qu'il put être noué sans manifester la moindre tendance à la rupture. C'était un nouveau bismuth, encore inconnu, que M. Spring avait réalisé.

Mais les métaux pétris pouvaient revenir à leur état primitif ; il suffisait, pour cela, de les chauffer. Leur surface, polie, devenait alors rugueuse ; la densité première se retrouvait sensiblement ; bref, l'effet des compressions était complètement annulé.

Ne sommes-nous point en plein paradoxe ? Un métal passé à la filière sous une énorme pression est souple ; le recuit le rend cassant. Un autre perd de sa densité par le fait de la pression ; recuit, il la reprend.

Essayons donc une hypothèse, que d'ailleurs confirment immédiatement les observations métallographiques de M. Beilby. Supposons que, par la trituration sous forte pression, les métaux passent, au moins dans une notable proportion, à l'état amorphe. Le recuit devra les ramener à la structure cristalline, qui est leur forme naturelle aux températures inférieures à celle de leur fusion. S'ils conservent en général l'état amorphe, auquel le pétrissage les a amenés, c'est parce qu'aux basses températures, les transformations sont d'une lenteur extrême.

Si nous suivons les conséquences de cette hypothèse, le paradoxe s'évanouit, et tout devient clair. On sait que les métaux étudiés diminuent de volume en se solidifiant, à l'exception du bismuth qui se dilate. L'état amorphe apparemment solide étant continu avec l'état liquide, rien n'est plus mystérieux dans les résultats de M. Kahlbaum

et de M. Spring. L'expérience de M. Clemens Schäfer n'éveille plus un doute de principe, et tout ce qu'il reste à faire est de préciser l'état, insuffisamment défini, des fils dont il s'est servi. Le phénomène n'est pas simple, mais on ne peut plus l'opposer à l'idée de discontinuité des états cristallin et amorphe.

Un diagramme de M. Tammann, aurait pu faire sentir les résultats que je viens de rapporter.

Dans l'immense majorité des cas, le cristal est plus dense que l'amorphe dans lequel il prend naissance, mais ce dernier est plus compressible, de telle sorte que, sous de très fortes pressions, la différence des densités tend à diminuer. Comme conséquence nécessaire, la température de fusion monte, avec une rapidité décroissante, en même temps que la pression s'élève. Pour de très fortes pressions, un maximum pourra être atteint, où la densité du cristal et de l'amorphe seront égales ; et, pour des pressions encore plus fortes, la tendance à la transformation sera du cristal vers le corps amorphe. Cette transformation pourra se produire sous une pression hydrostatique, mais celle-ci devra être énorme. La trituration, qui, en faisant glisser des cristaux, provoque leur désagrégation, multiplie fortement cet effet de la pression, et engendre les transformations que je viens de décrire. Peut-être le fil n'est-il amorphe que jusqu'à une faible profondeur ; mais comme, dans les torsions, l'action des couches extérieures est prépondérante, ce sont elles qui impriment leur caractère au phénomène.

M. Spring a poursuivi l'expérience. Il a trouvé que, entre le métal amorphe et la baguette cristalline, il se produit un couple hydroélectrique, dans lequel le métal amorphe entre en dissolution. Or, dans l'immense majorité des cas, le cristal se forme avec dégagement de chaleur ; cette expérience confirme donc bien le fait que les métaux flués, dont l'énergie interne est moindre, sont amorphes. A ce point de vue, le bismuth était encore exceptionnel comme il l'est dans toutes ses propriétés.

VI.

Nous n'avons envisagé jusqu'ici que les corps purs. Abordons les corps composés. M. Spring a montré que, sous pression, les combinaisons chimiques se modifient. Les doubles décompositions s'opèrent sans difficulté, comme dans les dissolutions. Bien plus, l'étude des sulfates acides lui a montré, dans tous les cas où ils avaient été soumis à de fortes compressions et à une trituration, une décomposition partielle et souvent presque totale, en sulfate neutre et en acide sulfurique. Si l'on permet, pendant l'action mécanique, le dégagement de la partie la plus liquide des produits obtenus, on recueille le résidu. Sinon, la recombinaison s'opère, et le résultat échappe à l'observation.

Il est à peine besoin de faire remarquer combien l'ensemble des expériences exécutées aux fortes pressions peuvent être précieuses aux géologues ¹⁾.

Nous avons vu, sous une simple pression hydrostatique, les corps se déformer et céder, c'est-à-dire se comporter comme des liquides, puisque la différence des efforts tout autour étaient insignifiante. C'est ainsi que tout doit se passer aux grandes profondeurs de notre Globe; les corps s'écoulent sous la moindre augmentation de l'effort, sous la plus petite dissymétrie. Il ne saurait bien entendu, être question de creux et de vides; tout est absolument compact. La question de solidité ou de fluidité, dans le sens où nous l'entendons ordinairement, est oiseuse; la viscosité peut être énorme, mais les efforts sont dans la même proportion, et il n'y a rien de contradictoire avec les faits, à dire que l'intérieur de la terre est fluide, et en même temps, rigide comme l'acier.

¹⁾ Il convient de citer, à ce point de vue, comme présentant un intérêt tout particulier, les belles expériences faites par M. C. Barus, dans le laboratoire du Geological Survey, aux Etats-Unis.

La considération de l'effet des fortes pressions est partout fructueuse dans les études géologiques. L'existence des éléments microscopiques, comme celles des mouvements généraux s'en trouve singulièrement facilitée ; c'est ainsi, par exemple, qu'on découvre dans des roches qui ont flué, des cristaux minuscules dont on a tenté d'expliquer l'origine mystérieuse par une élévation locale de la température, peu probable en elle-même. On conviendra que l'explication de M. Spring est plus plausible.

VII.

Jusqu'ici, nous nous sommes tenus sur le terrain solide des faits, et si, par ci par là, quelques hypothèses ont été avancées, elles étaient immédiatement accompagnées d'un tel cortège de vérifications qu'elles ont pu être considérées comme des conséquences nécessaires des faits eux-mêmes. Mais abordons d'autres phénomènes plus cachés.

Celui qui domine l'époque actuelle, et dont la connaissance a le plus profondément modifié nos conceptions, contient encore de profonds mystères.

Découverte par M. Henri Becquerel, la radioactivité fut, pour les physiciens, la source d'une joie sans mélange, jusqu'au jour où la mort tragique de Pierre Curie vint enlever à notre admirative affection le grand savant qui, avec la coopération de son admirable compagne, en montra toute l'ampleur et toute la puissance.

Dès le premier article de la *Revue générale des Sciences*, dans lequel M^{me} Curie exposait, en 1899, le travail noblement accompli à deux, les diverses hypothèses par lesquelles on pouvait essayer d'expliquer le mystère nouveau étaient déjà indiquées. Il en est une qui a survécu, et dont beaucoup d'expériences faites depuis lors tendent à prouver l'exactitude.

Les faits sont bien connus de tous, il suffit de les rappeler sommairement. Le radium en émettant des rayons α , β et γ , dont les deux premiers sont enlevés à sa pro-

pre substance, se détruit, en donnant naissance à une émanation, qui subit à son tour des transformations en cascade. Le dernier terme de cette désintégration successive est l'hélium, suivant la brillante découverte de sir W. Ramsay et M. Soddy.

Depuis le radium jusqu'à l'hélium, les produits sont de nature matérielle, mais ils sont tous instables, et rayonnent en se simplifiant graduellement. Le radium lui-même se détruit, et l'étude de sa radioactivité a montré qu'en 1300 ans, la moitié de toute parcelle de radium a été transformée ¹⁾ en des corps inférieurs. En 26000 ans, une quantité donnée de radium est réduite au millionième.

Comment se fait-il, dès lors, qu'il existe encore, sur terre, des quantités appréciables de radium ? La terre toute entière, supposée en radium, serait ramenée à 1 kilogramme en mille siècles, période encore bien peu étendue dans la vie d'un monde.

Méditons cette singulière constatation de M. Boltwood : dans tous les minerais d'uranium, la proportion de ce corps au radium est constante dans les limites des erreurs d'observation.

Dès lors, l'explication est aisée : le radium est produit par l'uranium, comme l'hélium par le radium.

La période de destruction de la moitié de l'uranium est évaluée à 600 millions d'années ; puis vient, après un stade intermédiaire (l'actinium ?), et peut-être un deuxième, le radium dont la vie est relativement longue, tandis que les corps suivants, jusqu'à l'hélium ne font que passer. Telle est la raison expérimentale pour laquelle la recherche de la radioactivité dans l'uranium ne donne que du radium. Pour isoler les produits suivants, il faut pouvoir opérer déjà avec une forte concentration.

¹⁾ Voir RUTHERFORD, *Radioactivity*.

IX.

Si les constatations qui précèdent ne nous disent rien des causes profondes de la radioactivité, au moins sommes-nous renseignés sur la source du radium. Il se constitue sans cesse aux dépens de l'uranium, et la quantité que la terre en contient dépend uniquement de la quantité de l'uranium et de la rapidité des deux désintégrations, dont l'une produit le radium tandis que l'autre le détruit.

Cette théorie nous montre la stabilité d'une transformation qui peut durer sans changement depuis bien des millions d'années. Une telle évidence pourrait nous trouver satisfaits de l'immense chemin parcouru en moins de dix ans, grâce à la sagacité d'un nombre très grand de chercheurs attachés à ces difficiles questions. Mais c'est de l'homme de science plus que de tout autre peut-être, que l'on peut dire avec le poète :

« Borné dans sa nature, infini dans ses vœux... »

Revenons donc sur nos pas. Curie a montré que la radioactivité est pratiquement indépendante de la température entre des limites étendues. M. Schuster vient de constater que, jusqu'à 2000 atmosphères, elle ne dépend pas de la pression. Qu'est-ce à dire ? C'est que, dans l'intervalle dans lequel on a opéré, et au degré de précision des mesures, les variations du phénomène sont insensibles. Mais, pendant longtemps, on a ignoré la dilatation des métaux et même la compressibilité des liquides. Et pourtant, maintenant que nous savons opérer mieux, nous voyons la chaleur et la pression produire de considérables changements dans le volume des corps, préluant aux transformations de leur structure. Pour trouver une notable action sur les phénomènes radioactifs, il faudrait sans doute faire des mesures beaucoup plus précises, et pousser beaucoup plus loin les actions extérieures.

Lorsque Kirchhoff et Bunsen eurent rassemblé et complété des observations éparses et créé l'analyse spec-

trale, la physique put vivre pendant un temps sur cet axiome : à tout corps correspond un spectre unique. Puis surgirent les variations des spectres. Alors intervint la théorie de la cloche ; car les physiciens le savent très bien, qui n'entend qu'une cloche entend plusieurs sons. Enfin l'étude des spectres stellaires montra la disparition constante de certaines raies formant des séries régulièrement ordonnées, et l'on comprit que l'atome pouvait subir de grandes simplifications. Sir Norman Lockyer avança la théorie des protométaux, corps dont l'atome est résulté, par une dissociation partielle, de ceux que nous connaissons. A la température extrêmement élevée atteinte par une étoile telle que ζ de la Poupe, M. Pickering a pu observer une série de raies dont les positions sont rigoureusement représentées par la formule de Balmer, dans laquelle il suffit de remplacer par des nombres impairs les arguments pairs, qui rendent si parfaitement les raies de l'hydrogène terrestre ¹⁾.

Les températures les plus élevées que nous puissions produire semblent impuissantes à engendrer les décompositions intraatomiques ; et cependant les astres brillants nous en offrent de nombreux exemples.

Qui sait maintenant ce que peuvent produire les formidables pressions de l'intérieur des astres ? L'uranium se trouve dans des terrains éruptifs, dont certaines parties peuvent remonter de très grandes profondeurs. Nous savons qu'à l'intérieur de notre globe, la viscosité est énorme, alors que la pesanteur diminue à mesure que l'on s'approche du centre. Des corps très denses peuvent donc être entraînés par des courants généraux dus, soit à la contraction de l'écorce, soit aux actions newtoniennes des astres, soit même à des cristallisations produisant des changements locaux du volume de la matière. L'or, le

¹⁾ M. W. Ritz a réussi à rendre compte, par un mécanisme simple, de la transformation du spectre de l'hydrogène.

platine, l'iridium sont rares dans les couches superficielles de la terre. Si des remontées n'étaient pas possibles, ils en seraient absents.

Venu de très grandes profondeurs, l'uranium aurait été soumis à de formidables pressions, et à une trituration dont nous ne pouvons nous faire aucune idée. Qui nous empêche dès lors d'admettre, à titre de simple hypothèse, que ces pressions ont pu être la cause même de sa formation ? Les pressions réalisées dans les laboratoires n'ont pas, il est vrai, modifié l'atome ; mais combien elles sont infimes, comparées à celles que nous offre l'intérieur des astres ! Le rapport des températures atteintes est beaucoup moindre dans les étoiles brillantes et dans l'arc électrique que celui des pressions réalisées par la nature et celles que nous pouvons produire. Et pourtant les astres offrent à notre observation des phénomènes que l'expérimentation sur terre n'eût pu nous laisser soupçonner.

Si la pression était la cause principale de la formation de l'uranium, la prodigieuse énergie de la radioactivité serait une simple restitution. Elle ne serait autre qu'une petite partie de l'énergie de condensation de notre terre, que l'on croyait à jamais dissipée par rayonnement, alors qu'une radioactivité extrêmement faible des roches suffirait à compenser la chaleur que la terre perd constamment dans les espaces célestes.

Ainsi, la nature aurait fait une sage épargne. Elle se serait imposée à elle-même un taux de dépense prolongeant presque à l'infini la vie terrestre.

Il y a près de deux siècles, Buffon, étudiant le refroidissement d'une boule de fer et d'une boule de verre, voulut conclure à l'évolution des températures de notre globe. Examinée dans nos idées modernes, cette expérience était enfantine, mais au moins c'était déjà une expérience ; elle ne faisait pas remonter très haut la vie sur la terre, et prévoyait sa fin dans un avenir rapproché. Les calculs

de Poisson, les théories énergétiques de lord Kelvin et de Helmholtz nous ont donné de plus vastes espoirs et ont révélé l'une des causes de la conservation des températures dans les astres : la contraction de leur matière due aux forces newtoniennes, et les combinaisons chimiques ordinaires. On en était là il y a dix ans, lorsque l'étonnant phénomène de la radioactivité vint brusquement donner à nos réflexions une impulsion nouvelle et vivifier de plus lointaines espérances.

C'est ainsi que la science, avec ses tâtonnements, avec ses erreurs même, s'approche constamment de la vérité et nous apporte le réconfort avec sa connaissance.

L'ascension est souvent rude, le chemin se perd, puis se retrouve. Mais, lorsque du sommet atteint par tant de labeurs accumulés, nous apercevons au loin le point de départ, nous ne pouvons nous défendre d'un peu d'orgueil pour cette humanité qui, montant de plus en plus haut, découvrant les larges horizons des forces naturelles qu'elle apprend à asservir, accomplit sur terre sa glorieuse destinée.
