

La plasticité des corps solides et ses rapports avec la formation des roches.

Discours prononcé à la séance publique de la Classe des sciences
du 17 décembre 1899.

(Bulletin de l'Académie royale de Belgique, 3^e série,
t. XXXVII, n^o 12, p. 790, décembre 1899, et Bulletin de la Société belge de Géologie,
de Paléontologie et d'Hydrologie, t. XIV.)

MESDAMES ET MESSIEURS,

Les statuts de l'Académie exigent que chaque Classe, dans sa séance publique annuelle, rende compte de ses travaux.

Cette disposition est avantageuse pour l'Académie aussi bien que pour le public d'élite qui s'intéresse au progrès de la science. Pourtant la force des événements a rendu difficile, sinon impossible, l'observation stricte du règlement. C'est qu'il n'est plus donné aujourd'hui à un homme d'embrasser l'ensemble des sciences au point d'apprécier exactement la valeur des faits. Le champ s'est tellement agrandi pour chaque matière, les méthodes sont devenues si diverses et si délicates que la *spécialisation* s'est imposée comme condition du progrès. Le sujet du discours du directeur de la Classe des sciences est sorti du domaine des travaux de ses confrères, pour se limiter au cercle plus étroit de son activité personnelle.

Plus que tout autre, je me vois obligé de suivre l'usage qui a fini par prévaloir, car, je le reconnais sans détour, je ne possède pas le talent nécessaire pour traiter d'un sujet de portée générale devant une assemblée qui compte des représentants si distingués de toutes les branches artistiques, littéraires et scientifiques. Je demande donc la permission de dire quelques mots d'un objet modeste qui m'a occupé longtemps et qui m'occupe encore : de l'*agglutination des corps*

solides par la compression. Je suis heureux de l'occasion qui m'est offerte de résumer, à présent, des travaux que les événements m'ont contraint de disperser dans de multiples publications et qui, sans doute à cause de cette disposition même, ont parfois donné lieu à des interprétations étrangères à ma pensée.

Nos roches sédimentaires aujourd'hui les plus solides étaient, à l'origine, des terres meubles, des alluvions de sable et d'argile; elles se sont durcies dans la suite des temps. La plupart paraissent manquer de matières spéciales, pouvant jouer le rôle de *substances unissantes*, ou de *ciment*, entre les particules qui se sont agglutinées. Néanmoins elles sont souvent si solides que quand on les brise de force, leurs grains quartzeux se cassent plutôt que de se séparer. La cohésion est donc arrivée à s'exercer, avec le temps, d'une manière complète, dans toute la masse d'abord incohérente. En un mot, nous nous trouvons en présence d'un cas d'*agglutination* de corps solides, exclusif d'une *fusion* préalable, même imparfaite. La présence de nombreux fossiles dans ces roches porte à conclure de la sorte.

La question à laquelle nous avons essayé de répondre est celle de savoir comment ont pu se souder ces grains de sable qui, dans les conditions ordinaires, adhèrent si peu les uns aux autres, qu'un souffle léger les disperse et les emporte au loin.

L'observation journalière nous apprend que la matière ne se soude, en général, à elle-même qu'à l'état liquide. La soudure est alors d'autant plus aisée, plus rapide, que la liquidité est plus grande. Des gouttelettes d'eau se confondent à l'instant en une seule masse sitôt qu'elles se touchent; tandis que des globules d'un corps moins fluide, plus visqueux, demandent souvent le concours d'une action mécanique, d'un *pétrissage*, pour former un bloc homogène. En somme, l'agglutination paraît dépendre d'un degré de *plasticité* plus ou moins grand de la matière.

Or la plasticité n'a rien d'absolu : tous les degrés sont possibles et se rencontrent aussi, depuis le liquide le plus *fluide* jusqu'au solide le plus *aigre*. Il y a plus : des substances non plastiques en apparence présentent cependant de la *malleabilité*. Celle-ci n'apparaît, à la vérité, que sous l'action de forces mécaniques puissantes, telles que la compression, le martelage ou le laminage. C'est ce qu'a révélé, à suffisance de preuves, l'art de façonner, par emboutissage, mille objets dont nous nous servons journellement.

Il paraît dès lors tout indiqué de vérifier si des fragments de corps solides, dépourvus de la faculté d'adhérer les uns aux autres, dans les conditions ordinaires, ne pourraient s'agglutiner sous l'action d'un pétrissage énergique, produit par une compression suffisante. L'épreuve valait d'être tentée, car si elle amenait un résultat positif, l'état liquide et l'état solide de la matière devaient être envisagés sous un point de vue nouveau. La portée de l'expérience pouvait donc dépasser les limites des intérêts de la géologie pour s'étendre sur les sciences physiques en général.

Cette considération nous a déterminé à ne pas borner notre étude aux matériaux des roches : nous avons soumis à la compression, dans un appareil spécial, de la poudre d'un grand nombre de corps appartenant aux espèces chimiques les plus variées.

Nous n'entrerons pas dans la description du compresseur qui nous a servi; ce serait abuser de votre bienveillance; nous demanderons seulement la permission de dire qu'il était construit pour exercer une pression pouvant atteindre 10,000 atmosphères, sans que la substance comprimée s'échappât (*).

Le résultat des premières recherches peut être formulé comme il suit : *Tous les corps doués de la faculté de se déformer sous pression, sans se briser, se sont agglutinés aussi solidement que s'ils avaient été liquéfiés, tandis que ceux chez lesquels la malléabilité ne se révélait pas encore sous cette énorme pression ont été extraits du compresseur à l'état pulvérulent, comme ils y étaient entrés.* Il est particulièrement important de noter, pour le sujet qui nous occupe, que le sable quartzueux ou argileux, le calcaire sous diverses formes, les oxydes de fer, d'alumine, bref, les matières qui entrent le plus généralement dans la composition de nos roches, ont été de celles qui ne se sont pas agglutinées, ou, tout au moins, dont l'agglutination est restée imparfaite. La condition de la solidification de nos roches ne peut donc se trouver exclusivement dans la simple compression. A cet égard, le problème posé n'est pas résolu. On remarquera, au surplus, que si une pression de 10,000 atmosphères est insuffisante pour agglutiner du sable, la cause de la solidification des roches quartzueuses ne peut véritablement être cherchée dans la compression seule. 10,000 atmo-

(*) On trouvera cette description dans les *Bull. de l'Acad. roy. de Belgique*, 2^e sér., t. XLV, p. 746, 1878, et t. XLIX, p. 323, 1880.

sphères correspondent à une colonne de sable de 30,000 mètres de hauteur (*); par conséquent, la solidification ne pourrait avoir commencé, dans la nature, qu'à des profondeurs invraisemblables. Nous chercherons donc ailleurs la solution de cette question spéciale; mais nous nous arrêterons un instant aux résultats positifs obtenus à l'aide d'un nombre très grand de substances.

Les métaux se distinguent d'une manière frappante. L'agglutination de leur poudre (**) s'est révélée directement en rapport avec leur malléabilité. De plus, le résultat a été complet; c'est-à-dire que les grains des métaux n'ont pas formé un simple *conglomérat*, mais ils se sont soudés comme s'ils avaient subi la fusion. La chose était manifeste, surtout dans les parties qui avaient *flué* sous l'action de la pression.

Il n'est pas sans intérêt de rappeler que ces expériences ont rencontré, à l'origine, beaucoup d'incrédulité. On a dit notamment (**), et cherché à le prouver, que la compression n'était pas la cause immédiate de l'agglutination. Celle-ci devait s'être produite, assurait-on, parce que les poudres des métaux auraient éprouvé une fusion sous l'influence de l'énorme élévation de la température produite par la compression. Il est cependant facile de prouver, par la théorie mécanique de la chaleur, que l'élévation de la température invoquée est tout à fait *négligeable*. La compression ne peut produire, dans les conditions de l'expérience, qu'une élévation d'une fraction de degré seulement (iv). Quoi qu'il en soit, nous avons tenu à vérifier le fait directement. De la poudre à tirer fut comprimée, autant que le permettait l'appareil, sans qu'il y eut déflagration. Ceci prouve, à toute évidence, que la température n'est pas montée à 300°. Il y a plus : nous avons comprimé de la *phorone*, dont le point de fusion est à 28°, et cette substance n'a pas fondu. La constatation a eu lieu en plaçant au-dessus de la phorone, avant la compression, une balle de plomb. Si la matière avait fondu, la balle aurait dû tomber au fond du cylindre; mais on l'a retrouvée, chaque fois, à l'endroit où on l'avait déposée.

(*) La densité du sable étant supposée égale à 2.

(**) La surface de ces poudres doit, de toute nécessité, être absolument propre. Il suffit, pour compromettre le résultat, de passer les poudres par les doigts.

(***) *Bull. de la Soc. géol. de France*, t. XII, p. 233.

(iv) *Bull. de la Soc. chim. de Paris*, t. XLI, p. 488, 1884.

L'hypothèse d'une fusion doit donc être écartée. Alors il ne reste plus guère, pensons-nous, qu'à attribuer la *soudure* des métaux à une *interdiffusion* de leurs molécules. A la suite du rétablissement du contact parfait, par la pression, les molécules pourraient jouer entre elles à la *surface de joint*, comme elles jouent dans la profondeur de la masse.

Cette explication peut paraître hardie; néanmoins, il n'est pas difficile de vérifier qu'elle répond aux faits observés.

En effet, s'il se produit vraiment une *diffusion* des molécules à travers les surfaces de contact, il faut que la compression de *métaux différents* fasse naître un *alliage* et non un simple conglomérat de particules ayant conservé leurs propriétés individuelles.

L'expérience a confirmé cette conclusion d'une manière éclatante.

En comprimant un mélange d'étain et de cuivre en poudre, nous avons obtenu du *bronze*; le zinc et le cuivre ont donné le *laiton*, caractérisé par sa couleur *jaune d'or*; le cuivre et l'antimoine ont fourni l'*alliage violet* caractéristique; enfin, en comprimant un mélange, en proportions déterminées, de bismuth, d'étain, de plomb et de cadmium, il s'est formé un *alliage* qui a fondu dans l'eau bouillante, comme celui que Wood avait obtenu par voie de fusion ignée (*).

Pour comprendre ces faits, nous devons donc nécessairement admettre que deux fragments de corps solides de même espèce ou d'espèces différentes, mis en contact parfait par l'action d'une pression énergique, *diffusent* lentement l'un dans l'autre, comme diffuse, dans son dissolvant, un corps soluble quelconque, jusqu'à ce qu'il se soit réalisé une masse homogène. Plus généralement, ces expériences démontrent que le phénomène de la *dissolution* n'est pas subordonné à l'état de liquidité de la matière, ainsi qu'on l'avait cru: les corps solides eux-mêmes se dissolvent réciproquement, à la température ordinaire, pour donner des *solutions solides*. Ce fait fut donc démontré, dans notre Académie, environ dix ans avant que notre célèbre associé, J.-H. van 't Hoff, le déduisit, à son tour, des anomalies observées dans la congélation de certaines solutions (**), et qu'il en montrât l'importance pour la détermination des poids moléculaires.

Les corps solides conservent donc, jusqu'à un certain point, la *mobilité moléculaire* qui caractérise l'état liquide et l'état gazeux. Il subsiste toutefois une différence notable entre les solides et les liquides. Tandis que les liquides peuvent envoyer leurs molécules dans l'*espace vide*, *s'évaporer*, dans l'acception véritable de ce mot, les corps solides paraissent émettre plus aisément les leurs dans un milieu matériel déterminé, approprié à leur nature spéciale. Pour eux, l'*espace pénétrable* c'est plutôt la matière: voilà le vrai milieu de leur expansion; tandis que le *vide* leur est plus impénétrable. Cette proposition paradoxale ne peut se concevoir, à la vérité, que si le détachement d'une molécule d'un premier solide se trouve subordonné à son remplacement immédiat par une molécule du second solide, c'est-à-dire si la diffusion des métaux au contact est réciproque.

Nous nous trouvons, de la sorte, incidemment conduit à comprendre pourquoi certains corps se dissolvent dans d'autres, tandis qu'il en est qui ne se dissolvent pas. La *solubilité* serait la manifestation de la faculté des molécules de se remplacer les unes les autres.

Il ne sera pas sans intérêt de rappeler que le type le plus complet de substances infiniment miscibles, ou réciproquement solubles, nous est fourni en effet par les *corps isomorphes* étudiés, il y a déjà longtemps, par Mitscherlich. On le sait, les corps isomorphes ont, comme leur nom l'indique, une *même forme cristalline*, alors qu'ils sont d'espèces chimiques différentes. Un mélange de leur solution fournit des cristaux, toujours de même forme, mais qui contiennent des proportions quelconques de l'un et de l'autre corps. Du fait que les corps isomorphes coopèrent si aisément à l'édification d'un même cristal, on a conclu à l'identité de volume et de forme de leurs molécules. Alors il n'y a plus de difficulté à leur remplacement mutuel dans un cristal. Leurs molécules sont comme des pierres de même forme, mais de nature différente, dont on se servirait pour élever une construction d'un style déterminé.

Il est évident, d'autre part, qu'un type tout aussi accompli de substances infiniment miscibles nous est donné par les corps de même espèce chimique. Ici, tout est égal, forme et composition: aussi ces substances se dissolvent-elles en toute proportion.

Entre ces types bien caractérisés viennent s'échelonner toutes les autres substances. Parmi celles-ci, il s'en rencontrera dont les molécules, sans être vraiment de même forme, ne sont cependant pas si

(*) *Berichte d. chem. Gesellschaft*, t. XV, p. 595; 1884.

(**) *Zeitschrift für phys. Chemie*, V, p. 322, 1890.

différentes qu'une substitution de l'une par l'autre ne puisse avoir lieu, *grâce au jeu des espaces intermoléculaires*. Mais on conçoit que la solubilité réciproque ne saurait être infinie : elle devra s'approcher d'une limite, invariable à une température donnée, d'autant plus vite que les *espaces intermoléculaires* seront pris plus à partie. Quand la température s'élève, les espaces intermoléculaires s'élargissent, la *tolérance* envers l'inégalité de forme des molécules grandit, et avec elle, la solubilité.

Si nous nous sommes permis ces spéculations, c'est qu'elles se prêtent à un contrôle assez frappant.

En effet, si l'agglutination des corps n'est pas seulement un *acte mécanique*, une sorte de pétrissage sous pression, n'intéressant pas immédiatement les formes moléculaires, mais plutôt la conséquence d'une dissolution réciproque des corps solides, il faut de toute nécessité que des corps non solubles l'un dans l'autre ne se soudent pas par la compression. C'est là ce que montre l'expérience. On sait que le plomb et le zinc, fondus, ne sont pas miscibles; ils se séparent l'un de l'autre quand on les a mêlés, comme l'huile et l'eau. Ce n'est qu'à des températures élevées que la solubilité de ces métaux devient sensible (*). Le bismuth, de son côté, se comporte comme le plomb vis-à-vis du zinc. Eh bien, si l'on comprime, à froid, un mélange de plomb et de zinc en poudre, ou de bismuth et de zinc, on n'obtient qu'un *aggloméré* dû à l'enrobement du zinc par le plomb ou par le bismuth, et non une masse homogène.

Ce résultat peut nous encourager dans nos spéculations et nous engager à chercher aussi pourquoi les corps non malléables ne se soudent pas par la compression. C'est que la malléabilité n'est qu'une manifestation de la mobilité relative des molécules. Cette mobilité est, à son tour, la condition première de l'*interdiffusion*, ou de la dissolution réciproque des corps solides à leur surface de contact.

La mobilité des molécules dépend elle-même de leur *simplicité*. C'est un fait généralement observé. Les molécules les plus mobiles sont les molécules des gaz, c'est-à-dire les molécules peu ou point *polymérisées*. A mesure que la polymérisation se produit, on constate,

(*) Voir W. SPRING et L. ROMANOFF, *Sur la solubilité réciproque du bismuth et du plomb dans le zinc*. (BULL. DE L'ACAD. ROY. DE BELGIQUE, 3^e sér., t. XXXII, p. 51, 1896.)

d'une manière générale, que les corps perdent d'abord de leur *volatilité*, puis de leur *fusibilité*, et enfin de leur *malléabilité*. Les corps les plus durs, les moins malléables, comme le diamant, le corindon, le quartz et d'autres, sont aussi parmi les moins fusibles. Portés au contact parfait par une compression suffisante, ils ne donnent lieu à aucune diffusion de matière à la surface de contact, l'*hypertrophie* de leurs molécules contrariant le déplacement. La poudre de ces corps (*) ne montre pas le moindre vestige de liaison. Il en a été de même pour beaucoup d'autres, bien qu'à un degré moins évident. Je citerai notamment les oxydes des métaux. Notre éminent confrère, M. L. Henry, les a regardés il y a déjà longtemps, on le sait, comme des produits *polymérisés*.

Quoi qu'il en soit, nous ne devons pas encore considérer ces vérifications comme décisives. On peut se demander, en effet, si la soudure des solides n'est pas, quand même, la conséquence du *pétrissage* inévitable produit par la compression, plutôt que celle d'une *dissolution solide*. Les grains solides pourraient bien se comporter comme les boulettes d'argile qu'on malaxerait et former masse sans que la diffusion jouât un rôle capital.

Cette remarque doit aussi être soumise au contrôle de l'expérience. Il suffit pour cela d'*éliminer la compression* des essais et de s'assurer si les solides se soudent encore lorsqu'on aura pris toutes les précautions voulues pour réaliser leur contact physique parfait, par simple superposition.

A cette fin, nous avons dressé des surfaces planes de divers métaux, tels que l'or, le platine, l'argent, le cuivre, le zinc, le plomb, le bismuth, etc.; puis ces surfaces ont été appliquées l'une sur l'autre, sans aucune pression autre que celle qui résultait du poids des matières (**).

Une élévation de la température hâtant, comme on sait, la diffusion des corps dans une mesure très grande, nous avons placé les couples métalliques dans une étuve chauffée, afin d'abrégier la durée des expériences. La température a été maintenue, toutefois, toujours beaucoup au-dessous du point de fusion des métaux. Par exemple,

(*) Je n'ai pas expérimenté à l'aide du diamant; la preuve directe n'est donc pas donnée pour ce corps.

(**) *Bull. de l'Acad. roy. de Belgique*, 3^e sér., t. XXVIII, p. 23, 1894.

pour le platine, elle était à 1,600° sous ce point; pour l'or et le cuivre, à environ 800° sous leur point de fusion, et pour les métaux plus fusibles, à environ 200°. La durée du contact a varié de trois à douze heures, suivant la *dureté* du métal.

Le résultat a été surprenant. Les pièces des métaux de même espèce étaient soudées au point de ne plus former qu'une masse. Le *joint* n'était même plus visible après la régularisation de la surface. D'autre part, les couples de métaux différents s'étaient alliés dans la région de contact, d'autant plus profondément que leur malléabilité était plus grande. Ainsi, le *cuivre* et le *zinc* avaient formé une couche de laiton d'un quart de millimètre d'épaisseur, tandis que le couple *étain-plomb* s'était allié sur une épaisseur de près de 6 millimètres. Enfin, les métaux n'ayant pas la faculté de se dissoudre : le zinc et le plomb, le zinc et le bismuth, n'avaient montré qu'un commencement de liaison, sans solidité aucune.

Le parallélisme de ces faits et des précédents saute aux yeux : il montre que vraiment l'agglutination des solides n'a lieu que si ceux-ci ont le pouvoir de se dissoudre.

On ne doit cependant pas regarder une théorie comme vraie parce qu'un certain nombre de ses conséquences trouvent une vérification. On a souvent pu constater que tout un ensemble de phénomènes naturels s'interprètent également bien de façons différentes. Par exemple, les phénomènes de l'optique ont été expliqués, pendant longtemps, aussi aisément par la théorie dite de l'*émission* que par celle des *ondulations de l'éther*. La supériorité de la dernière n'a apparu que le jour où certains faits furent découverts dont la première ne pouvait rendre compte. Il faut donc se garder de mettre un terme aux recherches et ne pas se laisser séduire par une harmonie apparente entre les conceptions et les faits. C'est guidé par cette pensée que nous avons cru utile de vérifier si les réactions chimiques qui se passent au sein des *liquides* conservent leur caractère particulier dans le cas des *solutions solides*.

On sait en quoi consiste ce caractère. Quand on mêle deux solutions en état de fournir, par voie de réaction chimique, des produits solubles, il y a généralement arrêt de l'acte chimique avant l'épuisement complet des réactifs. On dit que les réactifs et leurs produits sont en *équilibre*. Par exemple, si l'on mêle une solution de salpêtre potassique et une solution de chlorure de sodium, il se forme du

salpêtre sodique et du chlorure de potassium *en quantité limitée seulement* : une proportion déterminée des réactifs paraît devenue *inactive* ou incapable d'accomplir le travail chimique. Inversement, si l'on mêle des solutions de salpêtre sodique et de chlorure de potassium, il se produit du salpêtre potassique et du chlorure sodique, mais bientôt la réaction est arrêtée. Dans l'un et l'autre cas, l'arrêt se produit au même moment chimique, savoir : quand le rapport des produits des masses actives des corps réagissants a atteint une même valeur constante. Ce fait est connu en chimie sous le nom de *loi de Guldberg et de Waage*. Il peut s'exprimer encore en disant que l'acte chimique cesse lorsque la force qui donne l'impulsion à une réaction est équilibrée exactement par celle qui détermine la réaction inverse.

Tel est le point qu'il y avait lieu de vérifier en soumettant à la compression des corps solides de nature chimique différente.

Pour des motifs d'ordre spécial, qu'il est superflu de rappeler pour le moment (*), nous avons fait choix de mélanges de sels dont l'un d'eux était rapidement soluble dans l'eau et, par conséquent, facile à éliminer au moment de l'analyse, tandis que l'autre était insoluble dans le même liquide. Nous avons comprimé d'abord un mélange de *sulfate de baryum* et de *carbonate de sodium* bien secs, puis, à titre de réaction inverse, un mélange de *carbonate de baryum* et de *sulfate de sodium*. Le résultat a répondu complètement à notre attente. Il s'est produit une double décomposition entre les réactifs, *et celle-ci a été arrêtée, dans l'un et dans l'autre cas, par la réaction inverse*. Ainsi donc, les réactions chimiques qui se passent entre les corps solides sous forte pression sont soumises à la loi qui régit les réactions des liquides miscibles ou des solutions. C'est que, incontestablement, le *processus* est le même dans les deux cas : entre l'état solide et l'état liquide il n'y a pas de différence essentielle, mais seulement une manifestation inégale d'une propriété commune : la *mobilité moléculaire*.

Il paraît donc établi que la solubilité réciproque des corps est non seulement une condition de leur agglutination à l'état solide, mais encore de leur combinaison chimique sous l'influence de la pression.

* * *

(*) *Bull. de l'Acad. roy. de Belgique*, 3^e sér., t. X, p. 204, 1885, et *Bull. de la Soc. chim. de Paris*, t. XLVI, p. 299, 1886.

Est-elle la seule condition nécessaire? Les expériences précédentes permettent, je crois, de répondre affirmativement en ce qui concerne l'*agglutination* ou la *soudure*, mais non en ce qui concerne la *réaction chimique*. Celle-ci est d'ordre plus compliqué. Elle comprend notamment un facteur qui n'entre pas en compte quand on provoque seulement la soudure de fragments d'une même espèce chimique; nous voulons parler de la *variation de volume* qui accompagne généralement la combinaison de deux corps.

Il arrive le plus souvent que le volume du produit de la combinaison de deux ou de plusieurs corps est plus petit que la somme des volumes des éléments non combinés. Par exemple, la formation du *sulfure d'argent* est accompagnée d'une contraction de 6.5 % du volume de ses éléments; c'est-à-dire que 100 volumes d'un mélange de soufre et d'argent, composé dans les proportions voulues par la formule du sulfure (Ag_2S), ne donneront que 93.7 volumes de sulfure d'argent. Nous désignerons une combinaison de ce caractère par le n° 1.

Le cas contraire se produit plus rarement. Un exemple nous est fourni par l'*hydrate de sulfure d'arsenic*, dont le volume est de 4.8 % plus grand que la somme des volumes de l'eau et du trisulfure d'arsenic anhydre, ainsi que nous l'avons constaté lors de l'étude de cet hydrate nouveau (*). Nous désignerons ces dernières combinaisons par le n° 2.

Eh bien, si l'on comprime, à la température ordinaire, un mélange d'éléments en état de produire une combinaison du n° 1, on observe que la pression favorise d'autant plus l'acte chimique que la solubilité réciproque des éléments est plus prononcée. Par exemple, l'*argent* et le *soufre* se combinent bien sous pression; ce métal passe d'ailleurs déjà à l'état de sulfure quand il est seulement exposé aux vapeurs de soufre. Au contraire, le *zinc* et le *soufre*, qu'on peut fondre dans un même creuset sans qu'il se forme, pour ainsi dire, de sulfure de zinc, ne se combinent guère mieux sous pression, bien que la contraction résultant de la combinaison soit de près de 5 % du volume des éléments.

Nous avons réalisé de la sorte, à froid, par la compression, un

(*) *Bull. de l'Acad. roy. de Belgique*, 3^e sér., t. XXX, p. 199, 1895.

grand nombre de combinaisons du n° 1, surtout des *sulfures* et des *arséniures* (*). L'ancien adage des chimistes : *Corpora non agunt nisi fluida*, ne peut donc plus être admis, comme autrefois, au pied de la lettre : c'est la vitesse de la réaction qui dépend en grande partie de l'état de fluidité de la matière, mais non la réalisation ou la non-réalisation de la combinaison.

Nous pouvons prévoir sans peine, à présent, les résultats que va fournir la compression des éléments des combinaisons du n° 2. Toute trace de réaction chimique fait défaut cette fois. Mais il y a plus : si l'on comprime le corps composé, préparé auparavant par les procédés chimiques ordinaires, on provoque sa *décomposition*. C'est ainsi que le *sulfure d'arsenic hydraté*, mentionné à l'instant, se résout en sulfure anhydre et en eau. Je citerai encore l'*acétate cuprico-calciqne*, qui est plus volumineux que ses composants immédiats. Sa décomposition se fait lentement, mais elle est d'autant plus commode à constater qu'elle a pour conséquence un changement de couleur frappant : l'*acétate double* est bleu foncé, tandis que les produits de sa décomposition, l'*acétate de cuivre mélangé d'acétate de calcium*, représentent un mélange vert clair (**).

*
*

Il n'y a donc pas de différence essentielle entre la force qui préside aux réactions chimiques, entre l'*affinité* en un mot, et la force de *cohésion* qui retient, unies les unes aux autres, les molécules dans un corps liquide ou dans un corps solide; elles sont, bien probablement, deux manifestations d'une même puissance. La cohésion, en effet, comme l'affinité, est intimement liée aux conditions de volume que les forces mécaniques contraignent les corps d'occuper. Si l'on diminue le volume d'une vapeur, on détermine sa condensation partielle : voilà bien un réveil de la cohésion; mais si l'on comprime de la glace à 0°, on opère son *dégel* sans lui fournir de la chaleur, parce que la glace occupe un plus grand volume que l'eau qui en résulte. C'est un cas évident d'affaiblissement de la cohésion, produit par la compression.

(*) *Bull. de l'Acad. roy. de Belgique*, 2^e sér., t. XLIX, p. 323, 1880, et 3^e sér., t. V, pp. 299 et 492, 1883.

(**) *Ibid.*, 3^e sér., t. XIII, p. 409, 1887.

Si l'état de la matière dépend de l'exercice de la cohésion, on reconnaîtra que cet exercice, à son tour, se trouve subordonné au volume que la matière est obligée d'occuper. Quand l'espace offert aux molécules est trop petit pour leur structure actuelle, celles-ci en prennent spontanément une autre, comme pour mieux s'emboîter dans l'espace qui leur est offert.

Nous avons pu réaliser de cette façon le passage de plusieurs substances d'un de leurs états allotropiques à un autre.

Nous avons transformé notamment du soufre de la variété dite *prismatique* en celle, plus dense, *octaédrique*; de l'*arsenic amorphe, noir*, a passé, sous pression, à l'état cristallin, etc., etc.

Ces faits étaient acquis depuis longtemps lorsqu'ils reçurent une éclatante confirmation par la production artificielle, à l'aide de la compression, de petits grains de *diamant*.

M. Moissan a montré, il y a quelques années, que le carbone dissous dans le fer fondu se transformait en *diamant* quant on prenait les dispositions nécessaires pour que la solidification eût lieu sous forte pression. On le voit, c'est là un cas particulier d'un principe général qui avait été reconnu, chez nous, depuis de nombreuses années.

A ces résultats se rattache un fait complémentaire; l'importance qu'il me paraît avoir pour notre connaissance de la matière en général me détermine à le mentionner. L'expérience a prouvé que la compression ne produit une diminution *permanente* du volume d'un corps solide que dans le cas où celui-ci admet un état allotropique plus *dense*. Quand cette condition n'existe pas, la compression ne diminue le volume du corps solide à une température donnée que pendant la durée de son exercice; sitôt rendu à lui-même, le solide revient exactement à son volume primitif. Il se comporte donc, à cet égard, comme un gaz proprement dit, dont le volume ne demeure réduit que pendant la durée de la compression (*). *Les solides sont, par conséquent, doués d'une élasticité aussi parfaite que les gaz*, et rien ne nous autorise, jusqu'à ce jour, à regarder comme réalisable la transformation, par des moyens mécaniques, d'un élément chimique en un autre, comme d'aucuns l'ont pensé.

* *

(*) *Bull. de l'Acad. roy. de Belgique*, 3^e sér., t. VI, p. 507, 1883.

Tous ces résultats nous disent pourquoi la compression seule des dépôts sédimentaires n'a pu causer la solidification de nos roches : c'est que la plasticité et la malléabilité font défaut aux matières premières.

Mais la nature a sans doute mis en jeu un facteur dont nous n'avons pas encore tenu compte : l'humidité.

On sait que la solubilité de beaucoup de corps dans l'eau est augmentée par l'effet de la pression. On pouvait légitimement se demander si des corps passant pour insolubles, par exemple le *sable*, ne manifesteraient pas un commencement de dissolution quand ils se trouveraient fortement comprimés au contact de l'eau.

Pour répondre à cette question, nous avons comprimé un grand nombre de corps solubles ou insolubles, non plus en poudre sèche, mais en poudre humide.

Le résultat général a été conforme à nos prévisions; il peut se résumer ainsi qu'il suit :

Le volume d'une solution n'est presque jamais la somme exacte du volume du dissolvant et de celui du corps qui s'est dissous. Le plus souvent, il est *plus petit*, c'est-à-dire que la solution est accompagnée d'une *contraction* de la matière; quelquefois, au contraire, il y a *dilatation*. Eh bien, tous les corps remplissant la première condition se sont soudés incomparablement mieux à l'état humide qu'à l'état sec. C'est que leur solubilité grandit avec la pression : le dissolvant se charge de matière et, quand la pression vient à cesser, il se comporte comme un *liquide sursaturé*. Il abandonne la substance dissoute au contact du restant du solide et il en cimente les grains. Au contraire, les corps satisfaisant à la seconde condition (*) se soudent mal à l'état humide, parce que le dissolvant emprisonné refond la matière quand la pression cesse.

Enfin, les corps passant pour insolubles dans l'eau et privés de malléabilité (**) se soudent mieux à l'état humide qu'à l'état sec. Nous avons obtenu des *agglomérés* dont la surface présentait un aspect extrêmement intéressant. Elle était vitreuse, transparente et semblait témoigner d'un commencement de liquéfaction. Le carbonate de

(*) Par exemple : l'iodure de potassium, le chlorure d'ammonium.

(**) Par exemple : le minium, le peroxyde de manganèse, l'hydrate de fer, le carbonate de calcium, etc.

cuivre était particulièrement démonstratif : tandis que le bloc formé par la compression de la poudre humide avait conservé, dans sa profondeur, la couleur vert pâle de la poudre, la surface était comme enduite d'une couche de *malachite*, verte et transparente. Les surfaces de cette nature rappelaient entièrement les surfaces de glissement qu'on rencontre dans nos roches anciennes; elles aussi sont généralement vitreuses jusqu'à une faible épaisseur et forment un enduit sur la roche grenue.

Il paraît donc que certaines substances, insolubles dans l'eau dans les conditions ordinaires, acquièrent la faculté de se dissoudre quand elles se trouvent fortement comprimées au contact de leur dissolvant. Il convient toutefois de ne pas perdre de vue que dans les expériences précédentes il ne s'est produit qu'une *dissolution superficielle*. Néanmoins, elle a suffi pour provoquer l'agglutination des solides.

* * *

Il est permis, à présent, de supposer que les grains de sable de nos grès, ou les cailloux roulés de nos poudingues, se sont enduits d'une *solution sursaturée d'acide silicique* par l'action de la pression, et que cette solution, *en équilibre instable*, a fourni le ciment nécessaire à la solidification.

Il n'est pas sans intérêt de constater qu'il existe véritablement entre les grains de sable des grès et les cailloux des poudingues un *enduit siliceux* échappant à l'observation directe.

L'acide silicique, en effet, même à l'état solide, sec, jouit de la propriété de se dissoudre lentement dans une solution de potasse ou de soude, tandis que les grains quartzeux sont réfractaires ou ne sont attaqués qu'avec une lenteur extrême.

Un bloc de grès ou de poudingue devra donc se désagréger dans une solution de potasse, s'il se trouve véritablement entre ses grains une couche de silice, quelque fine qu'elle soit.

L'expérience a pleinement confirmé cette déduction : toutes les roches quartzueuses ou schisteuses qui ont été examinées se sont *désagrégées* dans le liquide alcalin, mais avec une rapidité plus ou moins grande, selon leur nature. Les grès de formation relativement récente, tels que les grès tertiaires (landeniens) ou les grès secondaires (keupriques), n'ont demandé que quelques semaines pour se

désagréger à la température de l'eau *bouillante*, tandis que les grès plus anciens, les psammites et surtout les poudingues, ont opposé une résistance bien plus grande aux alcalis. Ils n'étaient devenus que plus ou moins friables, lorsque les premiers étaient déjà retournés à l'état de sable meuble. La raison de cette plus grande résistance est toute naturelle. Elle se trouve bien probablement dans cette circonstance que l'acide silicique qui cimentait les grains est passé plus complètement, dans la suite des temps, à l'état *quartzeux*, réfractaire à la solution de potasse.

Notre problème peut paraître résolu à la suite de ces essais; cependant tout doute n'est pas encore levé. Il reste notamment un point fondamental à élucider.

* * *

Il y a des roches compactes qui, ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, n'ont jamais eu à supporter les pressions énormes mises ici en jeu, savoir des pressions allant jusque 10,000 atmosphères. On peut citer, à cet égard, les *grès tertiaires* qui sont, de l'avis des géologues, des formations superficielles n'ayant pas eu à supporter une charge bien considérable. On doit donc s'assurer encore si une solution silicique traversant, par simple infiltration, une masse sableuse, est en état de la cimenter à la suite de l'évaporation lente de l'eau de dissolution.

A cette fin, nous avons essayé de *coller* du sable à lui-même, au moyen d'une solution d'acide silicique colloïdale.

On sait que l'acide silicique colloïdal, soumis à la dessiccation spontanée, lente, devient une masse vitreuse d'une grande dureté. Après avoir fait une pâte de sable et d'acide silicique, on l'a laissée se dessécher. L'agglutination du sable s'est montrée *absolument nulle*. La raison de ce résultat décourageant a été reconnue à la suite d'un examen microscopique de la matière. L'acide silicique avait adhéré, à la vérité, aux grains de sable; mais par suite de l'énorme contraction qui accompagne la dessiccation, il s'était *craquelé* dans tous les sens autour des grains de sable et il n'était demeuré qu'une masse meuble. La cause de l'insuccès étant connue, le remède s'indiquait de lui-même. En forçant les grains de sable à se rapprocher les uns des autres par une pression légère mais continue, de façon à suivre

le retrait de l'acide silicique (*), nous avons obtenu des parties solides, imitant assez bien les grès récents.

On le voit, ce procédé rappelle entièrement celui qu'on met en pratique quand on colle deux pièces de bois à l'aide d'une solution de gélatine. Si les pièces ne sont pas serrées l'une contre l'autre, de manière qu'elles se trouvent obligées à suivre le retrait de la colle pendant sa dessiccation, le collage manque de solidité, quand il n'est pas tout à fait compromis. Le serrage ne doit pas être extrême, sinon la colle serait exprimée des joints; il suffit qu'il réponde à la condition de faire suivre au bois le retrait de la gélatine.

La solidification des roches peut donc aussi avoir eu lieu, dans la nature, à la suite d'une infiltration d'eaux siliceuses, accompagnée d'une compression d'intensité relativement faible, mais ayant duré longtemps. La coopération de ces facteurs paraît indispensable, car la pression seule, comme l'infiltration seule, est inefficace, autant qu'on peut conclure des expériences de laboratoire.

La solidification des roches calcaireuses peut également être ramenée à un procédé analogue. Les débris de coquilles imprégnés d'une solution de carbonate calcique, d'autant plus concentrée que la pression était plus grande, ont pu se souder à la faveur du départ de l'anhydride carbonique par diffusion dans l'atmosphère et de la cristallisation lente du sel calcaire primitivement dissous.

* * *

Je n'abuserai pas davantage, Mesdames et Messieurs, de votre bienveillante attention, et je ne ferai pas l'énumération des problèmes qui se rattachent encore aux faits que j'ai eu l'honneur d'exposer. Je me permettrai pourtant encore une remarque, parce que celle-ci peut servir d'encouragement aux travailleurs, surtout aux jeunes travailleurs, parfois prompts à se rebuter quand ils voient leurs premiers efforts ne pas recevoir le couronnement espéré.

Le point de départ des recherches présentes se trouvait dans la pensée que la compression pouvait avoir été l'unique cause de la solidification des roches. Cette pensée faisait naître un parallèle,

(*) Le détail de ces expériences, encore inédites, fera objet d'une note spéciale.

pour ne pas dire une analogie, entre les glaciers gigantesques qui couvrent des étendues considérables et nos terrains de sédiment. Les glaciers doivent en effet leur origine aux milliards de flocons de neige qui se sont soudés lentement par la compression développée par leur poids. Les roches auraient dû leur solidification à un procédé semblable. La formation des uns et des autres aurait été ramenée, alors, à une seule et même cause.

L'expérience a cependant prouvé que cette simplification ne répondait pas à la réalité : pour agglutiner les éléments des roches, il faut, en première ligne, un ciment, tandis que la glace se soude immédiatement à elle-même. Le point de départ était donc erroné. Néanmoins, les investigations qui ont révélé cette erreur ont porté des fruits inattendus et nous ont dévoilé des propriétés jusqu'alors inconnues chez les corps solides.

Il suffit donc d'entreprendre la lutte contre l'inconnu et de persévérer dans le combat, même si l'on suit un plan fautif et si l'on se sert d'armes défectueuses, pour récolter quelques fruits; c'est que, comme le disait notre regretté et éminent confrère J.-C. Houzeau, dans un de ses plus charmants écrits : « La nature a toujours des fleurs pour celui qui la cultive ».