

Sur l'apparition dans l'état solide de certaines propriétés caractéristiques de l'état liquide ou gazeux des métaux.

(*Bulletins de l'Académie royale de Belgique*, 3^e sér., t. XXVIII, pp. 23 à 46, n^o 7, 1894.)

INTRODUCTION.

J'ai entrepris de vérifier, il y a déjà longtemps, si certaines propriétés caractéristiques de l'état liquide ou gazeux de la matière se retrouvent dans l'état solide à un degré plus ou moins atténué. Mes premières expériences remontent à l'année 1878 (*). Elles ont établi que la cohésion peut s'exercer entre des fragments d'un même corps solide, comme elle s'exerce entre des gouttes d'un liquide, dès que ceux-ci se trouvent réellement en contact. Cette condition étant réalisée, des particules d'un corps solide se soudent pour ne plus former qu'un bloc, de même que les gouttes de liquide se confondent en une masse sitôt qu'elles se touchent.

Des recherches ultérieures, assez nombreuses (**), ont montré que

(*) *Bulletin de l'Académie royale de Belgique* (2), t. XLV, p. 746, 1878.

(**) Voir surtout :

a) Recherches sur la propriété que possèdent les corps de se souder sous l'action de la pression. (*Bull. de l'Acad. roy. de Belgique* [2], t. XLIX, p. 323, 1880.)

b) Formation de quelques arséniures métalliques par l'action de la pression. (*Id.* [3], t. V, p. 229, 1883.)

c) Formation de sulfures métalliques sous l'action de la pression. Considérations

la propriété de se souder sous pression n'est pas également développée chez tous les corps. Elle est d'autant plus complète, à égalité de pression, que la matière est plus déformable par l'action des forces mécaniques, ou, en d'autres termes, que son *frottement intérieur* est plus petit.

La mise en contact de deux particules solides, par simple application sous pression, ne suffit pas toujours pour obtenir qu'elles se soudent; mais le résultat est parfait si l'action de la pression s'accompagne d'une sorte de *pétrissage* provenant de l'insuffisance de résistance intérieure des grains de matière solide. Ce fait me paraît avoir une importance capitale, non seulement parce qu'il met bien en évidence un côté commun à l'état solide et à l'état liquide, mais encore parce qu'il éclaire le mécanisme du *brasage à froid* de la matière. Je développerai ce point dans un article à venir; néanmoins, il me sera permis de remarquer, à présent, que si l'on déforme une pièce de métal par *emboutissage* ou pétrissage, on modifie nécessairement l'ordre dans lequel les molécules se trouvaient primitivement unies l'une à l'autre: on intercale entre des parties, d'abord adhérentes, d'autres parties qui n'étaient pas immédiatement unies à celles-ci.

La déformation permanente apparaît donc comme le résultat d'une suite d'arrachements de molécules durant un instant si court que l'exercice de la cohésion n'a pas le temps de se suspendre. Si l'on pétrit des particules actuellement séparées, on peut concevoir également que, pendant l'intercalation d'une partie dans une autre, la cohésion, interrompue un instant entre des parties ayant fait pri-

qui en découlent touchant les états allotropiques du phosphore et du carbone. (*Id.* [3], t. V, p. 492, 1883.)

d) Sur l'élasticité parfaite des corps solides chimiquement définis. Analogie nouvelle entre les solides, les liquides et les gaz. (*Id.* [3], t. VI, p. 507, 1883.)

e) Réaction du carbonate de sodium et du sulfate de baryum sous l'influence de la pression. (*Id.* [3], t. X, 1885.)

f) Réaction du carbonate de baryum avec le sulfate de sodium sous l'influence de la pression. (*Bull. de la Soc. chim. de Paris*, t. XLVI, p. 299, 1886.)

g) Bildung von Legierungen durch Druck. (*Berliner Berichte*, t. XV, p. 595.)

h) Sur les phénomènes qui accompagnent la compression de la poussière humide des corps solides en rapport avec la plasticité des roches. (*Ann. de la Soc. géolog. de Belgique*, t. XV, p. clvi, 1888.)

mitivement corps, reprenne entre celles-ci et la matière affluente.

J'ai pu constater, il y a déjà près de douze années, que cette *reprise* de la cohésion n'est en aucune façon subordonnée à la condition d'agir sur des particules de même nature chimique. On se le rappelle, je suis parvenu à obtenir, à froid, par le simple pétrissage sous pression de mélanges de métaux différents, des alliages divers: du bronze, du laiton, et plus facilement encore un grand nombre d'alliages fusibles formés de bismuth, de plomb, d'étain, de cadmium, en proportions diverses. En outre, en comprimant des mélanges de métaux et de métalloïdes, j'ai pu constater leur conversion en combinaisons chimiques; l'énergie mécanique avait dans ce cas réveillé, d'une façon plus nette encore que dans celui des alliages, l'affinité qui se manifeste en général entre des éléments de nature différente.

Ces faits, et bien d'autres qu'il est superflu de rappeler ici, démontrent assez, je pense, qu'il n'y a pas entre l'état liquide et l'état solide de la matière une différence aussi grande qu'un premier examen peut le faire croire. Les recherches sur la température critique ont permis de reconnaître que les liquides et les gaz sont en continuité de propriétés; de même, les faits que je viens de rappeler montrent que l'état solide n'est souvent qu'un prolongement de l'état liquide: les dernières traces de celui-ci ne disparaissent que si un arrangement moléculaire spécial, stable au-dessous d'une certaine température, arrive à se réaliser. En un mot, les trois états principaux de la matière, tels qu'on les conçoit généralement, ne sont que des degrés extrêmes d'une forme moyenne.

Cette manière d'envisager la matière conduit à des conséquences nombreuses, sur la vérité desquelles l'expérience est seule en état de nous renseigner. J'ai pu reprendre cette vérification, interrompue depuis plusieurs années par suite de travaux extraordinaires dont j'ai dû m'acquitter.

Je me permets de présenter aujourd'hui à l'Académie les résultats que j'ai pu observer. Ils démontrent que des parties d'un même métal, ou de métaux différents, se soudent l'une à l'autre, même en dehors de toute pression et à une température bien inférieure au point de fusion; bien plus, il en est qui se volatilisent dans les mêmes conditions; en un mot, les métaux se comportent alors comme s'ils étaient liquéfiés par la chaleur.

Il sera utile, je pense, de faire précéder la relation des expériences par l'exposé des considérations théoriques qui ont formé le point de départ de ces recherches. On verra facilement de cette façon comment elles se rattachent à la question de la continuité des propriétés dans les trois états de la matière.

D'après la théorie cinétique admise généralement aujourd'hui, l'état gazeux est caractérisé par l'indépendance relative des molécules. Celles-ci cheminent en ligne droite jusqu'à ce qu'un obstacle les oblige à briser leur trajectoire. La vitesse dont elles sont animées est en relation directe avec la température du gaz. Or, cette vitesse n'est pas la même pour toutes les molécules : il en est qui, par suite des chocs reçus ou donnés, marchent plus ou moins vite; leur force vive répond donc à une température plus ou moins élevée. On peut dire, pour abrégé le langage, que dans un gaz donné il y a, à chaque instant, des molécules *plus chaudes* et des molécules *plus froides*; tandis que le thermomètre ne nous renseigne que sur la valeur moyenne de la température régnante et en aucune façon sur ses valeurs extrêmes.

On sait combien cette conception a trouvé d'appuis dans l'étude des phénomènes de dissociation chimique des gaz; car elle est, à présent, seule en état d'expliquer d'une manière lucide les phénomènes contradictoires, à première vue, que l'on observe dans les réactions dites *réversibles*. Je ne m'appesantirai pas sur ce point; je ne rappellerai pas non plus comment cette idée s'applique aussi à l'état liquide, mais je ferai remarquer que si les trois états de la matière sont, jusqu'à un certain point, en continuité de propriété, on est conduit à appliquer aussi cette hypothèse à l'état solide et à se demander alors à quelles conséquences on arrivera.

Supposons donc que dans une masse solide les molécules puissent vibrer avec des vitesses différentes par suite d'un défaut d'orientation dû à un état amorphe ou à tout autre motif; on concevra alors, sans peine, qu'il doit exister, pour chaque solide fusible, une température à partir de laquelle les vitesses des molécules vibrant le plus vite, correspondent, pour un instant, à la température de fusion et au delà. Ces molécules jouiront donc des propriétés caractérisant l'état liquide; on peut dire, en un mot, qu'elles représentent des molécules liquides. D'après cela, un corps solide, fusible, aurait en lui, à partir d'une certaine température, variant d'une espèce à l'autre, de

la *fluidité*. La mollesse d'un corps, ou son degré de ramollissement à une température donnée, serait une expression du rapport du nombre des molécules à propriétés de fluides au nombre de toutes les autres molécules à propriétés *de solides*.

Remarquons encore que l'écart des vitesses extrêmes de vibration sera nécessairement le plus grand dans la région où les molécules trouvent un champ plus grand pour leur mouvement. La *surface* d'un corps sera plus riche en molécules à grands écarts de vitesse que la masse elle-même; elle sera donc caractérisée par une mollesse plus grande.

Cette conclusion est identique, au fond, à celle que notre savant confrère G. Van der Mensbrugghe a formulée dans notre dernière séance, en développant ses idées sur les attractions moléculaires dans les liquides et dans les solides (*), à savoir « que la densité d'un corps solide est souvent, sinon toujours, moindre dans la couche superficielle qu'à l'intérieur de la masse d'un pareil corps ». Il n'est pas sans utilité de constater cette rencontre alors que nous nous trouvons engagés, l'un et l'autre, dans des voies différentes et que nous ne nous sommes même pas trouvés en correspondance dans ces derniers temps. Elle accuse peut-être un grand fonds de vérité dans notre conclusion.

Mais je reviens à notre sujet.

La conclusion prérappelée est susceptible de vérification expérimentale. En effet, si l'on met au contact deux corps solides, de même nature ou non, ils devront se souder à partir de la température qui admettra, à la surface de jonction, des mouvements moléculaires correspondant à l'état fondu. Avec le temps, le nombre des attaches ira grandissant, car les molécules confondues restent acquises pour la soudure, puisqu'elles ne se sépareront que par la volatilisation, de sorte que l'effet peut être considéré comme un produit de la température par le temps, sans l'intervention d'une pression mécanique ou d'un pétrissage.

Mieux encore, pour les métaux dont le point de volatilisation n'est pas extrêmement élevé, il y a lieu de s'attendre, pour les raisons

(*) Remarques sur la constitution de la couche superficielle des corps solides. (*Bull. de l'Acad. roy. de Belgique* [3], t. XXVII, p. 877, 1894.)

développées plus haut, à une *sublimation* au-dessous du point de fusion, de sorte que les propriétés des liquides se retrouveraient dans les solides, non seulement par la facilité de l'exercice de la cohésion, mais encore par une tension de vapeur réelle à la surface.

Je l'ai déjà annoncé, ces prévisions se vérifient d'une manière complète, comme on pourra en juger.

DESCRIPTION DES ESSAIS.

Matières employées. — Les expériences ont été faites à l'aide de l'acier, de l'aluminium, de l'antimoine, du bismuth, du cadmium, du cuivre, de l'étain, de l'or, du platine, du plomb et du zinc. Elles se divisent en trois séries.

La première comprend la vérification de la soudure de métaux de même espèce; la deuxième, la soudure de métaux d'espèces différentes, et la troisième a pour objet de constater la volatilisation superficielle de quelques métaux bien au-dessous de leur point de fusion.

Préparation des surfaces de contact. — Les métaux ont été employés en cylindres de 0^m02 de diamètre et de quelques centimètres de hauteur (excepté pour l'or et le platine), pour faciliter le travail. Ils étaient destinés à se toucher par leur base.

Celle-ci a donc été dressée avec un soin spécial. A l'aide d'un tou. de précision, dont le burin était commandé par une vis micrométrique, j'ai pu ajuster les surfaces à une fraction d'un centième de millimètre près. Il faut avoir soin de laver au benzol, non seulement le burin, mais encore le mandrin du tour, de manière qu'il ne se produise aucune condensation de vapeurs grasses sur la surface métallique en préparation. D'autre part, celle-ci ne peut rester exposée à l'air qu'un temps très court, sinon le succès de l'expérience est compromis. Il convient donc de façonner, tout de suite, les deux surfaces et de les appliquer l'une sur l'autre, aussitôt terminées.

On constate alors qu'elles adhèrent déjà à la température ordinaire, excepté dans le cas du platine. L'adhérence est plus ou moins forte, selon la nature du métal.

Cette différence démontre que l'adhérence ne peut être attribuée exclusivement à la pression atmosphérique, mais qu'elle dépend

aussi de l'espèce de métal. On le voit, le fait anciennement connu de l'adhérence du plomb au plomb, après rafraîchissement de la surface de contact, doit être généralisé; il apparaît plus ou moins chez tous les métaux que j'ai essayés : au plus haut degré chez l'or, le plomb et l'étain; le moins chez le platine et l'antimoine.

J'ai essayé de mesurer cette adhérence en déterminant le maximum de poids que peut supporter chaque couple métallique, mais les résultats, différant trop entre eux, ne méritent pas d'être reproduits.

Étuve à chauffer. — Les couples de cylindres, préparés ainsi qu'il vient d'être dit, ont été portés à la température voulue au moyen d'une étuve thermostat à air, chauffée au gaz. Une triple enveloppe garnie d'asbeste la défendait contre le refroidissement.

En assurant la constance de la pression du gaz au moyen d'un régulateur, on arrivait à régler la température à 2° ou 3° près, quand le thermomètre stationnait à 400° (*).

Les cylindres métalliques étaient maintenus au contact dans un étrier, par serrage, à la main, d'une vis de pression, comme le montre la figure 1. L'étrier était déposé sur un support en carton d'asbeste assez épais pour empêcher l'échauffement par le contact direct des parois de l'étuve. Il y a tout lieu d'admettre que les indications du thermomètre correspondaient bien à la température vraie des cylindres.

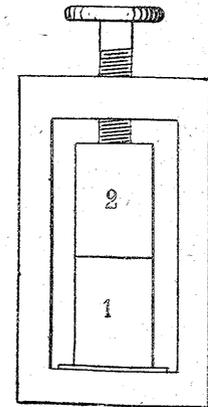


FIG. 1.

PREMIÈRE SÉRIE D'ESSAIS.

Cylindres de métal de même espèce. — Le tableau ci-après reproduit, pour chaque espèce de métal, la température à laquelle les cylindres ont été portés, ainsi que la durée approchée de la chauffe.

(*) Ce thermomètre spécial pour les hautes températures a été construit par M. Baudin, de Paris.

Tous ces métaux, hormis l'antimoine et, jusqu'à un certain point, le bismuth, se sont soudés au point de ne plus former, pour ainsi dire, qu'une masse, chaque fois que leur surface a pu être préparée de manière à réaliser un contact irréprochable.

Nos	MÉTAUX.	Température.	Durée de la chauffe.
1	Antimoine	395°	12 heures.
2	Aluminium	418°	8 heures.
3	Bismuth	240°	7 heures.
4	Cadmium	295°	5 heures.
5	Cuivre	403°	8 heures.
6	Étain.	190°	8 heures.
7	Or	400°	4 heures.
8	Platine	400°	4 heures.
9	Plomb	300°	6 heures.
10	Zinc	385°	3 heures.

Pour donner une idée de la solidité de cette soudure, je dirai que j'ai pu serrer chacun de ces cylindres dans le mandrin américain du tour, par l'une des extrémités, et tourner l'autre brutalement (*) en l'air, sans qu'elle se détachât; toute trace de joint disparaît absolument dans ces conditions. On sait que si une pièce n'est pas absolument cintrée, elle est sujette, sur le tour, à des chocs violents aussi longtemps que le copeau ne se déroule pas régulièrement. L'épreuve du tour n'est donc pas sans valeur.

N'ayant pu séparer les cylindres par le travail du tour, je les ai soumis à la torsion après avoir serré l'un des bouts dans un étau et saisi l'autre à l'aide d'une pince de gazier. On arrive ainsi à les séparer. La surface de séparation passe, de çà et de là, par la surface-

(*) L'épaisseur des copeaux était poussée jusqu'à *broutage* du burin.

primitive d'application des deux cylindres, où, par suite de l'imperfection du contact, la soudure n'a pas eu lieu, mais partout ailleurs c'est une véritable surface d'arrachement que l'on obtient.

Ce fait s'observe avec la plus grande évidence quand on a affaire à des cylindres de métaux différents, comme on le verra plus loin.

Il va de soi que la résistance à la torsion a varié avec la nature des métaux. Pour les corps mous, comme le plomb et l'étain, il a fallu presque écraser les cylindres à l'aide de la pince pour arriver à les détacher par un mouvement de torsion.

Le résultat obtenu à l'aide de l'aluminium me paraît d'autant plus remarquable que l'on a rencontré des difficultés pour souder ce métal. Il ne semble néanmoins pas que le procédé qui a réussi ici soit susceptible d'une application en grand, vu le soin extrême que réclame la préparation des surfaces à réunir.

L'antimoine, avons-nous vu, a donné un résultat nul ou à peu près : il a été possible de séparer à la main les parties réunies. Ce fait vient à l'appui des considérations théoriques qui ont été l'origine de ce travail. En effet, l'antimoine est un corps *aigre, cassant*, n'ayant pas de *fluidité* en lui. Dans des matières de ce genre, avons-nous dit, les molécules vibrent *en cadence*, régulièrement, de manière à ne pas faire naître entre elles des vitesses différentes. Il n'y a donc pas lieu de s'attendre à voir fonctionner certaines d'entre elles comme si elles étaient arrivées à la température du corps fondu, alors même que la température s'élèverait jusque dans le voisinage du point de fusion.

Cette conclusion serait naturellement à rejeter, si la matière admettait des états allotropiques se produisant, sous pression donnée, à des températures données. Il y aurait lieu alors d'examiner chaque cas, afin de ne pas s'égarer dans des considérations générales.

Comme état allotropique, il est peut-être permis de considérer cet état où les molécules peuvent vibrer avec des vitesses différentes, auquel nous attribuons la mollesse d'un solide. Alors un corps cristallisé, mais mou, l'étain, par exemple, nous apparaît comme formé, à une température donnée, de cristaux qui doivent être aigres, réunis par la matière allotropique plus molle et *moins dense* par suite de l'irrégularité des mouvements moléculaires. Si la température vient à baisser suffisamment, il peut arriver que les différences des vitesses moléculaires soient atténuées au point de devenir

sans effet. Le métal sera aigre alors dans toute sa masse au point que les cristaux se sépareront. C'est bien ce que l'on constate quand on expose de l'étain à un froid extrême. Cette matière allotropique unissante doit aussi entrer plus vite en réaction chimique, puisqu'elle fonctionne comme si elle était à température plus élevée. N'est-il pas possible que l'apparition du damas à la surface des métaux cristallisés, par des actions chimiques diverses, soit due à cette circonstance ?

Les expériences coûteuses avec l'or et le platine ont été entreprises en vue de vérifier si la soudure des métaux est véritablement plus facile quand on exclut, d'une manière radicale, la possibilité d'une oxydation des surfaces. On le voit, le platine a été exposé, comme le cuivre, à 400°, c'est-à-dire près de 1600° au-dessous de son point de fusion ; néanmoins la soudure a eu lieu, mais il est à remarquer que, conséquemment avec cette différence de température, la soudure n'a pas été aussi solide que celle du cuivre. La même remarque ne s'applique pas à l'or.

Les résultats que je viens de faire connaître soulèvent une question à laquelle il faut encore répondre.

Les surfaces appliquées l'une contre l'autre dans les expériences précédentes, bien que dressées à une fraction d'un centième de millimètre près, ne sont pas absolument planes ; elles ne se touchent, en somme, qu'en quelques points au moment où elles sont portées à l'étuve. Si l'on prend pour élément de comparaison les dimensions moléculaires, on doit reconnaître que l'on a affaire à des surfaces profondément vallonnées, ne pouvant se toucher que par une série de sommets à même hauteur.

On doit donc se demander comment il est possible que l'adhérence des cylindres soit si forte. La réponse à cette question est donnée par une expérience bien simple, qui vient également à l'appui de la théorie.

Après avoir dressé la base d'un cylindre de cuivre, j'y ai inscrit, à l'aide du tour, une spirale de 2 centièmes de millimètre de profondeur. J'ai réalisé de cette façon

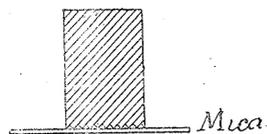


FIG. 2.

un vallonnement dont la figure 2 représente la coupe.

Le cylindre, dont le poids était de 150 grammes, fut déposé sur une feuille de mica, dans l'étuve, et chauffé à 400° pendant huit

heures. On voit alors, à l'œil nu déjà, et mieux encore au microscope, que la spirale qui s'appliquait sur le mica s'est complètement affaissée, comme si le métal avait été ramolli au point de fluer. Le mica, moins dur cependant que le cuivre, a fait impression dans celui-ci. On conçoit alors aisément que si deux cylindres métalliques sont superposés, les aspérités de leur région de contact s'affaissent continuellement, jusqu'à permettre l'établissement d'un contact suffisant, sinon parfait.

L'explication de ce fait est facile à donner, si l'on admet notre point de départ. A partir d'une certaine température, le cuivre compte des molécules exécutant des mouvements instantanés correspondant à l'état liquide. Lorsque le fait se produit sur un sommet soumis à un effort de compression provenant du poids de la pièce, le sommet ne résiste plus, il se déforme d'une manière permanente par déplacement de matière. Le nivellement complet d'un vallonnement ne doit être qu'une question de temps.

On remarquera qu'il ne résulte en aucune façon, de ce qui précède, qu'une masse métallique un peu épaisse doive finir par s'affaisser totalement sous son poids. En effet, dans une masse assez épaisse il doit rester, à chaque instant, une proportion énorme de molécules ayant des vitesses correspondant à l'état solide, et assurant, dès lors, la rigidité de la masse. L'affaissement ne se produira que si, par une élévation suffisante de la température, la proportion des molécules vibrant comme à l'état liquide prend le dessus. Alors le ramollissement du métal deviendra de plus en plus complet.

DEUXIÈME SÉRIE D'ESSAIS.

Cylindres de métaux d'espèce différente. — Dans ces essais, j'ai appliqué l'un sur l'autre des cylindres de métaux différents, en vue de contrôler les résultats précédents. Il est clair, en effet, que si la soudure de deux cylindres de même nature se fait à la suite d'une sorte d'*interfusion* des métaux, il doit se produire, avec facilité, des alliages au contact de métaux de nature différente. L'épaisseur de l'alliage formé fournira, en outre, des renseignements précis sur la diffusion des métaux, l'un dans l'autre, à l'état qualifié de solide.

J'ai opéré sur des couples de cylindres devant donner des alliages

à point de fusion relativement élevé et des alliages *dits fusibles*.
Le tableau suivant renseigne sur ces couples, ainsi que sur les conditions de température et de durée :

Nos	COUPLES DE MÉTAUX.	Température.	Durée de la chauffe.
1	Cuivre-zinc	400°	6 à 8 heures.
2	Cuivre-cadmium	295°	5 heures.
3	Cuivre-étain.	190°	8 heures.
4	Cuivre-bismuth.	280°	4 heures.
5	Cuivre-plomb	300°	6 heures.
6	Cuivre-antimoine	395°	4 heures.
7	Cuivre-aluminium	400°	8 heures.
8	Fer-zinc	400°	8 heures.
9	Plomb-zinc	300°	5 heures.
10	Plomb-bismuth.	222°	7 heures.
11	Plomb-antimoine	265°	8 heures.
12	Plomb-étain	180°	8 heures.

Examinons d'abord les huit premiers couples, qui fournissent des alliages à point de fusion plus élevé.

Tous ces couples de métaux étaient complètement soudés après leur séjour dans l'étuve. En cassant, par torsion, à l'aide de la pince de gazier, les couples 1, 2, 5, 8, on constate une soudure si parfaite que la surface d'arrachement ne passe plus du tout par la surface primitive d'application, mais elle traverse le zinc, le cadmium et le plomb, de manière à abandonner la plus grande partie de l'alliage sur le cuivre, respectivement sur le fer.

Pour mesurer, approximativement, l'épaisseur des alliages produits par le zinc et le cadmium sur le cuivre, j'ai découpé leur surface sur le tour en avançant de quelques centièmes de millimètre à chaque passe du burin, et j'ai soumis les copeaux à un essai qualitatif. J'ai pu constater que le zinc et le cuivre s'étaient alliés sur environ huit

dixièmes de millimètre, et le cadmium et le cuivre sur environ cinq dixièmes.

Ces quantités sont énormes et témoignent de la grande diffusibilité, à l'état solide, de ces métaux.

Les couples 3, 4, 6 et 7 ont donné des résultats moins parfaits, en ce sens du moins que l'épaisseur de l'alliage est restée assez faible. Néanmoins, la couleur du bronze d'étain et d'aluminium, et surtout la couleur violette, si caractéristique de l'alliage d'antimoine et de cuivre, ont apparu avec toute leur évidence.

Le couple zinc-plomb, n° 9, a donné un résultat tout à fait en rapport avec la faible solubilité du plomb dans le zinc. La cassure a passé dans le zinc, tout au moins est-il resté sur le plomb une couche de métal plus clair et plus dur; mais l'épaisseur en est faible.

Passons maintenant aux couples 10, 11 et 12, qui donnent des alliages fusibles.

Si l'on place un cylindre de plomb sur un cylindre d'étain, dans l'étuve, à une température de 185°, sans autre précaution, on retrouve, au bout de quelque temps, une coulée complète de l'alliage des deux métaux. Cette manière d'opérer ne nous renseigne donc pas sur la manière dont les métaux se pénètrent. En vue de lever la difficulté, j'ai pris l'arrangement suivant : J'ai tourné un petit enfoncement d'une fraction de millimètre dans l'un des métaux, au centre du cylindre, et j'y ai placé un cercle de mica exactement ajusté. De cette manière, les deux cylindres ne se touchaient plus directement que par un espace annulaire, et si l'alliage formé s'écoulait, le reste des deux cylindres demeurait debout.

Le résultat obtenu est bien démonstratif. La figure 3 nous montre comment les choses se disposent. Autour de la lame de mica, là où les métaux se touchaient, il y a eu formation d'alliage sur l'épaisseur totale de 15 millimètres, dont 9 dans l'étain et 6 dans le plomb. Après écoulement de l'alliage, les cylindres sont restés échancrés d'autant. On remarquera qu'à 185° l'étain est plus près de son point de fusion que le plomb, il doit donc se creuser plus vite que le plomb;

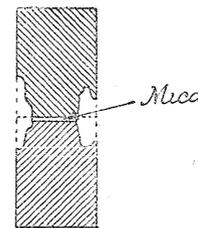


FIG. 3.

du moins notre théorie le veut ainsi et l'expérience constate le fait.

Dans le couple plomb-bismuth, on a deux métaux dont les points

de fusion ne sont pas si éloignés l'un de l'autre; aussi l'*interfusion* de ces métaux est-elle plus égale. Au contraire, dans le couple antimoine-plomb, on a une différence de près de 100° dans les points de fusion; de plus, chose également importante, l'antimoine ne paraît pas admettre une grande différence dans les vitesses moléculaires absolues (voir plus haut). Ces deux motifs déterminent une circulation plus active de matière dans le plomb; celui-ci s'est creusé de 8 à 9 millimètres, tandis que l'antimoine n'a cédé que d'environ 2 millimètres.

Il est bien entendu que, pour apprécier complètement ces différences de *creusement*, il faudrait encore tenir compte des compositions spéciales possibles des divers alliages. Quoi qu'il en soit, le procédé de formation de ces alliages paraît être le suivant : Sitôt que la température a atteint une hauteur suffisante, bien qu'inférieure encore au point de fusion de l'alliage, la diffusion des métaux commence et donne lieu à un alliage dont la fluidité n'est pas d'abord assez grande pour en permettre l'écoulement, parce que sa composition n'est pas normale. Avec le temps, la dissolution des métaux encore libres s'achève dans la partie déjà formée, et l'alliage s'écoule quand sa quantité est devenue suffisante. Ainsi, pour le couple étain-plomb, l'écoulement a eu lieu après formation de 10^{gr},5 d'alliage; pour le couple bismuth-plomb, après 10 grammes, et pour le couple antimoine-plomb, après formation de 26 grammes d'alliage.

TROISIÈME SÉRIE D'ESSAIS.

Volatilisation du cadmium et du zinc au-dessous de leur point de fusion. — Si véritablement les molécules de la surface d'un corps plus ou moins mou s'animent de vitesses assez différentes, à un moment donné, pour que nombre d'entre elles fonctionnent comme si elles appartenaient à un corps liquide, il s'ensuit naturellement que l'on pourra observer même des phénomènes de vaporisation, d'autant plus intenses que l'on aura affaire à des métaux plus volatils.

J'ai vérifié cette conséquence au moyen du cadmium et du zinc, d'une façon complète. A cet effet, j'ai tourné dans l'un des cylindres de ces métaux une cavité dont la profondeur la plus grande

a été de 0^m,0008, puis j'ai appliqué un cylindre de cuivre sur celui-ci (voir ci-contre) et exposé le tout dans l'étuve, à 360°-400° pour le couple zinc-cuivre, et 295°-500° pour le couple cadmium-cuivre.

La volatilisation doit se manifester, dans cet arrangement, par la formation sur la surface libre du cuivre, au dessus de la cavité, d'un alliage de couleur jaune ou jaune-brun facile à reconnaître. Le résultat ne laisse rien à désirer. Si l'on a soin de défendre le cuivre contre l'action de l'air, en ajustant parfaitement le joint, il se couvre d'une couche jaune d'or, de couleur identique à celle du tombac. Il se produit, en un mot, du laiton comme dans le procédé de fabrication des tresses lyonnaises, où l'on expose du cuivre à des vapeurs de zinc.



Fig. 4.

On peut se demander si, dans cette expérience, le transport du zinc ou du cadmium, dans la région du cuivre couvrant la cavité, n'est pas dû à une diffusion latérale de l'alliage formé sur la région du contact immédiat des métaux, ou si l'électricité n'entre pas en jeu ici, d'autant plus que les cylindres métalliques sont enfermés, comme on l'a vu, dans un étrier en fer, et qu'ils forment dès lors une pile thermo-électrique complète. Pour répondre à ces questions, j'ai placé entre les métaux, dans d'autres expériences, des lames de mica percées d'une ouverture correspondant à la cuvette. L'effet a été le même. Il faut donc en conclure que l'on est réellement en présence d'un phénomène de volatilisation de métaux au-dessous de leur point de fusion.

Des faits de cette espèce n'ont pas encore été décrits, si je ne m'abuse. M. A. Van Riemsdyck a fait, en 1869 (*), un travail sur la volatilisation de divers métaux; il dit que le zinc commence à se volatiliser peu *au-dessus* de son point de fusion. Mais M. Van Riemsdyck s'est servi de la balance pour constater la volatilisation : l'apparition du tombac sur le cuivre est un procédé autrement sensible.

J'ajouterai encore que l'on trouve sur le zinc, en regard du cuivre, un enduit brunâtre, facile à enlever, dans lequel il est possible de

(*) *Jahresbericht*, 1869, p. 993.

constater du cuivre par l'analyse qualitative. Il en résulte donc que le cuivre est aussi faiblement volatil aux environs de 400°.

Ces métaux sont donc à comparer, sous le rapport de leur volatilité, au musc et à d'autres substances analogues qui émettent de leur matière d'une manière continue, comme nous le constatons par l'odorat, mais qui ne perdent pas sensiblement de leur poids, même au bout d'un temps très long.

CONCLUSIONS.

Les expériences que je viens de faire connaître prouvent, je crois, que les premières manifestations de la liquidité apparaissent dans certains corps solides au-dessous de leur point de fusion. L'écart de température peut être différent selon la nature de la matière et son état cristallin. S'il n'est pas prématuré de généraliser les faits, encore peu nombreux, de ce travail, on peut dire que, dans les corps à pouvoir cristallin prononcé, les premiers symptômes de la liquidité n'apparaissent que très près de la fusion; ces corps sont aigres, cassants, il n'est guère possible de les mouler par pression. D'autre part, les corps amorphes, et même nombre de substances incomplètement cristallisées, ou admettant des états allotropiques différents, se comportent comme les corps qui se ramollissent avant de fondre. A de basses températures, lorsque la liquidité n'est pas encore éveillée, ils sont cassants comme le verre, ne se soudent pas, même sous l'action de la pression. (Voir mes travaux de 1889.) Quand la température s'élève et que les premiers vestiges de fluidité peuvent se transmettre par quelques molécules, une pression énergique, accompagnée d'un pétrissage ou malaxage, produit leur soudure ou leur moulage (emboutissage). Enfin, quand la proportion de molécules correspondant à la fluidité est devenue plus grande encore, ces corps se soudent par simple application.

Ces degrés se vérifient facilement avec l'ambre, le verre, etc., qui ne se soudent sous pression qu'à une température donnée (*).

(*) Ce fait, que j'ai démontré en 1880, a été le point de départ de l'industrie de l'ambroïde.

Pour expliquer ces faits, il suffit d'admettre que, dans les corps solides, comme dans les corps liquides et les gaz, les molécules ne vibrent pas toutes avec la même vitesse à une température donnée. La cause des différences de vitesse serait dans les chocs résultant de l'absence d'orientation suffisante des molécules (état amorphe). Ces différences de vitesse ne sont donc pas également possibles, ni également grandes pour tous les corps. Les matières qui les admettent plus nombreuses et plus grandes sont aussi plus molles; elles se rapprochent des liquides et des gaz, parce qu'elles comptent des molécules exécutant des mouvements instantanés correspondant à l'état liquide ou gazeux.

Cette hypothèse est d'accord avec ce que l'on sait sur la chaleur spécifique et la chaleur latente des corps mous. Elle soulève des questions diverses auxquelles j'essayerai de répondre.

Liège, Institut de chimie générale, juin 1894.