placé dans une cuve remplie d'eau froide ou *réfrigérant* : l'objet du serpentin est de condenser la vapeur en la refroidissant.

Opération. — Fabrication de l'eau distillée. — S'agit-il de distiller, par exemple, de l'eau de puits ou de rivière pour la débarrasser des sels qu'elle tient en dissolution, et qui sont surtout du sulfate de chaux, du carbonate de

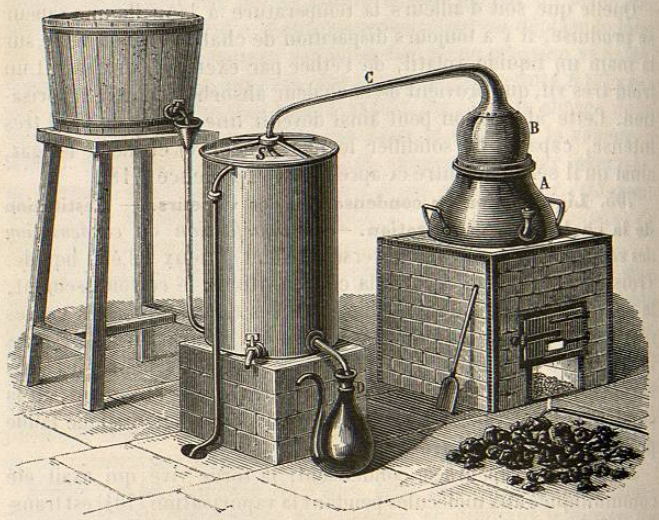

Fig. 732.

chaux et des chlorures, on en remplit la cucurbite aux deux tiers environ, et l'on chauffe. L'eau entre en ébullition, et les vapeurs qui se dégagent vont se condenser dans le serpentin, d'où l'eau distillée provenant de la condensation se rend dans un récipient D, tandis que les matières fixes restent dans la cucurbite.

Précautions accessoires. — Les vapeurs qui se condensent échauffant rapidement l'eau du réfrigérant (705), il importe de renouveler cette eau constamment, sinon la condensation n'aurait plus lieu. A cet effet, un entonnoir, alimenté d'une manière continue par un courant d'eau froide, conduit celle-ci à la partie inférieure de la cuve, tandis que l'eau chaude, qui est moins dense, se porte à la partie supérieure, et se déverse par un tube adapté au haut de la cuve.

La distillation ne doit pas être poussée trop loin, dans la crainte que les matières organiques contenues dans l'eau ne soient décomposées sur les parois chaudes de la cucurbite et ne donnent naissance à des produits volatils.

Brûlage des vins. — C'est par la distillation, à l'aide d'alambics analogues au précédent, qu'on *brûle* les vins, c'est-à-dire qu'on en extrait l'alcool.

707. **Essai des vins : Alambic de Salleron.** — M. Salleron a construit, pour déterminer la richesse alcoolique des vins et autres spiritueux, un appareil distillatoire, qui est une modification d'un appareil de même genre dû à Gay-Lussac.

Appareil. — Il se compose d'un ballon de verre posé sur un trépied, et qu'on peut chauffer à l'aide d'une lampe à alcool (fig. 733). Un tube met ce ballon en communication avec un serpentin placé dans un vase de cuivre plein d'eau froide, au-dessous duquel est une éprouvette qui reçoit le produit de la distillation. Sur l'éprouvette sont tracées trois divisions : l'une, *a*, est destinée à marquer le

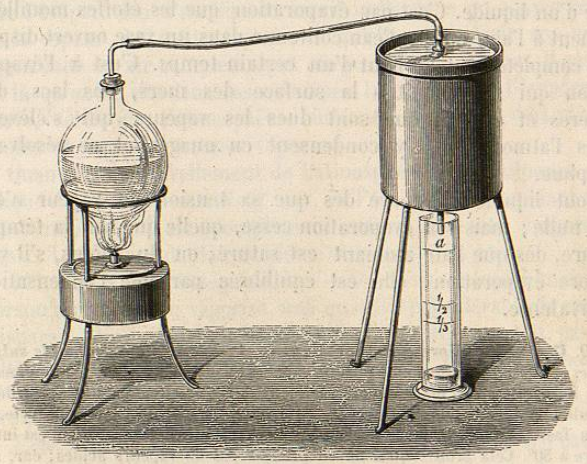

Fig. 733.

volume de vin qu'on doit distiller; les deux autres, marquées $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{5}$, servent à évaluer le volume du liquide résultant de la distillation.

Opération. — On commence par remplir l'éprouvette jusqu'en *a* du vin à essayer; puis, ayant versé le contenu dans le ballon, on met celui-ci en communication avec le serpentin et l'on chauffe alors avec la lampe : le vin entre en ébullition, et la distillation s'opère. On la prolonge, pour les vins ordinaires, jusqu'à ce que le liquide distillé s'élève dans l'éprouvette à la division $\frac{1}{5}$, et à la division $\frac{1}{2}$ pour les vins très alcooliques; on peut admettre alors que tout l'alcool du vin est passé dans l'éprouvette. Enfin, on achève de remplir l'éprouvette d'eau distillée jusqu'en *a*, ce qui donne un *liquide de même volume que celui du vin sur lequel on a expérimenté et également riche en alcool, mais débarrassé de toute substance étrangère.* Il ne reste donc qu'à évaluer le degré de ce liquide avec l'alcoomètre de Gay-Lussac (179). A cet effet, l'appareil de Salleron est accompagné d'un alcoomètre centésimal, d'un thermomètre et d'une table de correction.

Remarque. — *Thermomètre alcoométrique.* — On construit aussi des *thermomètres alcoométriques*, destinés à faire connaître la richesse des vins en alcool d'après leurs températures d'ébullition. Au sommet de la tige du thermomètre est le degré 100, qui marque la température d'ébullition de l'eau; les degrés inscrits au-dessous marquent les centièmes d'alcool pur contenu dans le liquide soumis à l'expérience.

ÉVAPORATION.

708. **Définition du phénomène.** — On a déjà vu (681) qu'on entend par *évaporation* une production lente de vapeur à la surface d'un liquide. C'est par évaporation que les étoffes mouillées sèchent à l'air, ou que l'eau contenue dans un vase ouvert disparaît complètement au bout d'un certain temps. C'est à l'évaporation qui se produit à la surface des mers, des lacs, des rivières et du sol, que sont dues les vapeurs qui s'élèvent dans l'atmosphère, s'y condensent en nuages et se résolvent en pluie.

Tout liquide s'évapore dès que sa tension de vapeur n'est pas nulle ; mais son évaporation cesse, quelle que soit la température, dès que l'air ambiant est saturé; ou du moins, s'il y a encore évaporation, elle est équilibrée par une condensation équivalente.

709. **Cas particuliers d'évaporation.** — 1° *Évaporation de l'acide sulfurique.* — Ce liquide ne donne plus de vapeurs au-dessous de 30°, même dans le vide. En effet, si l'on place sous le récipient de la machine pneumatique deux capsules contenant l'une de l'acide sulfurique, l'autre de l'eau de baryte, et qu'on fasse le vide, l'eau ne se trouble pas tant que la température est inférieure à 30°. Cela prouve qu'il ne se produit pas de vapeurs acides; car, s'il s'en produisait, elles se dissoudraient aussitôt dans l'eau de baryte et il y aurait formation de sulfate de baryte, lequel est blanc, complètement insoluble et se précipiterait dans la liqueur.

2° *Évaporation du mercure.* — Faraday l'avait étudiée par une expérience très nette. En appliquant une feuille d'or sur l'extrémité inférieure d'un bouchon, et fermant avec celui-ci un flacon contenant du mercure, il vit au bout de quelques jours l'or blanchir en s'amalgamant; il constata, en outre, que le phénomène ne se produisait qu'autant que la température était supérieure à — 6°. De là il avait conclu que — 6° était la température limite de l'évaporation du mercure. Davy, qui avait trouvé de son côté pour limite — 7°, admettait qu'à des températures peu supérieures à cette limite les vapeurs de mercure forment seulement une couche de quelques centimètres au-dessus de la surface libre du liquide : ce qui est opposé à la loi générale de la diffusion des fluides aériformes (241). Or, dès 1838, Regnault avait observé que le mercure se vaporise à — 15°; et récemment, M. Merget (de Lyon) a constaté que ce liquide donne encore des vapeurs à — 44°. De plus, il a reconnu que les vapeurs mercurielles possèdent un *pouvoir diffusif* tel, que dans les locaux vastes et élevés on en constate la présence, à la température ordinaire, depuis le sol jusqu'au plafond, même quand elles sont émises par des surfaces d'évaporation peu étendues.

710. **Circonstances qui accélèrent l'évaporation.** — Quatre circonstances principales influent sur l'évaporation, pour l'accélérer. Ce sont : 1° l'*élévation* de la température; 2° la *diminution* de proportion de vapeur du même liquide répandue dans l'atmosphère ambiante ; 3° le renouvellement de cette atmosphère ; 4° l'étendue de la surface d'évaporation.

L'élévation de température accélère l'évaporation par l'accroissement de force élastique qu'elle communique aux vapeurs.

Pour comprendre l'influence de la seconde cause, remarquons que l'évaporation d'un liquide serait nulle dans un espace saturé de la vapeur du même liquide, et qu'elle atteindrait son maximum dans un air complètement purgé de cette vapeur. Il résulte de là qu'entre ces deux cas extrêmes la rapidité de l'évaporation varie, selon que l'atmosphère ambiante se trouve déjà plus ou moins chargée des mêmes vapeurs.

Quant au renouvellement de l'atmosphère, son influence s'explique de la même manière; car, si l'air ou le gaz ambiant n'est pas renouvelé, il est promptement saturé, et toute évaporation cesse. L'influence de la quatrième cause est évidente.

711. **Froid dû à l'évaporation.** — On a vu précédemment que lorsqu'un liquide se vaporise, une quantité considérable de chaleur disparaît. Par suite, si un liquide qui s'évapore ne reçoit pas une quantité de chaleur équivalente à celle qui devient *latente*, sa température s'abaisse, et son refroidissement est d'autant plus grand que l'évaporation est plus rapide.

Expérience de Leslie. — Leslie est parvenu à congeler l'eau par le seul effet d'une évaporation rapide. Pour répéter son expérience, on place sous le récipient de la machine pneumatique un vase de verre contenant de l'acide sulfurique concentré, et au-dessus une petite capsule A de liège ou de gutta-percha (fig. 734), contenant quelques grammes d'eau. Si l'on fait le vide, l'eau entre en ébullition (700) et, les vapeurs étant absorbées par l'acide sulfurique à mesure qu'elles se dégagent, il se produit une vaporisation rapide qui amène bientôt la congélation de l'eau dans la capsule.

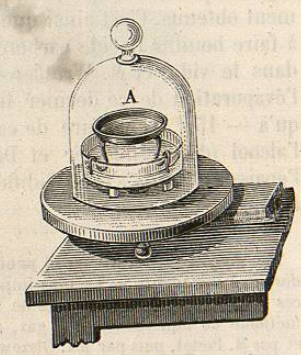

Fig. 734.

Cryophore de Wollaston. — On arrive au même résultat avec le *cryophore*, dû à Wollaston. C'est un tube de verre recourbé, terminé à ses extrémités par deux boules (fig. 735). Après y avoir introduit un peu d'eau et en avoir expulsé l'air par le même procédé que pour le tube de Donny (699), on fait passer l'eau

dans la boule A, et on plonge l'autre dans un mélange réfrigérant. Les vapeurs dans le tube et dans la boule inférieure étant condensées par le froid, l'eau de la boule A entre en ébullition et fournit de nouvelles vapeurs. Cette vaporisation rapide ne se faisant qu'avec absorption de chaleur, l'eau de la boule A se refroidit et finit par se prendre en une masse de glace.

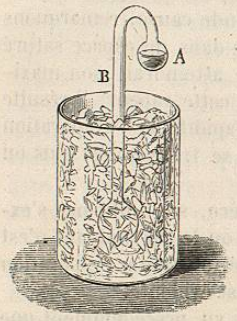

Fig. 735.

Congélation du mercure. — Si l'on opère avec des liquides plus volatils que l'eau, particulièrement avec l'acide sulfureux, qui bout à — 10°, on produit un froid assez intense pour congeler le mercure. On fait cette expérience en enveloppant de coton une boule de verre pleine de mercure ; puis, après l'avoir arrosée d'acide sulfureux, on la place sous la cloche de la machine pneumatique, et l'on fait le vide ; bientôt le mercure est solidifié.

Congélation de l'alcool. — On a produit progressivement et régulièrement des abaissements de température de plus en plus considérables en faisant évaporer, à l'air ou dans le vide, des liquides provenant de gaz liquéfiés à l'aide des froids successivement obtenus. C'est ainsi que M. Pictet et M. Cailletet sont arrivés à faire bouillir l'acide carbonique et le protoxyde d'azote liquide dans le vide, et M. Wroblewski l'*éthylène*. Le froid produit par l'évaporation de ce dernier liquide a abaissé la température jusqu'à — 136°. Le sulfure de carbone s'est congelé vers — 116°, et l'alcool (dont Thilorier et Despretz n'avaient pu produire que l'épaississement) s'est solidifié à — 130°, sous l'aspect d'un *corps blanc*.

712. **Applications du froid produit par l'évaporation.** — 1° *Liquéfaction des gaz permanents.* — La plus importante des applications qu'on ait faites de ces abaissements considérables de température est sans contredit la nouvelle méthode de liquéfaction des gaz, appliquée successivement par M. Cailletet et par M. Pictet, puis par MM. Olszewski et Wroblewsky, aux gaz anciennement appelés *permanents*. Nous exposerons cette importante question dans un chapitre spécial (718).

2° *Alcarazas.* — Le froid produit par l'évaporation est utilisé dans les pays chauds pour rafraîchir l'eau au moyen d'*alcarazas*. On nomme ainsi des vases de terre assez poreux pour que l'eau, filtrant lentement à travers leurs parois, vienne s'évaporer à leur surface, surtout si on les place dans un courant d'air.

713. *Congélateur de E. Carré.* — La congélation de l'eau par l'évaporation dans le vide sec (à l'acide sulfurique) a reçu une application industrielle dans le congélateur de M. E. Carré.

Description de l'appareil. — Cet appareil se compose d'un récipient R de plomb antimonié au vingtième (fig. 736). A une extrémité est un entonnoir E, qui sert à introduire l'acide ; à l'autre, une tubulure *m*, sur laquelle est vissé un dôme *d*, qui soutient une série d'obstacles destinés à s'opposer à l'arrivée de l'acide sulfurique dans la tubulure *m* et dans le tube *b*. Sur le récipient sont

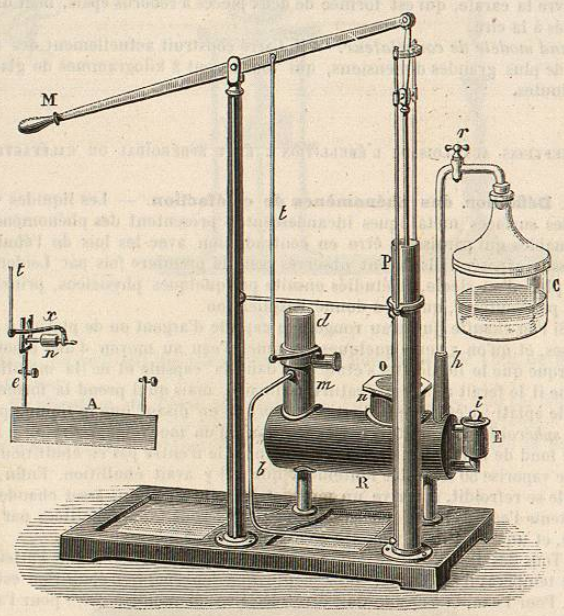

Fig. 736.

disposés un regard *u*, fermé par un obturateur de verre O, et une longue tubulure *h*, à laquelle s'adapte une carafe C contenant l'eau à congeler. Le dôme *d*, l'obturateur O et le bouchon *i* de l'entonnoir sont lutés à la cire jaune.

Une pompe à faire le vide P (décrite ci-dessus au § 252) communique avec le récipient par le tube *b*. On la manœuvre à l'aide d'un balancier M. A celui-ci est fixée une tige *t*, qui, par l'intermédiaire du mécanisme *txne*, met en mouvement un agitateur A plongé dans l'acide sulfurique. Le levier *x*, lié à un axe horizontal qui traverse une petite boîte de laiton *n*, transmet son mouvement de va-et-vient à la tige *e*, puis à l'agitateur. Enfin, la boîte *n* est hermétiquement enfermée, au moyen de disques de liège que traverse l'axe, dans un bout de tube latéral fixé perpendiculairement à la tubulure *m*.

Résultats. — M. Carré a construit plusieurs modèles de ce congélateur. Dans le plus petit, le récipient, à moitié plein, contient 2k,500 d'acide sulfurique, et la carafe, au tiers pleine, 400 grammes d'eau. Après 70 coups de piston environ, l'eau entre en ébullition. Quoique la vapeur soit alors absorbée rapidement par l'acide, on continue à faire marcher la pompe jusqu'à ce que la congélation commence. Il suffit ensuite, pour la compléter, de donner, de 5 en 5 minutes

quelques coups de piston. Avec de l'acide neuf, la congélation totale exige 45 minutes, mais la durée de l'opération augmente à mesure que l'acide se dilue. On peut congeler successivement 12 carafes avec le même acide. Une fois la congélation opérée, si l'on veut retirer la glace, on ouvre d'abord le robinet *r* (mais seulement très peu, sinon l'acide est refoulé dans les tubes); puis on ouvre la carafe, qui est formée de deux pièces à rebords épais, bien dressés et lutés à la cire.

Grand modèle de congélateur. — M. Carré construit actuellement des appareils de plus grandes dimensions, qui fournissent 2 kilogrammes de glace en 60 minutes.

EXCEPTIONS AUX LOIS DE L'ÉBULLITION : ÉTAT SPHÉROÏDAL OU CALÉFACTION.

714. **Définition des phénomènes de caléfaction.** — Les liquides versés sur des surfaces métalliques incandescentes présentent des phénomènes remarquables qui paraissent être en contradiction avec les lois de l'ébullition ci-dessus exposées. Ils furent observés pour la première fois par Leidenfrost, il y a plus d'un siècle, et étudiés ensuite par quelques physiciens, principalement par Boutigny, qui en a donné l'explication.

1° Si l'on chauffe jusqu'au rouge une capsule d'argent ou de platine à parois épaisses, et qu'on y verse quelques grammes d'eau au moyen d'une pipette, on remarque que le liquide ne s'étale pas dans la capsule et ne la mouille pas, comme il le ferait à la température ordinaire, mais qu'il prend la forme d'un globule aplati : c'est ce que Boutigny exprime en disant que le liquide passe à l'*état sphéroïdal*. A cet état, l'eau est animée d'un mouvement giratoire rapide sur le fond de la capsule, et non seulement elle n'entre pas en ébullition, mais elle se vaporise 50 fois plus lentement que s'il y avait ébullition. Enfin, si la capsule se refroidit, il arrive un moment où elle n'est plus assez chaude pour maintenir l'eau à l'état sphéroïdal. Ses parois sont alors mouillées par le liquide, et une ébullition violente se manifeste tout à coup.

2° Tous les liquides peuvent prendre l'état sphéroïdal; ils l'atteignent à une température d'autant plus haute que leur point d'ébullition est plus élevé. Pour l'eau, la capsule doit être chauffée au moins à 200°; pour l'alcool, à 134°.

715. **Expériences de Boutigny.** — 1° Boutigny a observé que la température des liquides à l'état sphéroïdal est constamment inférieure à leur point d'ébullition. L'eau, par exemple, reste à 95°,5; l'alcool, à 75°,5; l'éther, à 34°; l'acide sulfureux, à — 10°,5. Mais la température de la vapeur qui se dégage *est égale à celle de la capsule;* d'où l'on doit conclure que cette vapeur ne se produit pas dans la masse du liquide.

2° Cette propriété des liquides à l'état sphéroïdal, de se maintenir à une température inférieure à celle de leur point d'ébullition, a conduit Boutigny à une expérience remarquable, celle de la congélation de l'eau dans une capsule incandescente. On chauffe au rouge blanc une capsule de platine et l'on y verse quelques grammes d'acide sulfureux anhydre. Ce liquide, qui ne bout qu'à — 10°, se comporte dans la capsule comme on l'a vu ci-dessus, c'est-à-dire que sa température s'abaisse au-dessous de — 10°. Si alors on ajoute à l'acide sulfureux une petite quantité d'eau, celle-ci, refroidie par l'acide, se congèle instantanément, et, la capsule étant encore rouge, on en retire un morceau de glace.

3° A l'état sphéroïdal, il n'y a point contact entre le liquide et le corps chaud. Boutigny s'en est assuré en faisant rougir une plaque d'argent disposée bien horizontalement, et en versant dessus un gramme d'eau colorée en noir. Ce liquide passe à l'état sphéroïdal. Or, si l'on place la flamme d'une bougie à une

certaine distance sur le prolongement de la plaque, on distingue nettement (fig. 737) et d'une manière continue cette flamme entre le sphéroïde d'eau et la plaque. On conclut de là que le liquide se maintient à une petite distance

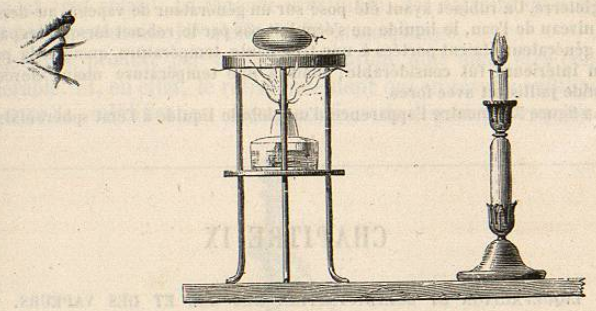

Fig. 737.

de celle-ci, ou qu'il fait des vibrations assez rapides pour que l'œil ne puisse es distinguer.

716. **Explication de l'état sphéroïdal.** — Pour expliquer tous ces faits, on admet que le globule liquide est soutenu à distance du vase par la tension de la vapeur qui se produit continuellement à sa surface, en sorte que le liquide

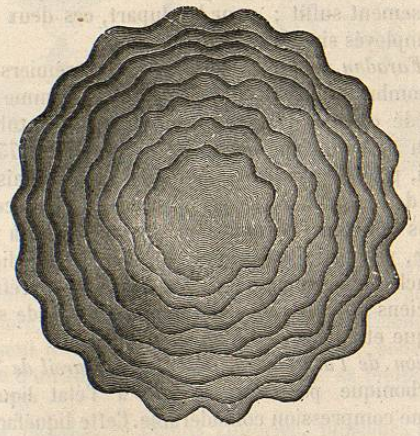

Fig. 738.

n'est pas chauffé par contact, mais seulement par rayonnement; or, l'eau étant *diathermane*, c'est-à-dire transparente, pour les rayons émis d'une source incandescente, une grande partie de la chaleur rayonnante la traverse sans l'échauffer, de telle sorte qu'elle s'évapore très lentement. C'est par suite de

cette évaporation continue qu'il se produirait, entre le métal incandescent et le liquide ne le mouillant pas, *une force répulsive d'autant plus intense que la température est plus élevée.*

Cette hypothèse s'accorde avec l'expérience suivante, faite par Perkins, en Angleterre. Un robinet ayant été posé sur un générateur de vapeur, au-dessous du niveau de l'eau, le liquide ne s'écoulait pas par le robinet lorsque les parois du générateur étaient portées à une très haute température, quoique la pression intérieure fût considérable; mais à une température moins élevée le liquide jaillissait avec force.

La figure 738 montre l'apparence d'un globule liquide à l'état sphéroïdal.

CHAPITRE IX

LIQUÉFACTION ET SOLIDIFICATION DES GAZ ET DES VAPEURS.

717. **Historique. — Différents procédés.** — Les gaz, n'étant que des vapeurs plus ou moins éloignées de leur point de saturation, sont, comme celles-ci, susceptibles d'être liquéfiés. Mais, comme ils sont très loin de leur point de liquéfaction, on ne peut les y ramener que par une pression ou un refroidissement plus ou moins considérable. Pour quelques-uns, la compression seule ou le refroidissement suffit ; pour la plupart, ces deux moyens doivent être employés simultanément.

Tube de Faraday. — Davy et Faraday les premiers liquéfièrent un grand nombre de gaz regardés jusqu'alors comme permanents. Leur procédé consistait à renfermer dans un tube de verre recourbé en siphon, appelé *tube de Faraday* (fig. 739), des substances qui, par leur réaction chimique, donnent naissance au gaz qu'il s'agit de comprimer ; de sorte que, ces substances étant contenues dans l'une des branches du siphon, le gaz, à mesure qu'il s'en dégage, vient se comprimer lui-même et se liquéfier dans l'autre branche, qui est plongée dans un mélange réfrigérant. Les deux physiciens liquéfièrent ainsi le chlore, l'acide sulfhydrique, l'ammoniaque et l'acide carbonique.

Liquéfaction de l'acide carbonique. — Appareil de Thilorier. — L'acide carbonique peut être amené à l'état liquide simplement par une compression considérable. Cette liquéfaction ne doit donc s'opérer que dans des appareils spéciaux, présentant la plus grande solidité. Le premier appareil de ce genre fut imaginé par Thilorier. On peut considérer cet appareil comme un perfectionnement direct du tube de Faraday; le principe en est exactement le même. Nous ne le décrirons pas, malgré son ancienne célébrité, parce que, depuis les travaux plus récents, il n'a réellement plus qu'un intérêt historique [1].

L'acide carbonique liquéfié est un liquide très mobile, incolore et très volatil. La tension maximum des vapeurs qu'il émet à la température de 15° s'élève à 50 atmosphères.

Le froid produit par cette évaporation doit donc être considérable. Et, en effet, le refroidissement qui en résulte suffit pour amener la solidification d'une portion du liquide, lorsqu'on le

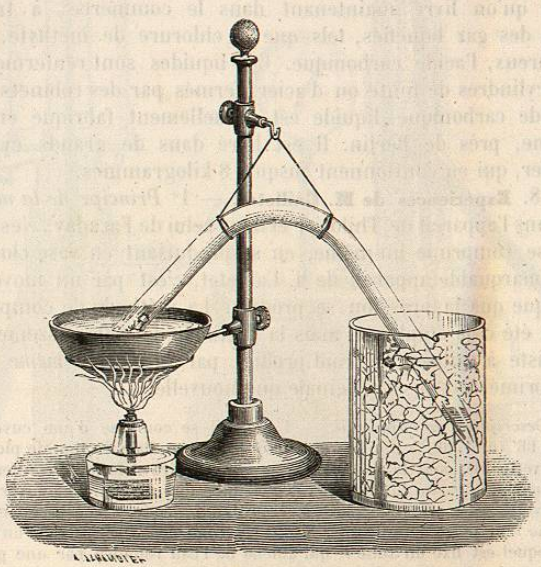

Fig. 739.

fait évaporer dans une boîte spéciale, imaginée par Faraday, mais notablement perfectionnée par M. Cailletet. L'acide solide se présente alors sous l'aspect de flocons blancs filamenteux qui ne se vaporisent à l'air que très lentement. On peut constater alors, à l'aide d'un thermomètre à alcool, que sa température est d'environ — 78°.

Expériences récentes. — Depuis Thilorier, plusieurs physiciens, entre autres Colladon, Natterer, Berthelot, Andrews, Melsens, se sont occupés de la liquéfaction et de la solidification des gaz ; mais six de ces corps (l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, le bioxyde d'azote,

1. On en trouvera d'ailleurs la description dans tous les traités de chimie.