

GEORGES CLAUDE

L'air

Liquide

Préface de M. d'ARSONVAL

MEMBRE DE L'INSTITUT

1903

DU MÊME AUTEUR :

L'ÉLECTRICITÉ

A LA PORTÉE

DE TOUT LE MONDE

Quatrième édition (17^e mille)

**COURANTS CONTINUS ; COURANTS VARIABLES
COURANTS ALTERNATIFS SIMPLES OU POLYPHASÉS**

Un beau volume in-8° jésus de 360 pages avec 200 figures dans le texte.

Broché, **6** francs. Relié, **8** francs

Ouvrage honoré d'une souscription des ministères de l'Instruction publique et du Commerce et de la Ville de Paris ; couronné par la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.

Le succès qui a accueilli l'Électricité à la portée de tout le monde, succès absolument sans précédent en la matière, montre combien son auteur a été bien inspiré en estimant qu'entre tous les traités actuels — trop savants ou... pas assez — il y avait place pour un ouvrage capable d'initier sans fatigue aux merveilles de l'électricité les personnes peu au courant des secrets des mathématiques.

L'AIR LIQUIDE

SA PRODUCTION

SES PROPRIÉTÉS — SES APPLICATIONS

PAR

Georges CLAUDE

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE DE PHYSIQUE ET CHIMIE DE PARIS

Préface de M. d'ARSONVAL

MEMBRE DE L'INSTITUT

PARIS

V^o CH. DUNOD, ÉDITEUR

49, Quai des Grands-Augustins, 49

—
1903

PRÉFACE

A quoi peut bien servir la liquéfaction des gaz permanents ? disaient en 1877 les utilitaires qui nous voyaient à l'Académie des Sciences, le 24 décembre, curieusement rangés autour de l'appareil de Cailletet, anxieux de voir apparaître un soupçon d'air liquide dans un nuage durant l'instant d'un éclair.

A quoi cela servait ? Mais pas à autre chose qu'à amuser des savants, pensaient ces gens sérieux.

A quoi cela servait ? Mais à faire une séance de prestidigitacion, à gonfler outrageusement un convive qui se hasardait à en ingurgiter au champagne ou encore à jouer un mauvais tour au garçon de restaurant en durcissant instantanément un bifteck à point. A bon nombre d'auditeurs devant qui, depuis cinq ans, j'ai pu manipuler l'air liquide par litres, il n'en est resté que ça. C'est trop et pas assez. Il fallait remettre les choses au point pour le public ; Claude va s'acquitter de ce soin dans les pages qui suivent. Il le fera dans un style à lui, imagé, mais clair et précis. Il préfère rester moins académique et être compris de tous.

C'est son droit ; que dis-je ? C'est surtout son devoir. Le public lui donnera raison... Et moi aussi ; d'autant plus que, par les nombreux travaux qu'il a consacrés à cette importante question, par les perfectionnements dont les appareils de liquéfaction de l'air lui sont redevables, Claude était tout indiqué pour mener à bien cette tâche nécessaire.

Et maintenant, sans vouloir empiéter sur lui, je me répète : Liquéfier l'air, à quoi cela sert-il ? Mais d'abord à le matérialiser (rien des médiums), à en faire un *liquide* qu'on peut *voir, toucher et transvaser* d'un vase dans un autre à la façon de l'eau. Puis, en le laissant s'évaporer, cela sert à produire des froids inconnus de tous, excepté des habitants de la lune, s'il y en a. Enfin, cela sert à pouvoir le traiter comme un mélange de deux liquides, c'est-à-dire à *le distiller* et à le séparer en ses consti-

tuants, oxygène et azote, à la façon dont les distillateurs séparent l'eau de l'alcool.

Voilà le point capital appelé à révolutionner à bref délai l'éclairage, la métallurgie, les industries chimiques, l'hygiène, l'agriculture et nos connaissances sur la matière.

Pourquoi ? Comment ? Mais tout simplement en retirant de l'atmosphère l'oxygène et l'azote à l'état de pureté, et l'hydrogène de l'eau, ou plutôt du gaz à l'eau.

Avec l'oxygène à vil prix, c'est l'obtention immédiate et économique des hautes températures nécessaires à l'éclairage par les corps incandescents, et à toute l'industrie métallurgique.

C'est l'obtention directe du carbure de calcium, la fusion économique des corps les plus réfractaires.

En hygiène, c'est la purification de l'atmosphère, la désinfection des eaux par l'ozone, la suppression des fumées, l'innocuité des eaux d'égout, etc.

En chimie minérale, c'est une rénovation des procédés de fabrication de l'acide sulfurique, du chlore, de l'eau oxygénée, de l'ozone, de l'hydrogène, etc.

Avec l'azote et l'hydrogène à vil prix, c'est la fabrication de l'ammoniaque et des sels ammoniacaux indispensables à l'agriculture.

Enfin, grâce aux températures extrêmes que ces gaz liquéfiés nous permettent d'atteindre, tant au-dessous qu'au-dessus de zéro, nous avons en mains un admirable outil de recherches qui nous permet de pénétrer les mystères de la matière et surtout de nous en rendre maîtres.

Car, comme le disait si justement Claude Bernard, la science n'a pas pour but de nous expliquer la nature, mais bien de nous en rendre maîtres, ce qui est préférable pour le progrès et le bien-être de l'humanité.

La liquéfaction industrielle de l'air n'est pas seulement une révolution scientifique, c'est aussi et surtout une révolution économique et sociale.

Méditez donc ce livre, amis lecteurs, vous en tirerez *sûrement* plaisir dans le présent, et *peut-être profits...* dans l'avenir. C'est la grâce que je vous souhaite en terminant.

D^r D'ARSONVAL,
de l'Institut.

CHAPITRE PREMIER

LA LIQUÉFACTION DES GAZ PERMANENTS

QUELQUES CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

C'est devenu une sorte de lieu commun d'affirmer que nous vivons en un temps fertile en miracles : le fait est tellement évident, les merveilles succèdent aux merveilles avec une telle abondance, une telle régularité, que le besoin de l'affirmer peut paraître superflu.

Livrons-nous, cependant, à une brève énumération.

Les rayons de Röntgen permettant à l'œil de fouiller jusqu'en leurs plus secrets replis les mystères du corps humain; l'automobile déambulant sur nos routes à des allures fantastiques; la craie et le charbon se muant en alcool par l'intermédiaire de l'arc électrique; le sous-marin donnant enfin raison au génie de Jules Verne et sillonnant désormais les profondeurs des mers; l'analyse spectrale — exploit invraisemblable — allant ravir aux plus lointaines étoiles le secret de leur constitution chimique; le radium mis au jour par les savantes recherches de M. et M^{me} Curie et venant bouleverser, par ses radiations mystérieuses, les conceptions les plus certaines de notre science; la photographie augmentant de jour en jour la sensibilité inouïe de ses procédés et capable aujourd'hui de reconstituer avec une fidélité scrupuleuse

jusqu'aux couleurs les plus délicates; la télégraphie sans fils, enfin, permettant à la pensée humaine de s'échapper hors du transatlantique perdu sur l'Océan et de s'envoler vers la côte lointaine, — voilà, parmi les plus brillantes, quelques unes des étapes *brûlées* en moins d'un quart de siècle!

Eh bien ! si déconcertantes puissent-elles vous paraître, toutes ces merveilleuses découvertes, j'ai le ferme espoir que celle dont j'ai à vous entretenir ici sera capable à vos yeux de supporter sans crainte la comparaison; j'ai la conviction qu'après les explications que j'aurai à vous fournir, la liquéfaction des gaz permanents, et en particulier de l'air atmosphérique, vous apparaîtra comme l'un des points les plus intéressants, comme l'un des faits les plus gros de conséquences de l'histoire de la Science.

Gaz liquéfiables par simple pression. — Vous savez certainement, chers lecteurs, que tous les gaz, ceux que nous offre la nature comme ceux que les merveilles de la chimie ont mis à notre disposition, sont susceptibles d'abandonner la forme gazeuse et de se transformer en *liquides*, généralement semblables à l'eau, quand on les place dans un ensemble de conditions convenables.

D'aucuns, parmi ces gaz, mettent à effectuer ce changement d'état une véritable bonne grâce. Il suffit de réduire suffisamment leur volume en les *comprimant* pour provoquer chez eux cette transformation si curieuse.

Comprimez par exemple dans un cylindre de verre, à l'aide d'un piston, l'acide sulfureux, le gaz suffocant des allumettes chimiques; poussez la compression jusqu'à réduire le gaz au sixième environ de son volume primitif : la loi de Mariotte vous apprend qu'à ce moment la pression supportée par le gaz est d'environ 6 atmosphères,

et vous voyez ruisseler sur les parois transparentes du cylindre de verre un liquide qui n'est autre chose que l'acide sulfureux liquéfié par l'action de cette modeste pression. Voici un échantillon de ce liquide (*fig. 1*) emprisonné dans une ampoule de verre scellée à la lampe : vous voyez que son aspect rappelle à s'y méprendre celui de cette bonne *agua simplex* — que les pharmaciens nous font payer si cher...

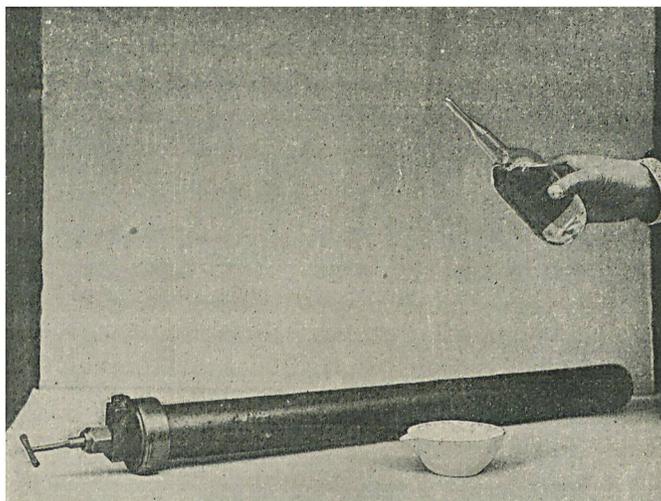


FIG. 1. — Ampoule en verre pleine d'acide sulfureux liquide.
En bas, bouteille d'acide carbonique liquide.

Comprimez dans les mêmes conditions du chlore sous une pression voisine de 12 à 15 atmosphères, il vous fournira, par exception, un liquide d'un magnifique jaune foncé.

L'acide carbonique, enfin, sous la seule action d'une pression à la vérité plus élevée que dans les cas précédents, soit 40 à 50 atmosphères, se transforme lui aussi à la température ordinaire en un liquide que l'on prépare aujourd'hui sur une grande échelle — douze millions

de kilogrammes par an pour notre seul pays — et que l'on emmagasine dans ces bouteilles d'acier que vous connaissez sans doute (*fig. 1*) pour les besoins, en particulier, des brasseurs et des fabricants de boissons gazeuses.

Gaz permanents. — Mais il ne faudrait pas croire que les choses se passent toujours aussi simplement sur ce terrain de la liquéfaction des gaz.

Tant s'en faut.

Avec la bonne volonté des gaz que nous venons de citer, l'obstination d'un petit nombre d'autres fait le contraste le plus complet.

Quelque énormes que soient les pressions sous lesquelles on les écrase, que ces pressions se chiffrent par centaines et même par *milliers* d'atmosphères, elles sont absolument impuissantes à amener sous la forme liquide les gaz en question. Sous ces fantastiques pressions, réduits à une fraction microscopique de leur volume primitif, ces héroïques obstinés peuvent devenir *plus denses que l'eau*, ils ne capitulent pas ! Ce n'est donc pas sans une apparence de raison qu'en désespoir de cause les physiciens et les chimistes du milieu du siècle dernier leur ont donné le nom de gaz *permanents*.

Ces quelques entêtés étaient, jusqu'en ces dernières années, quatre corps simples, l'*hydrogène*, l'*oxygène*, l'*azote*, le *fluor*, et deux composés du carbone, le *méthane* et l'*oxyde de carbone*. Depuis, la liste s'est augmentée d'un corps simple remarquable, l'*hélium*, que par un étrange paradoxe nos savants, dignes successeurs de l'astrologue du bon La Fontaine, ont été découvrir dans le Soleil avant que de s'apercevoir de sa présence sur notre globe ! On aurait pu y joindre aussi tous ces éléments nouveaux qu'on s'est avisé de trouver en ces derniers temps dans l'atmosphère en compagnie de l'hélium,

argon, métargon, néon, krypton, xénon, nébulum, coronium (la suite à la prochaine édition), si, malheureusement pour leur amour-propre, tous ces nouveaux venus n'étaient arrivés trop tard pour pouvoir s'illustrer à leur tour par leur résistance.

Car, en usant d'un qualificatif comme celui de *permanent*, les physiciens du siècle dernier préjugeaient des ressources de la science, chose toujours imprudente, d'autant plus impardonnable de la part de savants payés pour savoir à quoi s'en tenir.

Le défi n'a pas tardé à être relevé et, si énergique qu'ait été leur défense, tous les gaz permanents, tour à tour, ont été jugulés. Nous les manipulons aujourd'hui sous la forme liquide, par litres et par dizaines de litres, sans beaucoup plus de précautions que s'il s'agissait d'eau ou d'alcool!

Un seul parmi eux — l'hélium — a victorieusement défié jusqu'ici tous nos moyens de coercition; mais, nouveau venu encore dans le cercle de nos connaissances, puisque sa présence sur notre globe a été constatée seulement en 1894, il n'aura vraisemblablement pas longtemps le loisir de faire bande à part. Les savants se montrent déjà si sûrs de leur affaire à son égard que, renouvelant un petit exercice fort à la mode chez eux depuis le geste célèbre de Le Verrier montrant au ciel la place de Neptune encore inconnu, ils nous décrivent avec une belle assurance toutes les propriétés surprenantes de l'hélium liquéfié. C'est tout au plus s'ils nous font grâce des décimales, et on peut se demander si c'est vraiment la peine de s'acharner désormais, au prix de mille difficultés, à préparer un inconnu si bien connu déjà...

La température critique. — Mais une question se pose ici.

Après les échecs si répétés et d'un caractère si définitif en apparence de la première moitié du siècle dernier, quel est donc le secret du succès si remarquable de ces dernières années en matière de liquéfaction des gaz permanents ? Il réside tout entier, ce secret, dans la découverte d'une propriété capitale, commune à tous les gaz et mise en évidence en 1869 par les travaux du physicien anglais Andrews.

Il résulte en effet de ces travaux que chaque gaz est caractérisé par une certaine *température critique* qui lui est particulière et que nous pouvons définir comme suit : si le gaz en question est *plus froid* que la température critique qui le caractérise, la seule application d'une pression suffisante sera *toujours* capable de l'amener à l'état liquide.

Si, au contraire, le gaz est à une température *supérieure* à sa température critique, quelque énorme que soit la pression qu'on fasse agir sur lui, cette pression sera complètement *impuissante* à provoquer la liquéfaction.

Or, la température critique de l'acide carbonique est de 31° au-dessus de zéro ; celle de l'acétylène, de 37° ; celle du chlore, de 140° ; celle, enfin, de l'acide sulfureux, de 155°. Vous remarquerez, n'est-ce pas, que toutes ces températures critiques sont plus élevées que la température ordinaire de nos climats. Dans les circonstances ordinaires, ces gaz se trouvent ainsi *au-dessous* de leur température critique. Il n'est donc pas étonnant que, dès leurs premiers efforts, les physiciens de l'autre siècle, les Faraday, les Thilorier, aient eu la satisfaction de voir ces gaz se liquéfier sous la seule application d'une pression suffisante (*fig. 2*).

Au contraire, les gaz improprement qualifiés de permanents sont caractérisés par des températures critiques *épouvantablement basses*, des températures dont nous

n'avions aucune idée jusqu'en ces dernières dizaines d'années.

C'est ainsi que la température critique de l'oxygène est de 118° au-dessous de zéro (-118°) et que celle de l'azote est de 146° au-dessous de zéro (-146°). Quant à l'hydrogène, il atteint, lui, au chiffre fantastique de -242° ,

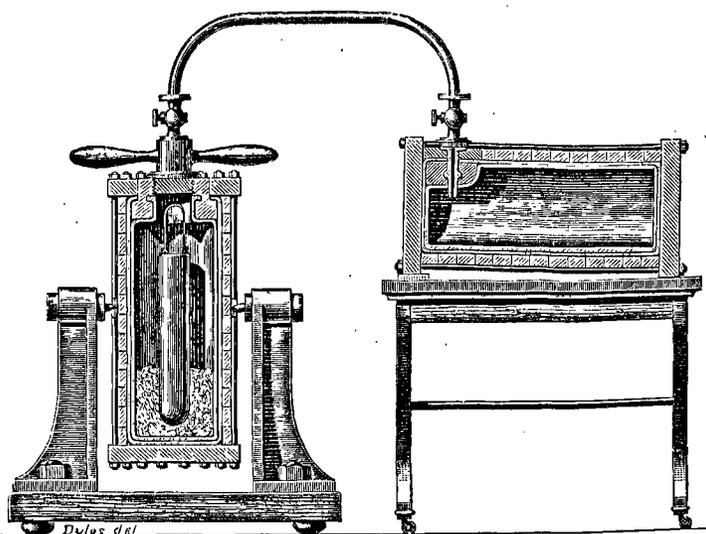


FIG. 2. — Appareil de Thilorier pour la liquéfaction de l'acide carbonique.

bien voisin de cette valeur extrême de -273° que les physiciens, guidés par de savantes conceptions, considéraient comme l'extrême limite des froids possibles et qu'ils ont qualifiée en conséquence de *zéro absolu*, ce qui leur permet — permission peu banale ! — de considérer un corps à -200° comme *relativement chaud*, et un autre corps à -100° comme *très chaud*, comme *brûlant* par rapport au premier !

Dans les circonstances normales, ces gaz permanents se trouvent donc bien au-dessus de leur température cri-

tique, et c'est ce qui vous explique comment la seule application de pressions même énormes est incapable de provoquer la liquéfaction.

Que faire pour arriver à ce résultat? Vous le devinez maintenant : nous n'y arriverons que si, par un *refroidissement énergique*, nous abaissons au-dessous du point critique la température du gaz à liquéfier. Le refroidissement, voilà notre grand moyen d'action sur les gaz récalcitrants.

Et alors, des pressions relativement modérées suffiront parfaitement pour liquéfier le gaz ainsi refroidi à sa température critique : 33 atmosphères pour l'azote, 50 pour l'oxygène, 15 pour l'hydrogène, etc. Comme en beaucoup de choses, le tout est donc de savoir s'y prendre, et les pressions énormes que les physiciens de l'autre siècle appliquaient à tort et à travers sont tout à fait superflues.

Ainsi, et pour nous résumer, les gaz, au point de vue de leur liquéfaction, se rangent en deux catégories :

1° Gaz caractérisés par des températures critiques *supérieures* à la température normale de nos climats, et que la seule application d'une pression assez grande sera toujours capable de liquéfier ;

2° Gaz caractérisés par des températures critiques *inférieures* à la température ordinaire et qui ne se liquéfieront sous l'action de la *pression* que si, par un *refroidissement* assez énergique, on les a amenés au-dessous de leur température critique. D'ailleurs, et vous le comprendrez aisément, plus on les refroidit au-dessous de cette limite indispensable, et moins il faut de pression pour les liquéfier.

L'air, dont j'ai à vous entretenir ici, appartient naturellement à cette dernière catégorie ; sa température critique, intermédiaire entre celle de l'oxygène et celle de l'azote, est d'environ — 140° ; et pour le liquéfier, il nous

faudra le soumettre simultanément aux deux conditions ci-dessus spécifiées.

Comment nous y prendre pour les réaliser?

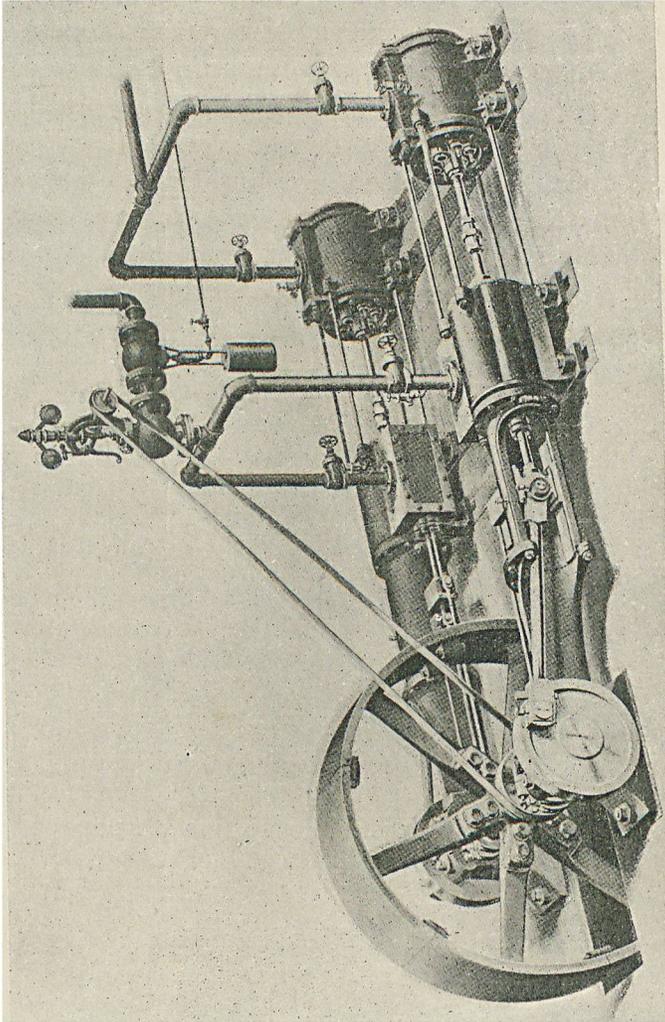


FIG. 3. — Compresseur industriel (P. Bonvillain).

Compression des gaz. — Comment, tout d'abord, comprimer le gaz que nous avons à manipuler ?

Ceci n'est pas le plus difficile de l'affaire.

Vous connaissez tous ces pompes à l'aide desquelles l'air atmosphérique, refoulé sous la pression de 4 à 5 atmosphères, a tôt fait de redonner du ventre aux pneumatiques des automobiles et des bicyclettes qui ont « bu de l'obstacle » au point d'en... crever.

Eh bien ! les compresseurs industriels ne sont autre chose que des pompes à bicyclettes revues, corrigées et considérablement augmentées (*fig. 3*), et, moyennant la dépense d'une force motrice suffisante, ils nous délivrent sans difficulté le gaz que nous voulons manipuler comprimé sous des pressions variant suivant les cas de 5 à 200 atmosphères et même davantage.

Refroidissement des gaz. — Les mélanges réfrigérants. — La compression du gaz obtenue, reste à le refroidir.

Un moyen terre à terre d'arriver à ce résultat consiste tout simplement à faire circuler le gaz comprimé à travers un serpentín immergé dans un liquide refroidi, par exemple un mélange réfrigérant.

Il n'y a qu'un malheur.

Les mélanges réfrigérants les plus efficaces énumérés dans les traités de physique, mixture, par exemple, de chlorure de calcium et de neige, sont absolument impuissants pour le but qui nous occupe ici, c'est-à-dire, comme nous le savons, pour refroidir les gaz permanents au-dessous de leur température critique. Avec eux, nous arrivons à peine à -50° ou -60° , et ces températures, que les froids les plus terribles des régions polaires n'atteignent pourtant jamais, *ne comptent même pas ici !*

La détente. — Heureusement, un moyen bien plus puissant, bien plus élégant aussi, ce qui ne gêne rien, est à notre disposition.

Ce moyen met à profit un phénomène inverse de celui que tous les amateurs de bicyclette qui me lisent ont eu maintes fois l'occasion d'observer. Ils savent que lors du gonflement de leurs pneus, un *échauffement* considérable de la pompe se produit. C'est là, en effet, un phénomène général : quand on comprime un gaz, il s'échauffe.

Réciproquement, quand un gaz comprimé est appelé à se *détendre*, il se *refroidit*.

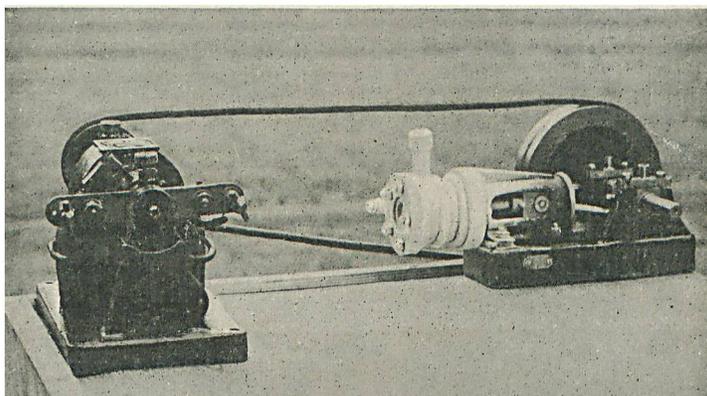


FIG. 4. — Production du froid par la détente de l'air comprimé dans un moteur.

Ceci est d'ailleurs une conséquence évidente de cette équivalence mécanique de la chaleur dont la découverte a valu à la science moderne l'un de ses plus beaux fleurons : Le gaz qui se détend effectue toujours pendant cette détente un certain *travail*, soit qu'il chasse violemment devant lui l'air de l'atmosphère dans laquelle il pénètre, ou qu'il mette en mouvement le piston d'une machine à air comprimé. Comme nous savons maintenant que l'énergie ne se crée pas — le mouvement perpétuel est une fiction qui ne vaut plus à ses adeptes que l'hospitalité de Charenton — il faut bien que l'énergie mécanique qui apparaît dans cette détente du gaz comprimé soit prise

quelque part : le gaz se soustrait alors à lui-même, sous forme calorifique, ce qui apparaît mécaniquement, et, comme conséquence, se *refroidit* d'une quantité précisément équivalente au travail mécanique effectué.

Ce mode de refroidissement est d'une efficacité absolument extraordinaire et il est possible à son aide de réaliser des chutes de température énormes. L'exemple suivant vous en donnera une idée.

Comprimons de l'air à la pression de 7 atmosphères, pression bien modeste puisque la manœuvre à la main d'une pompe de bicyclette la fournit aisément. Faisons ensuite détendre cet air comprimé de sa pression initiale de 7 atmosphères jusqu'à la pression atmosphérique en lui faisant actionner un moteur à air comprimé (*fig. 4*) travaillant sur une résistance extérieure, frein, dynamo, etc. Le moteur, presque instantanément, se recouvre de givre ; l'air détendu s'échappe dans l'atmosphère en provoquant d'abondantes fumées que la photographie, prise à l'arrêt, ne reproduit naturellement pas. Ces fumées sembleraient, pour l'observateur non prévenu, provenir d'une machine à vapeur, mais elles sont, en réalité, dues à la congélation de l'humidité de l'atmosphère.

Et ces indices d'un refroidissement énergique sont bien justifiés, car nous réalisons ainsi — excusez du peu ! — une source de froid capable de nous amener théoriquement d'une température initiale de $+ 20^{\circ}$ jusqu'à $- 107^{\circ}$, température à laquelle presque tous les liquides connus, mercure, benzine, alcool lui-même, sont durs comme de la pierre !

Il est vrai d'ajouter qu'il y a plutôt une nuance entre la théorie et la pratique !...

LA LIQUÉFACTION DE L'AIR

L'air atmosphérique liquéfié par Cailletet. — En dépit de sa température (190 modestes degrés *au-dessous de zéro*), l'air liquide n'est plus, pour les savants, que du... réchauffé : il y a quinze ans qu'ils le connaissent déjà.

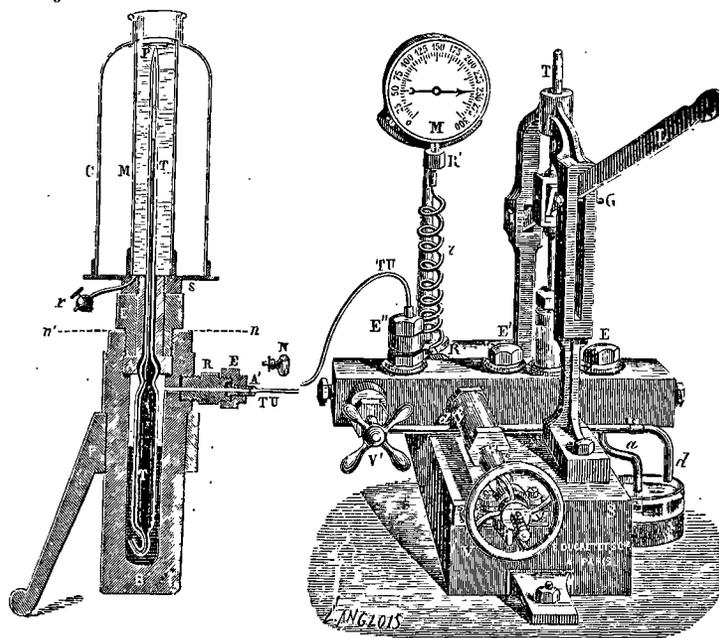


FIG. 5. — Appareil de Cailletet pour la liquéfaction de l'air.

C'est notre savant compatriote, M. Cailletet, qui a le premier appliqué à la liquéfaction de l'air le mode de refroidissement si puissant fourni par la détente. Et ce fut à l'Académie des Sciences, en juin 1877, un jour mémorable que celui où Sainte-Claire Deville put annoncer à ses collègues que l'air atmosphérique devait être désormais rayé de la liste des gaz permanents.

En comprimant, en effet, de l'air sous une pression de 300 atmosphères dans un tube de verre épais sous l'action d'une colonne de mercure poussée par une presse hydraulique (*fig. 5*), puis en supprimant brusquement la pression, M. Cailletet avait vu l'air, amené ainsi bien au-dessous de sa température critique, se résoudre subitement en un brouillard épais !

Malheureusement, si le succès de cette magnifique expérience était complet au point de vue scientifique, si la théorie de la permanence des gaz recevait là un choc dont elle ne devait pas se relever, il n'en allait pas tout à fait de même au point de vue pratique. Entouré de tous côtés par le verre du tube, par le piston de mercure, corps excessivement chauds par rapport à lui, le brouillard extraordinairement froid d'air liquide était fatalement condamné à s'évanouir aussitôt que produit. Supplice intolérable, renouvelé de Tantale, les savants se voyaient séparés par une infranchissable barrière de verre du liquide mystérieux qu'ils brûlaient de manipuler !

Appareils à cycles multiples. — Cela ne pouvait évidemment durer...

Effectivement, après bien des tentatives infructueuses, sous les efforts d'une pléiade de savants parmi lesquels les noms de Pictet, Olzewski et Wroblewski brillent au premier rang, quelques gouttes du précieux liquide purent enfin être extraites d'appareils passablement compliqués, dits à *cycles multiples*, dont le type le plus parfait a été réalisé en 1895, au laboratoire de l'Université de Leyde, par le professeur Kamerling Onnes.

Grâce à ces appareils, le génie humain a donc transformé en une définitive victoire le premier succès remporté par Cailletet sur l'hostilité de la matière. Bien que

la loi du progrès ait fait disparaître de la pratique les appareils à cycles multiples, idéal, pendant près de dix ans, de tous les savants du monde, ce serait de l'ingratitude d'oublier les précieux services qu'ils ont rendus à la science au point de ne pas dire deux mots de leur principe.

Ce principe, fort curieux, consistait à descendre par étapes successives l'échelle des températures en liquéfiant d'abord par simple compression un gaz aisément condensable, acide sulfureux ou chlorure de méthyle, dont l'évaporation dans le vide fournissait une température assez basse (-50 à -60°) pour dépasser largement le point critique d'un autre gaz déjà plus rebelle, l'éthylène. Celui-ci, liquéfié aisément, permettait d'atteindre à son tour, par son ébullition dans le vide, une température intermédiaire entre -140 et -150° , suffisante, cette fois, pour résoudre enfin sous la forme liquide l'oxygène et l'azote comprimés, qu'on voyait au travers d'une fenêtre tomber en larmes incolores au fond du récipient...

Que de peines, que d'ingéniosité, que de difficultés vaincues dans ces quelques gouttes de liquides !

Production industrielle de l'air liquide. — Arrivée à ce point, la question demeura stationnaire pendant plusieurs années.

C'était d'ailleurs naturel. La curiosité des savants, rassasiée par quelques déterminations de densités et de points critiques, était épuisée, et il ne pouvait venir à l'idée de personne que des préoccupations industrielles importantes pourraient un jour intervenir sur un pareil terrain, étant données les difficultés énormes que rencontrait alors l'obtention de ces températures excessives.

Et pourtant, ici comme en tant d'autres choses, l'in vraisemblable est devenu la réalité.

Les choses ont complètement changé d'aspect du jour où le savant allemand Linde, professeur à l'École polytechnique de Munich, a réussi à mettre au point une machine remarquable, liquéfiant l'air en grandes masses par la seule action de la compression préalable de cet air et de sa détente ultérieure.

Cela remonte à 1896.

Détente dite sans travail extérieur. Machine de Linde. — La machine de Linde représente donc une étape considérable dans la conquête industrielle de l'air liquide, et il ne sera pas superflu de nous y arrêter un instant.

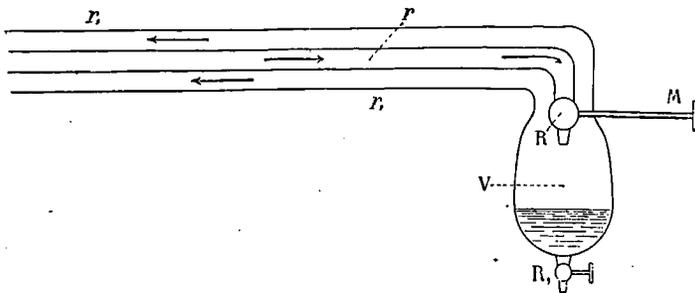


FIG. 6. — Principe de la machine de Linde.

De même que Cailletet, Linde s'adresse à la détente même de l'air à liquéfier comme source de froid. Cette détente s'obtient (*fig. 6*) de la manière la plus simple en faisant écouler par un robinet l'air fortement comprimé amené à ce robinet R par le tube *r*. La chute de pression qui se produit dans l'air à son passage par cet ajutage se traduit par un certain refroidissement. Mais cette détente dite *sans travail extérieur* est loin de présenter l'extrême efficacité que nous avons reconnue tout à l'heure à la détente dans un moteur en charge; elle ne produit qu'un abaissement de température relativement très faible. A

lui seul, il serait parfaitement incapable d'amener l'air dans les conditions convenables pour sa liquéfaction, c'est-à-dire, comme nous le savons, au-dessous de sa température critique, qui est d'environ -140° .

En effet, les expériences montrent que le refroidissement qui accompagne l'écoulement de l'air par un simple robinet est seulement de $1/4$ de degré pour chaque atmosphère de chute de pression : comme l'appareil de Linde est disposé pour utiliser une chute de pression de 150 atmosphères, on voit que le refroidissement total atteint à peine 40° .

Nous serions donc très loin de compte si Linde n'avait imaginé de reprendre une ingénieuse idée émise par Siemens dès 1860, et qui consiste à accumuler progressivement les chutes de température produites par la détente de quantités d'air successives.

Le dispositif employé pour arriver à ce résultat est d'ailleurs des plus simples.

L'air qui vient de se détendre au sortir du robinet R est astreint à circuler en sens inverse de l'air comprimé en parcourant le tube r_1 , concentrique au tube d'amenée r . Dans cette circulation en sens inverses du gaz comprimé et du gaz détendu dans l'échangeur de températures rr_1 , ainsi réalisé, le gaz détendu cède progressivement tout son froid à l'air comprimé, qui arrive ainsi à l'appareil de détente R un peu plus froid que celui qui l'a précédé, produit en conséquence par sa détente une température un peu plus basse, circule un peu plus froid autour de l'air comprimé, et ainsi de suite.

Cette accumulation d'effets se continue naturellement jusqu'au moment où est atteinte la température de liquéfaction, moment à partir duquel le froid produit, ne pouvant plus se traduire par un nouvel abaissement de la température, entraîne la liquéfaction d'une partie de l'air

employé, laquelle s'accumule progressivement dans le récipient V.

L'air liquide ainsi obtenu après une mise en route qui, suivant les appareils, varie d'une demi-heure à une heure, est extrait par le robinet R_1 .

On ne manquera pas, surtout après l'impression de

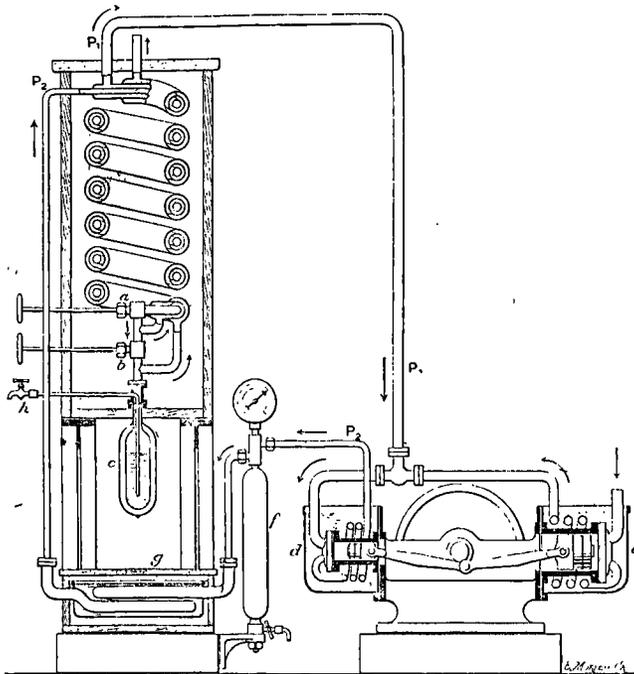


FIG. 7. — Machine de Linde.

complexité laissée par les appareils à cycles multiples, d'admirer la simplicité à nulle autre pareille des moyens mis en œuvre pour arriver à un résultat aussi surprenant.

D'ailleurs, la machine de Linde se recommande encore à l'attention des techniciens par quelques détails fort bien étudiés et dont on voudra bien m'excuser de dire quelques mots.

J'ai fait remarquer tout à l'heure que la chute de température de l'air, qui donne la mesure de l'effet frigorifique de la détente, dépend, dans la méthode de Linde, de la *différence* des pressions, à raison de $1/4$ de degré par atmosphère de chute. Au contraire, on démontre aisément que le travail nécessaire pour comprimer l'air destiné à se détendre, c'est-à-dire que la dépense de force motrice dépend du *rapport* de la pression initiale à la pression finale et non plus de leur différence.

Or, si Linde, après avoir comprimé l'air à 200 atmosphères, le laissait ensuite détendre jusqu'à la pression atmosphérique, il aurait bien une très grande différence de pressions, soit 199 atmosphères, donc un grand effet frigorifique, mais le rapport des pressions, soit $\frac{200}{1} = 200$, étant aussi énorme, le travail de compression de l'air à traiter serait très onéreux.

Mais, au contraire, faisons seulement détendre l'air de 200 atmosphères jusqu'à 20 : comme une fraction très petite de l'air traité, soit 5 0/0, se liquéfie, nous pouvons reprendre le reste sous la pression finale de 20 atmosphères et le recomprimer de 20 à 200, en n'empruntant à l'atmosphère que la petite quantité nécessaire pour combler le déficit. Qu'avons-nous gagné à cette modification? Ceci : La *différence* des pressions, à la vérité, se trouve un peu amoindrie, mais très peu : 180 au lieu de 199. Par contre, le *rapport* des pressions est seulement $\frac{200}{20} = 10$ au lieu de 200 : ce rapport est donc bien plus petit et, par conséquent, le travail de compression est infiniment atténué.

L'artifice de Linde consiste donc à ne faire détendre l'air que jusqu'à une pression convenablement choisie,

et il a en somme pour effet de sacrifier très peu sur l'effet frigorifique pour gagner énormément sur la compression ; c'est grâce à cette habile conception que le rendement des grandes machines de ce système a pu atteindre au chiffre inégalé jusqu'en ces derniers temps de 0,5 à 0,6 litre d'air liquide par cheval et par heure.

Ainsi que je l'ai déjà dit, le progrès réalisé par la machine de Linde est considérable : alors que jusque-là l'air liquide n'avait été qu'une ruineuse fantaisie à l'usage des laboratoires en situation de ne se rien refuser, l'appareil de Linde donnait du coup le moyen de l'obtenir en quantités illimitées au taux de 0,5 litre par cheval et par heure, c'est-à-dire à un prix relativement bas. On voudra bien remarquer en effet que la matière première utilisée ici, l'air atmosphérique, présente cette inestimable propriété d'être *la seule* qui soit rigoureusement gratuite. L'eau elle-même coûte la peine de se baisser pour en prendre ; l'air, pas ! C'est donc seulement la force motrice, la main-d'œuvre et l'amortissement des appareils qui fixent le prix de revient de l'air liquide.

Aussi, les appareils basés sur la détente sans travail extérieur se sont-ils multipliés dans ces dernières années ; mais la machine de Linde est, parmi tous ces appareils, de beaucoup le mieux étudiée et en restera comme le type.

Pourtant, les appareils de cette catégorie, malgré leur simplicité remarquable, ne sont pas encore l'idéal. Ils sont d'un fonctionnement plutôt délicat ; ils mettent en jeu, comme je l'ai dit, d'énormes pressions, atteignant 200 atmosphères dans l'appareil de Linde ; et ces pressions ne sont pas, outre de nombreux inconvénients, sans intimider quelque peu les expérimentateurs appelés à les manipuler.

Enfin, et surtout, le mode de détente employé — faute de mieux — dans ces sortes de machines, laisse beaucoup à désirer.

Et ceci ne saurait nous surprendre.

Détente avec travail extérieur récupérable. — J'ai fait remarquer tout à l'heure que, si la détente refroidit les gaz, c'est qu'elle est accompagnée d'un certain travail, qui trouve précisément son équivalent dans le refroidissement produit.

D'où cette conséquence que, pour refroidir beaucoup un gaz qui se détend, il faut lui faire produire pendant cette détente le plus de travail possible. Et il est bien évident que nous satisferons mal à cette condition essentielle si, comme dans les dispositifs précédents, nous nous contentons de faire écouler l'air comprimé à travers un ajutage sans, pour ainsi dire, lui opposer de résistance.

Nous obtiendrons, au contraire, un résultat bien meilleur si nous forçons l'air qui se détend à accomplir tout le travail dont il est susceptible en poussant par exemple le piston d'une machine à cylindre ou les aubes d'une turbine.

L'idéal, en d'autres termes, dans cette voie de la liquéfaction de l'air, consiste à remplacer la détente sans travail extérieur (Linde, Hampson, Tripler, etc.) par la détente *avec travail extérieur*. Sans compter que cette mise en route d'une machine motrice par l'air qui se détend nous permettra de *récupérer* un peu de l'énergie dépensée pour la compression de l'air.

Cette conception très simple n'est d'ailleurs pas nouvelle.

Elle présente même cette curieuse particularité d'avoir été émise à une époque où l'air liquide était encore un mythe, puisque la théorie des gaz permanents régnait en

maîtresse. Siemens, avec une hardiesse remarquable, la formulait en effet dès 1860, mais sans, d'ailleurs, pouvoir la mettre à exécution.

A la suite de Siemens, de nombreux expérimentateurs, Solvay, Hampson, Linde lui-même, tentèrent à leur tour de faire entrer dans le domaine industriel la détente avec travail extérieur; ils ne réussirent qu'à mesurer une fois de plus quelle distance considérable peut séparer de la pratique les idées théoriques les plus simples. La congélation des organes par les matières lubrifiantes dans des machines motrices fonctionnant à ces températures excessives, le réchauffement considérable par la chaleur ambiante leur apparurent comme des difficultés insurmontables et les portèrent à abandonner cette voie.

Il est curieux, à cet égard, de voir en quels termes Linde lui-même s'exprimait sur ce sujet, il y a quelques années, dans *le Génie civil* :

« La réalisation de ce procédé (indiscutable en théorie) est contestable en pratique pour les raisons suivantes : supposons que ce procédé soit appliqué à l'air atmosphérique jusqu'à la température qui doit être atteinte pour la liquéfaction; à ce moment on a en présence, à l'état solide, tous les corps étrangers mélangés à l'air, tels que l'eau, l'acide carbonique, etc., ainsi que tous les restes de matière lubrifiante employée. Dans ces conditions, le fonctionnement d'un cylindre d'expansion avec ses organes de distribution devient presque impossible à réaliser. Tous ceux qui ont travaillé avec ces basses températures savent combien la manœuvre d'un simple robinet présente déjà de difficultés. En outre, il serait très difficile, pour ne pas dire impossible, de protéger comme il convient pour ces basses températures le cylindre d'expansion et son mécanisme contre l'action de la chaleur extérieure.

On ne pourra donc pas du tout atteindre ces températures avec un pareil dispositif. »

C'était, comme on voit, assez catégorique...

Méthode de M. G. Claude. — En dépit de ces prémisses peu encourageantes, en dépit de l'autorité justifiée qui s'attache au nom de Linde, j'ai repris dans cette voie toute une série d'études. J'ai trouvé dans l'éther de

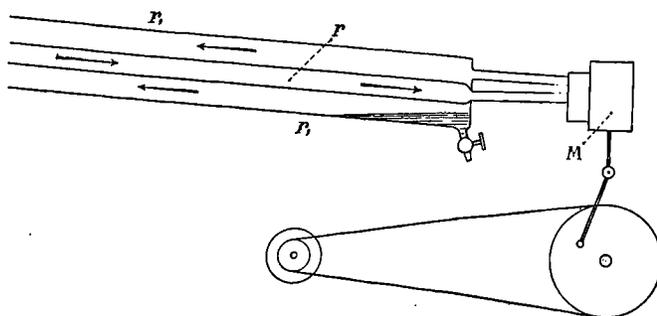


FIG. 8. — Schéma du dispositif G. Claude.

pétrole et dans l'air liquide lui-même les lubrifiants nécessaires à ces températures. Quant au réchauffement de l'appareil moteur par la chaleur ambiante, eu égard à l'extrême efficacité de la production frigorifique, loin d'être un obstacle prohibitif, il m'est apparu comme jouant dans l'ensemble un rôle assez insignifiant. Somme toute, et grâce à quelques artifices très simples sur lesquels je n'insisterai pas ici, j'ai été assez heureux pour arriver au résultat désiré et pour liquéfier l'air, à l'aide d'une machine à piston et d'un échangeur de températures (*fig. 8 et 9*), dans des conditions économiques à peu près *deux fois meilleures* qu'on n'avait pu le faire jusque-là.

En outre, autre avantage considérable, les pressions

sur lesquelles on opère n'ont pas besoin de dépasser 20 à

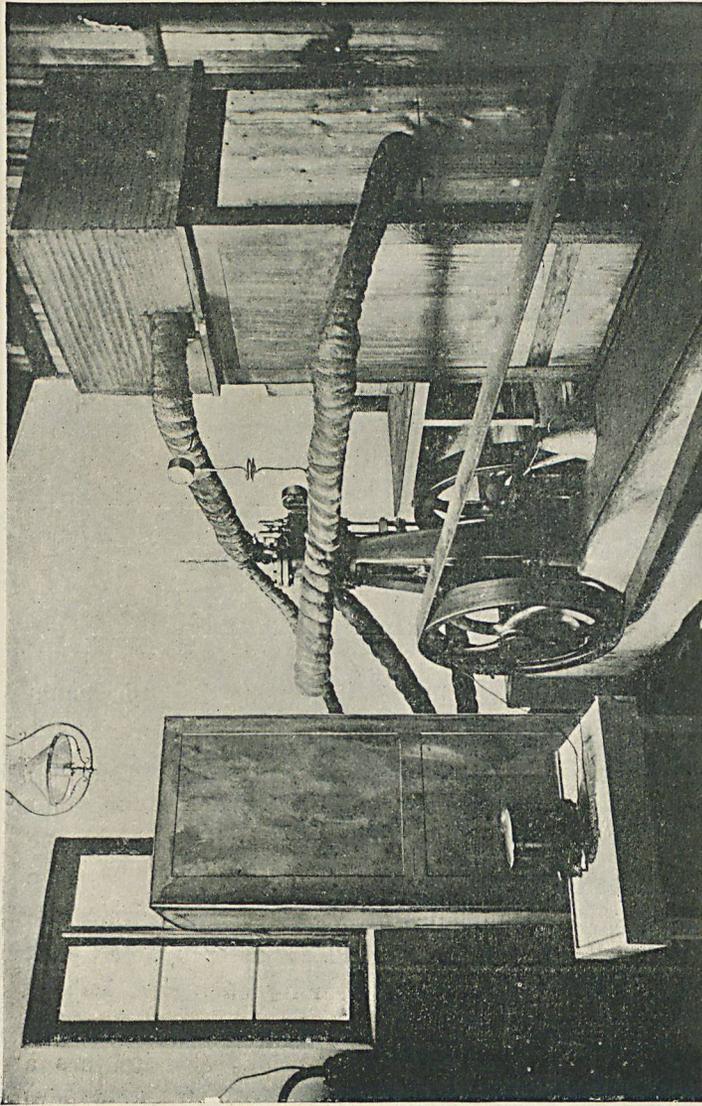


FIG. 9. — Ensemble fournissant 25 litres d'air liquide à l'heure par le procédé G. Claude.

40 atmosphères. A l'encontre, en effet, de la détente genre Linde, l'action de la détente avec travail extérieur dépend

du rapport des pressions d'admission et de détente et non plus de leur *différence*, qu'il n'y a donc plus lieu de faire très grande. Passer de 5 atmosphères à 1 produit ici la même chute de température que passer de 100 à 20 ou de 200 à 40.

Le résultat est important, car, devant les formidables pressions de 200 atmosphères réclamées par la détente genre Linde, on peut bien qualifier de pressions de tout repos les 20 à 30 atmosphères qui suffisent largement à la détente avec travail extérieur.

Ces conditions satisfaisantes de la méthode nouvelle permettront l'obtention de l'air liquide sur une grande échelle à un prix qui rendra faciles les immenses applications qu'on peut prévoir dès à présent et dont j'aurai tout à l'heure à dire quelques mots.

Mais, avant d'aller plus loin et de clore ce chapitre, j'aurais ingratitude à ne pas dire que les études très longues et très coûteuses dont je viens d'indiquer en quelques lignes le résultat n'auraient pu être menées à bien sans les précieux encouragements que j'ai rencontrés chez MM. d'Arsonval, Potier et le général Sébert, membres de l'Institut, et sans le concours empressé des membres de la Société *l'Air Liquide*.

Qu'il me soit permis d'adresser aux uns comme aux autres mes plus sincères remerciements.

CHAPITRE DEUXIÈME

CONSERVATION DE L'AIR LIQUIDE

UN PROBLÈME DIFFICILE

Conservation de l'air liquide en vases ouverts. — Voici, dans cette éprouvette de forme un peu spéciale (*fig. 10*), de l'air liquide. Vous voyez avec quelle aisance on peut le manipuler à l'air libre, le transvaser de cette éprouvette dans une autre, exactement comme si c'était de l'eau — de l'eau bouillante tout au plus.

A première vue, n'est-ce pas, cela paraît un paradoxe. Produit dans des conditions de pression et de température excessives, il semblerait en effet que, dès que de l'air liquide est amené à l'air libre, il ne doit rien avoir de plus pressé que de reprendre cet état gazeiforme auquel nous avons eu tant de peine à l'arracher. Pourtant, vous voyez bien qu'il n'en est rien !

Il est indispensable de bien fixer nos idées sur ce point délicat... si délicat que je ne suis pas sans inquiétude sur la clarté de mes explications.

Prenons de l'air gazeux : refroidissons-le à sa température critique, soit -140° . Dès ce moment, vous savez que nous pouvons le liquéfier ; mais il y faut encore des formes, c'est-à-dire une pression considérable : environ 40 atmosphères. Disons en passant que cette pression de

40 atmosphères qui liquéfie l'air à la température critique s'appelle elle-même la *pression critique*.

Maintenant, au lieu de refroidir l'air juste à -140° ,

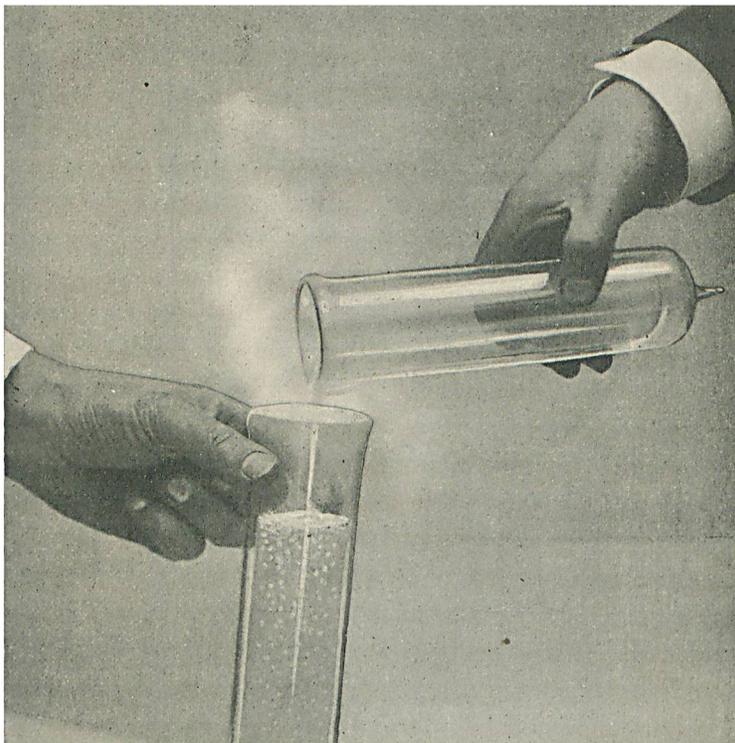


FIG. 10. — Manipulation à l'air libre de l'air liquide.

refroidissons-le notablement plus, par exemple à -150° . Il est bien évident, n'est-ce pas, que ce gaz plus froid va être par cela même plus facile à liquéfier et qu'une pression plus faible, 30 atmosphères par exemple, au lieu de 40, y sera suffisante.

Refroidissons davantage, il nous faudra encore moins de pression.

En d'autres termes, à chaque température à partir de -140° , correspond une pression capable de liquéfier l'air, et qui est d'*autant moindre* que cette température est plus basse. En persévérant dans cette voie, en refroidissant de plus en plus, nous devrons arriver, et nous arriverons en effet, à une température assez basse pour que l'air se liquéfie sous le seul effet de la pression atmosphérique elle-même.

A cette température, qui est d'environ -190° , l'air liquide pourra évidemment subsister à l'air libre, puisque, à plus forte raison, la pression atmosphérique elle-même suffit alors pour réduire l'air gazeux sous la forme liquide.

Done, premier point, l'existence d'une pression élevée au-dessus de l'air liquide n'est pas indispensable à sa conservation : la seule pression atmosphérique y suffira parfaitement, et par suite l'emploi de récipients *ouverts* sera possible, à la condition que la température s'abaisse à -190° . Or, nous allons voir que, par le simple jeu de lois physiques bien connues, la température de l'air liquide exposé à l'air libre s'établit précisément à cette valeur de -190° .

Rappelons tout d'abord qu'un des principes les plus élémentaires de la physique nous dit que la température de liquéfaction d'un gaz sous une certaine pression est réciproquement celle de l'ébullition du liquide formé : si la vapeur d'eau, par exemple, se liquéfie à 100° sous la pression atmosphérique, l'eau, inversement, entre en ébullition à 100° sous cette même pression. L'air, qui effarouche un peu le raisonnement par les températures inaccoutumées qu'il met en jeu dans sa condensation se comporte exactement de la même façon, et dire qu'il se liquéfie à -190° sous la pression atmosphérique revient à dire que -190° est sa température d'ébullition à l'air

libre : un peu plus, un peu moins, suivant sa richesse en oxygène.

Observons maintenant que de l'air liquide abandonné à lui-même au milieu de corps épouvantablement chauds par rapport à lui va se trouver exactement dans les mêmes conditions *que de l'eau placée sur un foyer ardent*.

Or, que se passe-t-il dans ce cas?

Vous le savez très bien, vous retrouvant ici en pays de connaissance : quelque ardent que soit le foyer, la température de l'eau se fixe immuablement au chiffre de 100° qui est celui de son ébullition sous la pression atmosphérique; l'évaporation rapide qui se produit alors absorbe beaucoup de chaleur, et tout le calorique envoyé par le foyer est employé à cela.

Eh bien ! au même titre que l'eau, l'air liquide abandonné à l'air libre dans le milieu ambiant, qui est pour lui une véritable fournaise, va se fixer lui aussi à sa température d'ébullition, soit — 190°.

C'est bien ce que je vous avais annoncé.

Et, pour l'air liquide en ébullition sous l'effet de la chaleur ambiante comme pour l'eau qui bout sous l'action d'un foyer, l'apport plus ou moins grand de chaleur du foyer ou des corps environnants aura pour résultat non pas une température d'ébullition plus ou moins élevée, mais une ébullition plus ou moins vive.

Ainsi donc, de l'air liquide abandonné à l'air libre, se trouvant dans un milieu fort chaud par rapport à lui, se mettra de lui-même et se maintiendra à sa température d'ébullition, soit environ — 190°, et il *s'évaporer*a avec une rapidité qui dépendra uniquement de la rapidité de l'apport de chaleur extérieure. Si aucun obstacle n'est opposé à cet apport, l'évaporation est très rapide, comme vous le voyez ici (*fig. 11*), en raison de l'excès de température énorme de l'air ambiant et des objets avoisinants;

le ballon dans lequel il se trouve se recouvre d'une couche épaisse de givre qui a bientôt fait de masquer le liquide.

En une heure, par exemple, plusieurs litres d'air liquide placés dans un simple récipient en verre ou en métal auront disparu.

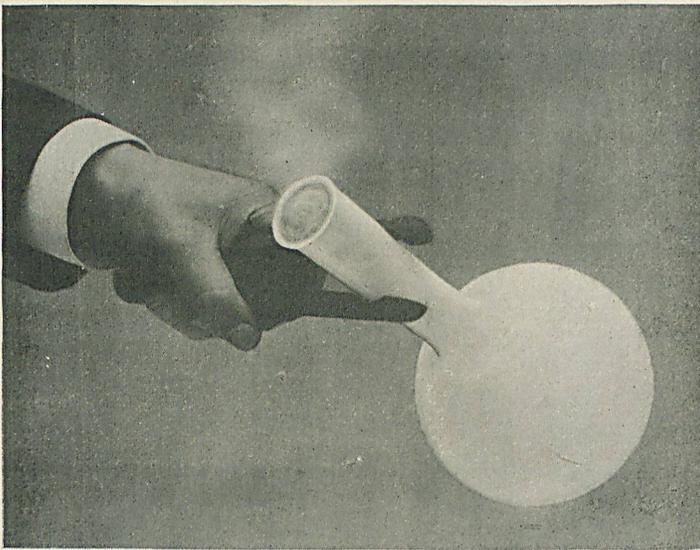


FIG. 11. — Évaporation très rapide de l'air liquide placé dans un ballon ordinaire.

Moyens de ralentir l'évaporation. — Mais si, au contraire, on pouvait s'arranger pour barrer complètement le chemin à cette chaleur extérieure, l'air liquide serait dans l'impossibilité de se gazéifier et se conserverait indéfiniment, puisqu'il lui faut de la chaleur pour s'évaporer. Seulement, il faut bien se rendre compte que ce problème est excessivement difficile à résoudre et constitue l'une des plus sérieuses préoccupations des pro-

ducteurs d'air liquide; le meilleur moyen de se faire une idée de ces difficultés est de remarquer qu'il reviendrait exactement au même d'essayer de conserver pendant des semaines quelques litres d'eau à l'intérieur d'un four chauffé au rouge!

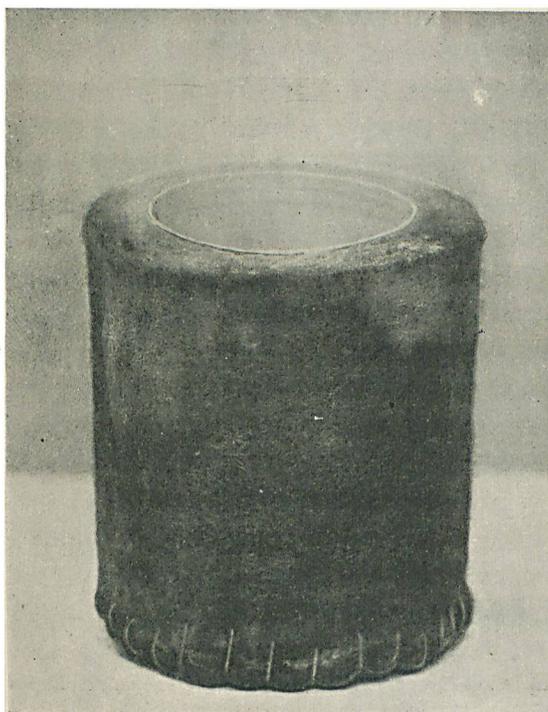


FIG. 12. — Récipient à air liquide imparfait, à revêtement calorifuge.
Évaporation encore trop rapide.

On peut déjà ralentir quelque peu l'évaporation de l'air liquide en enveloppant les récipients qui le contiennent de corps mauvais conducteurs de la chaleur, de feutre par exemple (*fig. 12*). En les emmitouflant ainsi avec plus de soin encore que nous n'en mettons à nous couvrir en hiver de vêtements épais et de fourrures, on

remarquera que nous poursuivons un but précisément inverse : au lieu d'empêcher la chaleur de sortir, nous visons à l'empêcher de rentrer ; étrange paradoxe, les habits très épais dont nous couvrons nos récipients sont destinés à leur éviter d'*avoir chaud* ! Le paradoxe, bien entendu, n'est qu'apparent et signifie tout simplement que le qualificatif de *très chauds* appliqué à nos vêtements d'hiver ne rime pas à grand'chose, et que, si nous n'avions pas dans notre corps lui-même une source de calorique toujours en pression, ce ne seraient pas les vêtements les plus chauds du monde qui nous réchaufferaient.

Pour l'air liquide, en tout cas, le résultat n'est pas bien fameux : c'est tout le bout du monde si l'on peut arriver à tenir de l'air liquide pendant une demi-journée dans un récipient d'une trentaine de litres protégé de cette façon.

Procédé de M. d'Arsonval. — Récipients à double enveloppe et vide intermédiaire. — Heureusement, il y a mieux !

Un moyen bien plus élégant et infiniment supérieur a été indiqué, dès 1888, par M. d'Arsonval¹ et perfectionné par le savant anglais Dewar.

Ce procédé repose sur la connaissance du fait que la pénétration de la chaleur met en jeu deux modes de transport distincts, et à barrer la route à chacun d'eux en particulier.

Voyons cela d'un peu plus près : la chose en vaut la peine.

Le premier mode de transport de la chaleur, dit par *conductibilité* et par *convection*, est celui qui intervient

1. *Comptes Rendus* de la Société de Biologie, 11 février 1888.

dans la propagation de la chaleur d'un bout à l'autre d'une règle de fer chauffée à l'une de ses extrémités et, aussi, dans la transmission de la chaleur d'un foyer par l'air ou la vapeur d'un calorifère.

C'est essentiellement un transport *matériel* de la chaleur de molécule à molécule, et il exige par conséquent la présence de molécules matérielles, celles d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz, entre la source de chaleur et le corps froid auquel cette chaleur doit être amenée.

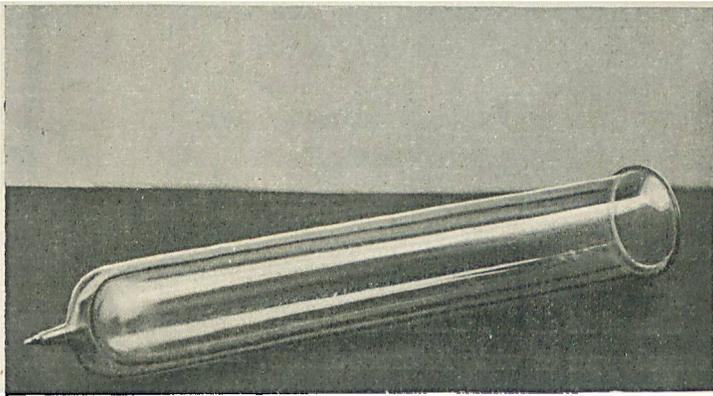


FIG. 13. — Éprouvette à double enveloppe et vide intermédiaire de M. d'Arsonval.

Dès lors, si, dans l'épaisseur de la paroi de récipient que la chaleur ambiante doit traverser pour arriver jusqu'à l'air liquide, nous réservons une tranche entièrement dépourvue de ces molécules matérielles, c'est-à-dire dans laquelle nous aurons réalisé un *vide parfait*, nous opposerons évidemment un obstacle absolu à ce premier mode de pénétration de la chaleur.

M. d'Arsonval a mis fort ingénieusement à profit ce fait, dont la constatation sommeillait sans utilité dans les traités de physique depuis les travaux de Dulong et Petit. Il a constitué (*fig. 13*) des réservoirs à double enve-

loppe de verre formant une paroi creuse à l'intérieur de laquelle on fait le vide par la pointe inférieure, scellée ensuite à la lampe; et l'évaporation de l'air liquide que l'on renferme dans ces récipients s'en trouve déjà énormément ralentie.

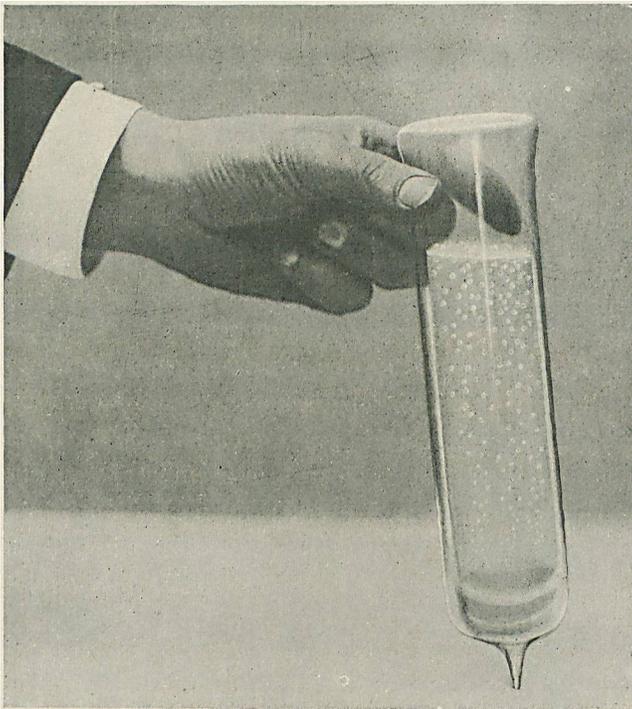


FIG. 14. — Insuffisance du vide seul comme protection contre la chaleur : l'ébullition du liquide est encore assez active.

Malgré tout, les récipients ainsi réalisés ne sont pas encore extrêmement efficaces, tellement est difficile la conservation de ce fantasque liquide.

Voici (*fig. 14*) une éprouvette à double enveloppe et à vide intermédiaire, que je remplis d'air liquide : vous voyez ces nombreuses bulles qui s'élèvent dans le liquide

en grossissant rapidement et qui ne sont autre chose que des bulles d'air vaporisé, exactement analogues aux bulles de vapeur de l'eau en ébullition. Attendez un instant, et vous verrez la paroi extérieure du récipient se recouvrir

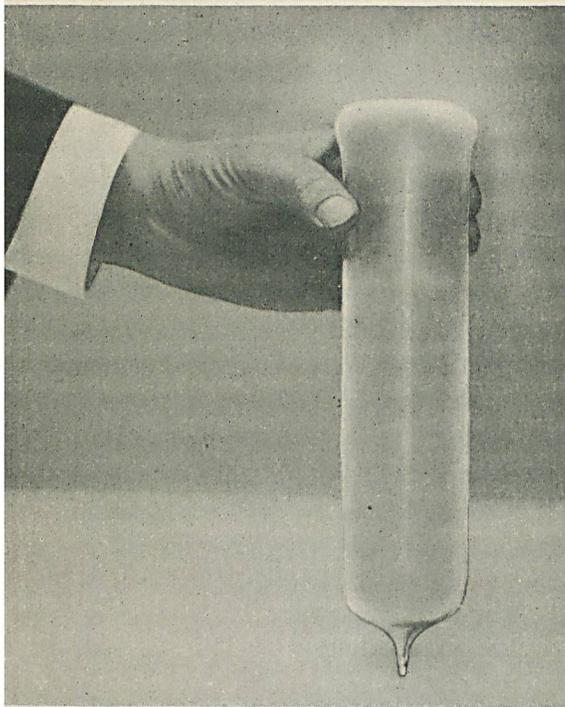


FIG. 15. — Insuffisance du vide seul contre les rentrées de chaleur : après quelques minutes d'ébullition, l'éprouvette se recouvre de givre.

de buée, puis des belles arborescences que l'hiver dépose sur les carreaux de nos fenêtres et qui sont, en l'occurrence, un autre indice de l'évaporation encore trop rapide de l'air liquide. C'est qu'en effet le moyen proposé par M. d'Arsonval ne met obstacle qu'à la conductibilité — et que la chaleur peut se propager d'une tout autre façon.

D'ailleurs, il faut bien qu'il en soit ainsi, car, si la chaleur n'avait pas à sa disposition d'autres moyens de transport que la conductibilité, comment le Soleil pourrait-il échauffer notre globe, séparé qu'il est de nous par le vide à peu près absolu des espaces interplanétaires? Vous savez, au surplus, qu'une feuille de métal exposée au soleil devient brûlante, bien plus chaude que l'air ambiant; ce ne peut être l'air qui lui cède sa chaleur par convection, puisqu'il est plus froid qu'elle : cet échauffement anormal est dû à la chaleur directement rayonnée par le Soleil sous forme de *radiations calorifiques*, tout à fait analogues aux radiations lumineuses.

Tous les corps chauds — et, je le répète, tous les corps qui nous entourent, même la glace, sont *brûlants* par rapport à l'air liquide — émettent comme le Soleil des radiations calorifiques; c'est cette chaleur rayonnée qui, dans ce récipient à vide, mais à parois transparentes, pénètre sans obstacle jusqu'à l'air liquide; c'est elle qui le fait évaporer avec une rapidité beaucoup trop grande encore, bien qu'environ *vingt fois moindre* déjà que quand la conductibilité pouvait intervenir. Cette pénétration résiduelle est donc néfaste, car elle nous empêche de conserver beaucoup plus d'un jour l'air liquide contenu dans un récipient d'un litre.

Perfectionnement de Dewar. Récipients à vide argentés. — Ainsi, malgré l'heureux emprunt fait à Dulong et Petit, nous serions assez peu avancés en matière de conservation d'air liquide si, par une coïncidence vraiment curieuse, d'autres travaux des deux mêmes savants ne s'étaient trouvés là fort à propos pour nous rendre encore un signalé service : grâce à eux, il est possible de réduire presque à rien le résidu de transmissibilité calorifique déjà si faible des récipients d'Arsonval,

en barrant à son tour le chemin à la chaleur rayonnée.

Dulong et Petit ont montré en effet que le *pouvoir rayonnant* d'une paroi varie beaucoup suivant la nature de la surface qui la constitue. Une surface blanche et brillante rayonne beaucoup moins de chaleur qu'une surface sombre et terne. Le poêle en fonte noircie des logements d'ouvriers chaufferait beaucoup mieux que le poêle en faïence des demeures bourgeoises, si le charbon, hélas ! n'y était trop souvent plus parcimonieusement mesuré. Nous nous couvrons en été d'habits blancs, parce que ceux-ci font une sorte d'écran aux radiations solaires, au lieu de rayonner vers notre corps la chaleur qu'ils reçoivent.

Or, dans les tableaux d'essais que nous ont laissés Dulong et Petit, les surfaces en argent poli apparaissent à cet égard comme des écrans supérieurs à tous les autres.

D'où l'idée de Dewar de compléter la conception si heureuse de M. d'Arsonval en *argentant* les surfaces internes des récipients à double paroi et à vide intermédiaire, idée d'autant plus pratique que l'argenture du verre est des plus faciles, grâce à l'action réductrice bien connue du sucre interverti sur les solutions de sels d'argent.

Ce sont ces récipients que vous voyez ici (*fig. 16*), triomphe de l'art du souffleur de verre, car, vous le concevez, il n'est pas fort commode d'arriver à souffler l'un dans l'autre deux ballons concentriques, de plusieurs litres parfois, dont les parois sont à peine distantes de quelques millimètres !

Et la solidité de ces appareils — à de certains égards du moins — est déconcertante, au point de renverser nos idées sur la résistance des matériaux. Si la sphère extérieure est assez épaisse, de manière à pouvoir résister aux chocs accidentels, le ballon intérieur, lui, est en verre

extrêmement mince, 2 dixièmes de millimètre dans cer-

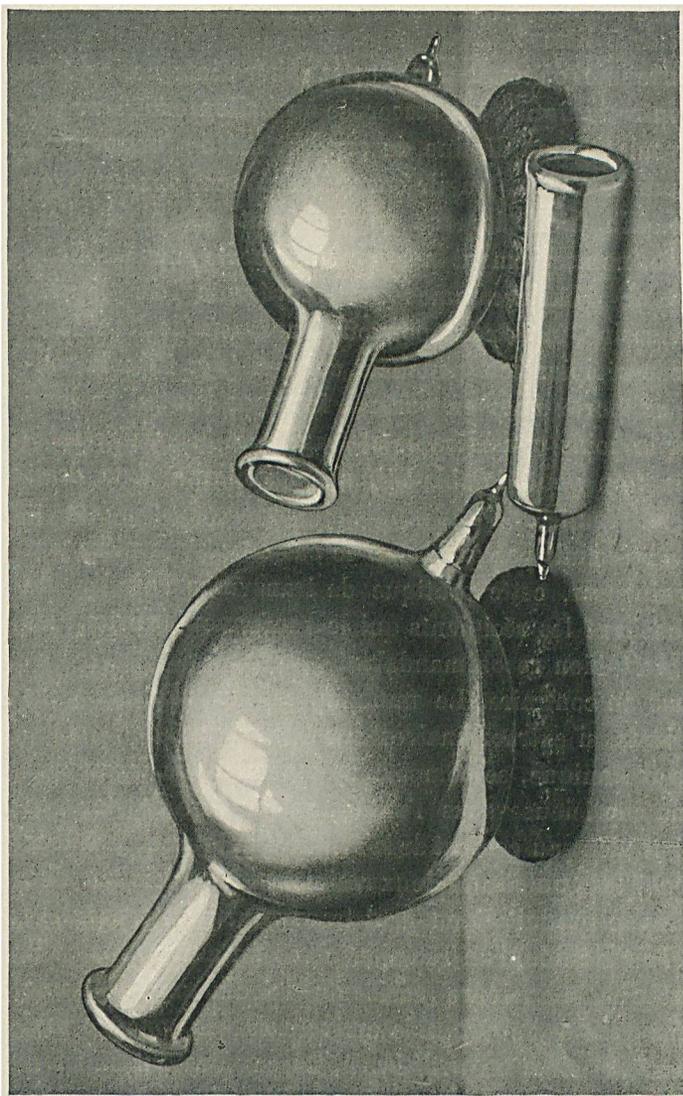


Fig. 16. — Récipients à double enveloppe, vide intermédiaire et argenture de d'Arsonval et Dewar : conservation presque parfaite de l'air liquide.

tains récipients : or, cette pelure d'oignon, cette bulle de savon a à supporter, de par le vide interne, une pression

de 1 kilogramme par centimètre carré, soit un effort total d'environ 1.500 *kilogrammes* dans le cas d'un récipient de 5 litres !

Autre sujet d'étonnement : cette sphère interne, comme le montre la figure, est raccordée au ballon extérieur par un goulot d'une dizaine de centimètres de longueur et par une soudure, fragile comme toutes les soudures de verre. Eh bien ! lorsque le récipient est plein d'air liquide, non seulement la soudure supporte sans faiblir le poids de 5 kilogrammes que représente l'air liquide emmagasiné, mais nous pouvons transvaser le liquide et vider le récipient en penchant celui-ci (*fig. 17*) ; la soudure supporte alors en porte à faux au bout d'un long levier le poids considérable et fragile de la sphère intérieure : on peut, semble-t-il, s'émerveiller à bon droit d'un tel résultat.

Il ne s'ensuit pas que, sauf le cas des éprouvettes peu volumineuses, cette pratique de transvaser l'air liquide en penchant les récipients qui le renferment, surtout les gros, soit bien recommandable.

Tout au contraire. Le malheur est, en effet, que ces récipients, si extraordinaires sous le rapport de la résistance mécanique, se comportent cependant de façon tout à fait capricieuse sous l'effet de l'air liquide, lorsque celui-ci vient au contact de la soudure qui raccorde à leur sommet les goulots des deux récipients. Neuf fois sur dix, rien ne se produit et on peut transvaser sans précaution tout l'air liquide d'un récipient dans un autre sans qu'il en résulte le moindre accident ; la dixième fois, une simple goutte d'air liquide arrivera sur la soudure mal disposée, et clac ! un petit bruit, un craquement sinistre, immédiatement suivi du *givrage* extérieur de tout le ballon, vous apprendra que celui-ci est bon à jeter au panier.

D'autres fois, les choses se passent d'une façon plus bruyante : la rupture est accompagnée d'une explosion analogue à celle des lampes à incandescence, causée

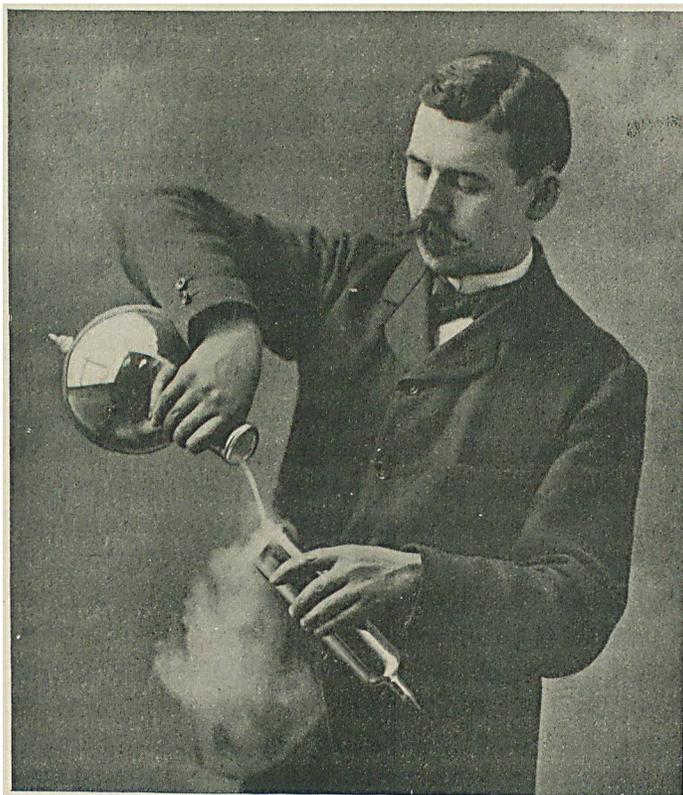


FIG. 17. — Une manœuvre imprudente : transvasage direct de l'air liquide d'un récipient dans un autre.

comme elle par la rentrée brusque de l'air extérieur dans le vide intermédiaire, et, comme elle, accompagnée de la pulvérisation du récipient.

Cette fragilité extrême est d'autant plus regrettable que ces récipients, par la difficulté, par les soins minutieux exigés dans leur fabrication, sont d'un prix très élevé

L'essentiel est donc d'éviter d'une manière absolue que l'air liquide ne vienne au contact de la soudure pen-

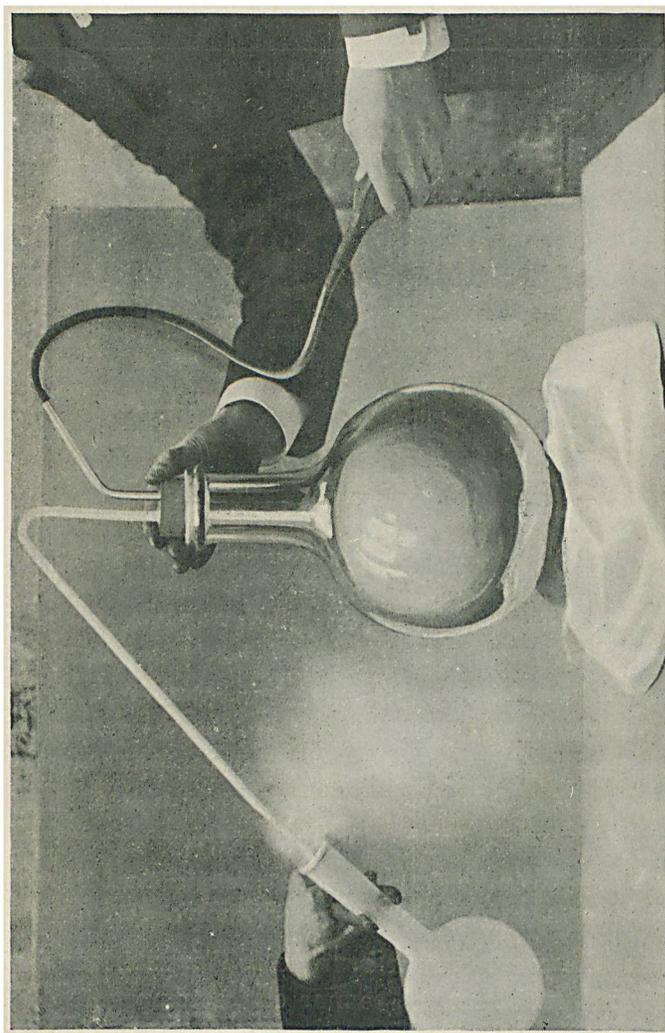


Fig. 48. — Comment procèdent les opérateurs prudents pour soutirer l'air liquide.

dant les manipulations. Cette condition peut être assez aisément réalisée (*fig. 48*) en bouchant le récipient à l'aide

d'un bouchon de caoutchouc à deux trous, dans lesquels passent deux tubes de verre; l'un de ces tubes s'arrête au-dessus de la surface du liquide et est muni d'une de ces poires en caoutchouc à l'aide desquelles les artistes capillaires nous inondent la figure de parfums discutables; l'autre tube plonge dans l'air liquide et se recourbe à l'extérieur pour permettre au liquide chassé par la manœuvre de la poire de se déverser dans le réceptacle choisi. L'ennui de ce dispositif est que, très rapidement, le bouchon devient dur comme la pierre et perd toute étanchéité, de sorte que le liquide ne coule bientôt plus que très mal et qu'on risque, en enlevant le bouchon, de tout casser, ce qui n'est pas drôle.

Il faut donc avoir le soin de retirer le bouchon dès que le soutirage est terminé, avant que le durcissement du caoutchouc n'ait pu se produire.

Ces quelques précautions aidant, on peut arriver à rendre très rares les accidents.

Malgré tout, un indiscutable progrès sera réalisé le jour où l'on saura fabriquer en métal de semblables récipients.

Efficacité des récipients d'Arsonval et Dewar. — Fragilité à part, les résultats obtenus par cette combinaison si rationnelle et si élégamment mise au point que constituent les récipients d'Arsonval et Dewar, sont simplement merveilleux. Remplis d'un liquide dont la température diffère de la température ambiante de plus de 200°, la surface extérieure de ces récipients n'en laisse rien paraître, ne se recouvre même pas de la moindre buée!

On conçoit que, dans ces conditions, la durée de la conservation de l'air puisse être très grande. Un ballon de 5 litres appartenant à M. d'Arsonval renfermait encore un peu d'air liquide vingt-huit jours après

son remplissage! Vingt-huit jours en ballon, c'est un record que messieurs les aéronautes n'ont encore battu qu'avec la collaboration de Jules Verne, et nous avons le droit, par comparaison, de nous féliciter grandement.



FIG. 19. — Disposition d'une éprouvette à vide sur un pied pour les manipulations; coupe pour les essais.

Il faut remarquer d'ailleurs que tous les récipients ne se comportent pas d'aussi brillante façon que l'exemplaire hors ligne dont je viens de parler. Il faut en effet que le vide soit poussé jusqu'à ses plus extrêmes limites (vide de Crookes), les dernières traces d'air jouant un rôle

capital, dont il est difficile d'ailleurs de s'expliquer l'importance. En fait, on arrive assez couramment à des récipients pouvant garder l'air de huit à quinze jours avant évaporation complète. Cela implique que la transmissibilité calorifique, déjà réduite au $1/15$ par le vide de d'Arsonval, subit encore pareille réduction par l'argenture, ce qui porte à $1/200$ la réduction totale !

On peut encore faire à propos de ces récipients une remarque intéressante : de même qu'ils s'opposent à l'entrée de la chaleur dans leur intérieur, de même, si un liquide chaud y est renfermé, ils s'opposent avec la même efficacité à ce que ce liquide se refroidisse : ce seraient des récipients merveilleux pour ces domestiques comme il y en a trop, ménagers de leurs peines au point de n'aimer pas faire chauffer le café tous les jours. En voici que j'ai fait chauffer il y a quatre jours avant de l'introduire dans ce récipient : vous risqueriez de vous brûler en le buvant de suite !

A côté des ballons à double enveloppe destinés plus spécialement à servir de réservoirs d'air liquide, la figure 19 montre d'autres formes de récipients, éprouvettes avec pied, coupe à champagne, appropriées aux expériences si curieuses auxquelles se prête l'air liquide et établies sur les mêmes principes du vide intermédiaire et de l'argenture. Dans les conférences, cependant, il est souvent commode de se servir de récipients à vide *non argentés*, qui permettent à l'auditoire de mieux se rendre compte des essais effectués. Dans ces expériences de peu de durée, l'évaporation un peu plus rapide est sans importance, car 2 ou 3 litres d'air liquide suffisent parfaitement pour la conférence la plus détaillée.

Emploi des basses températures pour la production des vides parfaits. — On vient de voir quelle im-

portance extrême présente pour la technique de la conservation des basses températures l'obtention de vides parfaits : je le répète, des vides poussés jusqu'au dix-millième d'atmosphère, par exemple, seraient parfaitement insuffisants pour fournir de bons récipients à air liquide.

Or, il est très curieux de constater que les basses températures elles-mêmes fournissent précisément le moyen le plus efficace et le plus commode que l'on connaisse pour l'obtention de ces vides extraordinaires : le tout... est d'avoir à sa disposition de l'hydrogène liquide et de suivre les indications de M. Dewar : autant dire que le procédé n'est pas jusqu'à nouvel ordre à la portée de tout le monde, l'hydrogène liquide, substance bien plus extraordinaire encore que l'air liquide, puisqu'elle ne pèse que *quatre-vingts grammes* par litre et bout à -252° , n'étant encore préparé, de par le monde, qu'au laboratoire du professeur Dewar à la *Royal Institution* !

Quoi qu'il en soit, voici le procédé : on verra qu'il valait une mention.

Le récipient dans lequel on veut faire le vide, tube de Crookes, ballon, récipient à double enveloppe, est relié par un tube de verre soudé à une petite ampoule également en verre ; celle-ci est plongée quelques instants dans un récipient renfermant de l'hydrogène liquide. A cette température fantastique de -252° , l'air est non seulement liquéfié, mais gelé au point de ne plus posséder la moindre tension de vapeur : aussi, toutes les molécules d'air du ballon, jusqu'à la dernière, viennent-elles en un clin d'œil se précipiter dans l'ampoule pour s'y congeler.

Un coup de chalumeau sépare le récipient de l'ampoule, et le tour est joué : le vide, réalisé ainsi en quelques instants, est si parfait que l'étincelle électrique ne peut le traverser !

Inutile de dire que, dans ces conditions, il n'y a pas besoin de se préoccuper de faire le vide à l'avance dans les récipients à double enveloppe destinés à contenir de l'hydrogène liquide, et qu'automatiquement ce liquide doit s'entourer, en guise d'auréole, d'un vide à nul autre pareil!

Quand l'hydrogène liquide sera produit économiquement, ce qui ne tardera certainement pas, il supplantera bien probablement dans l'obtention du vide les moyens pénibles et longs employés aujourd'hui dans la fabrication des lampes à incandescence, des ampoules pour la radiographie, des récipients à air liquide.

Dès maintenant, il est vrai, on aurait la ressource de remplir les récipients à vider avec de l'acide carbonique et de condenser ce gaz à l'aide de l'air liquide; mais, en matière de récipients à air liquide tout au moins, les résultats ne seraient pas à beaucoup près aussi bons, en raison des traces d'air que renferme toujours l'acide carbonique et de l'importance extrême que nous avons reconnue aux ultimes résidus gazeux, inévitables dans ces conditions.

Impossibilité de conserver l'air liquide en vases clos. — Si l'air liquide se conserve fort aisément dans les vases *ouverts* dont nous venons de parler, ce serait d'ailleurs une erreur complète de croire qu'il se conserverait mieux encore dans des récipients métalliques clos, sous le fallacieux prétexte que l'évaporation serait ainsi totalement évitée. Combien de personnes tombent dans cette erreur!

Or, non seulement il n'en est pas ainsi, mais il y a même beaucoup mieux. Si paradoxal que cela puisse paraître, il est rigoureusement impossible de conserver *une seule goutte* d'air liquide dans un récipient clos, en

le supposant naturellement assez solidement constitué pour résister aux énormes pressions qui seraient mises en jeu.

En effet, si dans un récipient ouvert les rentrées de chaleur sont annihilées à chaque instant par l'élimination au dehors d'une quantité correspondante de liquide évaporé, ce qui permet au liquide restant de maintenir jusqu'à complète évaporation sa température de -190° , il n'en peut être ainsi dans un récipient fermé : ici, au contraire, la chaleur s'accumulera nécessairement à mesure de sa pénétration dans le récipient, d'où un relèvement parallèle et progressif de la température et de la pression de l'air liquide, qui atteindra bientôt sa température critique, soit -140° .

Mais, au-dessus de cette température, vous savez que l'air ne peut plus subsister à l'état liquide : il prendra donc tout entier l'état gazeux en développant naturellement une pression formidable, qui pourra atteindre finalement 800 atmosphères, puisque la densité de l'air liquide est 800 fois celle de l'air gazeux à la température ordinaire. Le récipient sera alors transformé en un obus formidable, mais il ne renfermera plus une seule goutte d'air liquide.

Voici, à l'appui des explications précédentes, une petite expérience qui ne manque pas d'intérêt. Dans ce tube de fer brasé et clos à l'une de ses extrémités (*fig. 20*), je verse un peu d'air liquide, et, lorsque l'ébullition violente du début est apaisée, je le ferme avec ce bouchon de caoutchouc : au bout d'un instant, l'élévation rapide de la pression à l'intérieur du tube projette le bouchon avec violence.

Qui sait ! avec un peu du flair qui les caractérise, les artilleurs verront peut-être dans cette inoffensive expérience la formule de l'artillerie de l'avenir !

On voit, d'après ces explications, qu'on ne peut conserver à l'état liquide dans des bouteilles d'acier que les gaz dont la température critique est supérieure à la tem-

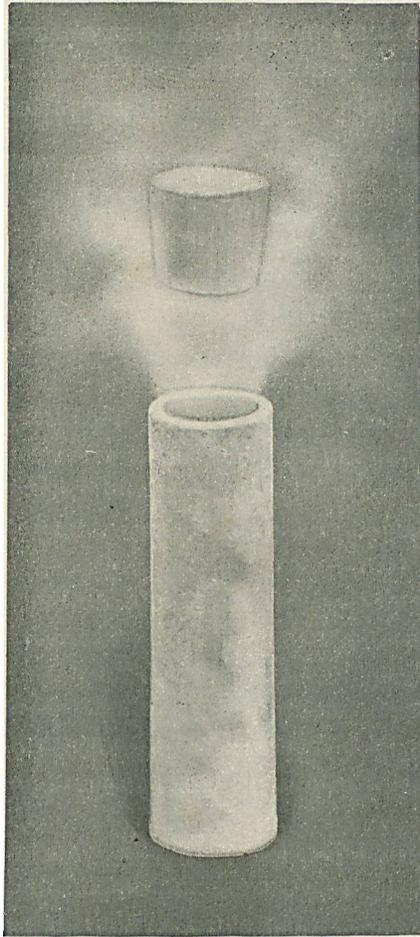


FIG. 20. — L'artillerie de l'avenir ?...

pérature ambiante, c'est-à-dire ceux qui peuvent se liquéfier sous la seule action de la pression, acide carbonique, acide sulfureux, etc.

Ainsi, voilà acquise cette chose assez bizarre ; si les récipients à air liquide conservent — plus ou moins bien — le liquide qu'ils renferment, c'est précisément parce qu'ils sont ouverts !

Un simple tampon de coton pour atténuer dans une certaine mesure l'entrée de la chaleur extérieure par le goulot, c'est tout ce qu'ils peuvent supporter.

CHAPITRE TROISIÈME

PROPRIÉTÉS ET EFFETS PHYSIQUES DE L'AIR LIQUIDE

UN LIQUIDE PEU BANAL

Maintenant que nous avons, grâce à nos récipients à vide, un moyen pratique de manipuler l'air liquide commodément et sans pertes excessives, il est temps de passer en revue ses principales propriétés. Si vous n'y voyez pas d'inconvénients, nous commencerons par ses propriétés physiques.

Couleur. — Pourquoi le ciel est-il bleu ? Que de discordes cette palpitante question n'a-t-elle pas semées au camp des physiciens ! Or, ainsi que vous pouvez le constater par l'échantillon renfermé dans cette éprouvette non argentée, l'air liquide présente une couleur nettement *bleue*, due à l'oxygène qu'il renferme et d'autant plus intense qu'il est plus oxygéné. C'est à peu près exactement la couleur du ciel et peut-être bien, en définitive, qu'après avoir forgé tant de savantes théories sur l'origine de l'azur céleste, on en viendra tout bonnement à admettre que celui-ci est dû à la présence de l'oxygène. Ce sera faire preuve, à tout le moins, d'une simplicité de bon goût.

Quelquefois, l'aspect de l'air liquide est opalescent, laiteux, ce qui provient de minuscules cristaux d'acide

carbonique, d'eau et, dit-on aussi, de quelques-uns des nouveaux gaz de l'atmosphère, flottant au sein du liquide. Quelle mine intéressante pour les chimistes! Mais vous pouvez voir ici (*fig. 21*) avec quelle facilité extraordinaire le liquide filtre à travers un filtre en papier ordinaire : les

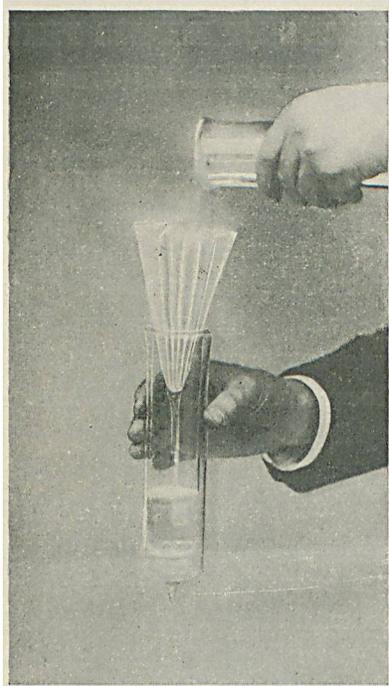


FIG. 21. — Filtration de l'air liquide à travers un filtre ordinaire.

personnes qui assistent à cette expérience pour la première fois ne manquent jamais de croire que le filtre est crevé : il n'en est rien pourtant, car le liquide qui passe, vous le voyez, est parfaitement limpide et très mobile, tandis que les cristaux d'acide carbonique restent sur le filtre.

Un conseil : n'employer pour cette expérience que le filtre déployé, sans entonnoir de verre, car celui-ci ne

manquerait probablement pas de casser et, par sympathie, l'éprouvette à vide en ferait autant...

Point d'ébullition. — En ce qui concerne la température d'ébullition sous la pression atmosphérique, nous avons admis à différentes reprises le chiffre de -190° : c'est une valeur approximative en raison de la composi-

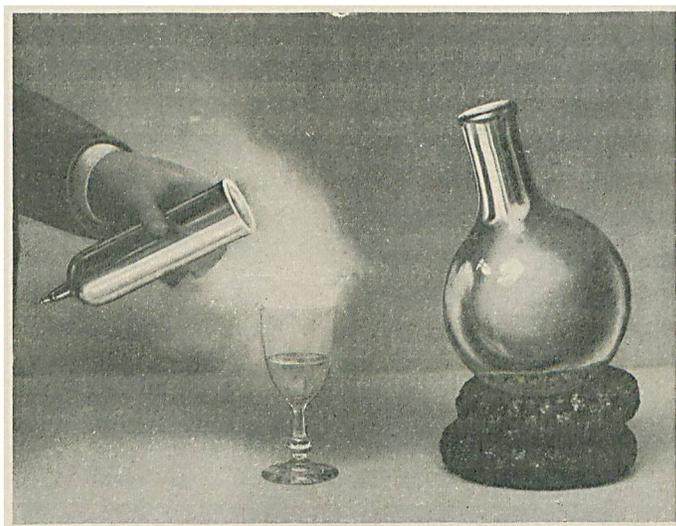


FIG. 22. — Ébullition violente de l'air liquide versé dans un verre d'eau.

tion essentiellement variable de l'air liquide. Nous relèverons en effet un peu plus loin le fait, extrêmement important, que cette composition se modifie à chaque instant au cours de la vaporisation, et que le liquide non évaporé *s'enrichit progressivement en oxygène*. Parallèlement, la température d'ébullition remonte et, partie de -194° , arrive peu à peu à -182° , qui représente le point d'ébullition de l'oxygène pur sous la pression atmosphérique.

Densité. — Versons dans un verre rempli d'eau une petite quantité d'air liquide (*fig. 22*). L'ébullition violente

qui se produit est accompagnée de fumées épaisses et veloutées, du plus bel effet, surtout dans une salle brillamment éclairée : vous voyez se former des globules qui, malgré l'évaporation violente, s'enfoncent par moments au-dessous du niveau de l'eau : cela provient de ce que la densité de l'air liquide, coïncidence curieuse, est approximativement égale à celle de l'eau, c'est-à-dire qu'un litre d'air liquide pèse à peu près 1 kilogramme : un peu plus, un peu moins, suivant que, d'après son degré de vaporisation, il est plus ou moins riche en oxygène. Exactement, la densité part de 0,93, pour atteindre finalement 1,12.

Quantité de froid mise en jeu par l'air liquide. Son emploi comme réfrigérant. — C'est ici le moment de détruire une légende.

Vous remarquerez que, dans l'expérience précédente, malgré le contact d'un liquide aussi violemment froid, l'eau de notre verre est restée parfaitement liquide. Or, certains publicistes, qui n'ont jamais vu une goutte d'air liquide, même d'imagination, et brûlent d'autant plus de paraître documentés, affirment « de chic » que ladite goutte suffit à congeler un verre d'eau tout entier, et que, par conséquent, le règne de la glace est fini.

C'est tout à fait faux, comme vous voyez.

A la vérité, le liquide du verre est fortement rafraîchi, mais c'est tout au plus si un minuscule glaçon flotte sur l'eau à l'endroit où chaque globule d'air liquide a achevé de s'évaporer.

Effectivement, en ce qui concerne la *quantité* de froid qu'il emmagasine, l'air liquide n'a rien d'extraordinaire ; sa chaleur de vaporisation est de 65 calories par kilogramme environ, de sorte que, chose inattendue, 1 kilogramme d'air liquide produit en s'évaporant *un peu*

moins de froid que 1 kilogramme de glace en fondant, laquelle absorbe en effet dans cette fusion 79 calories. Il est vrai qu'on peut, en s'y prenant convenablement, ajouter à la chaleur de vaporisation la chaleur de *réchauffement* du gaz produit, 60 calories environ, ce qui porte le total de l'effet réfrigérant de 1 kilogramme d'air liquide à celui de 1^{kg},5 de glace : c'est peu ; assurément, on pouvait s'attendre à mieux, mais enfin c'est comme cela, n'en déplaise aux gens bien informés¹.

Ainsi, voilà qui est acquis : ce qui est remarquable dans l'air liquide, ce n'est nullement la quantité de froid qu'il met en jeu, mais la *qualité* de ce froid, la température extraordinairement basse qu'il permet de réaliser ; seulement, par sa qualité même, ce froid emmagasiné dans l'air liquide est obtenu à bien plus grands frais que celui mis en jeu par la glace. D'où cette conclusion : si la qualité du froid est nécessaire pour l'application frigorifique que nous avons en vue, si nous voulons à son aide geler de l'alcool, par exemple, l'emploi de l'air liquide sera parfaitement logique, parfaitement justifié ; mais cet emploi serait ridicule si la *qualité* des frigories était indifférente, comme c'est le cas s'il s'agit de frapper des carafes ou de ralentir la fermentation de la bière. Se servir d'air liquide au lieu de glace en ces circonstances serait exactement aussi déraisonnable que d'aller chercher de l'eau à 190 mètres de profondeur, ayant celle d'un puits de 10 mètres ou même celle d'une source à sa disposition.

Ainsi donc, en général, les applications où la glace est actuellement employée ne justifient pas du tout, comme on l'a prétendu, l'emploi de l'air liquide. C'est un de ces

1. On peut encore augmenter l'effet frigorifique de l'air liquide de quelques dizaines de calories en faisant accomplir à l'air vaporisé sous pression du travail mécanique.

emplois irrationnels qu'on a la manie de proposer et pour lesquels il est de l'intérêt bien compris de la nouvelle industrie de décliner les invitations.

Bien entendu, il faut excepter de cette sévère appréciation les cas où quelque effet particulier à l'air liquide, outre celui de la réfrigération, aurait à intervenir. C'est



FIG. 23. — Évaporation brusque de l'air liquide versé sur une table.

ainsi que l'air liquide sera utilement employé quand on voudra obtenir un froid rigoureusement exempt d'humidité, comme la question se pose souvent en matière de conservation des denrées alimentaires, dans l'industrie viticole, etc. ; ou, mieux encore, quand le renouvellement de l'atmosphère en même temps que sa réfrigération présentera de l'intérêt. Ce fait sera certainement utilisé en de nombreuses circonstances par les salles de conférences,

théâtres, etc., qui trouveront à l'employer un intérêt d'autant plus puissant que la teneur en oxygène de l'air liquide pourra être aisément renforcée, comme nous le verrons un peu plus loin, d'où une suroxygénation facile de l'atmosphère des salles. On aura là un moyen aussi original qu'efficace de chauffer l'enthousiasme des spectateurs — tout en les rafraîchissant — et de les remplir d'indulgence même pour les pannes les plus décolorées de nos littérateurs...

L'air liquide versé dans l'atmosphère produit d'abondantes fumées blanches, surtout sous le souffle de l'opérateur. Ces vapeurs sont froides, très froides, en dépit de leur aspect de vapeur d'eau bouillante. Il ne faudrait pourtant pas les prendre pour des fumées d'air liquide : ce serait tomber d'un excès dans un autre. Elles proviennent tout simplement de la congélation instantanée des impuretés de l'atmosphère, vapeur d'eau et acide carbonique.

Si le filet d'air liquide vient à toucher le tapis qui recouvre cette table (*fig. 23*), son évaporation violente produit le bruit d'un fer rouge plongé dans l'eau.

Effets singuliers dus à la caléfaction. — Ici, j'ai à vous signaler une bizarrerie de plus à l'actif de l'air liquide. Malgré sa température de 190° au-dessous de zéro, ce mince filet d'air liquide peut être reçu sur le dos de la main (*fig. 24*) sans donner d'autre effet qu'une sensation de fraîcheur à peine marquée : j'ajoute que, par précaution, il ne faut pas lancer de trop haut ce filet sur la main.

Ce résultat inattendu est dû à la température très élevée de la main par rapport à l'air liquide, température qui entraîne la formation entre l'air liquide et la peau d'une couche gazeuse mauvaise conductrice de la chaleur et empêchant le contact direct : c'est, en d'autres termes,

un phénomène de *caléfaction* analogue à celui d'une goutte d'eau qui fait les... cent pas sans bouillir sur une plaque de fer chauffée au rouge. Si on faisait couler le jet

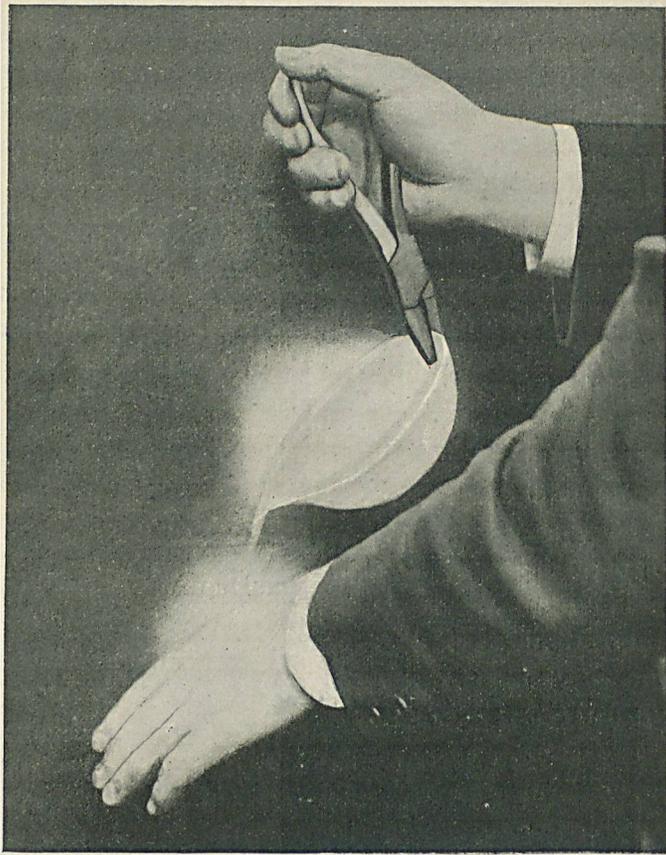


FIG. 24. — Air liquide reçu impunément sur le dos de la main.

de trop haut, il pourrait se faire que la violence de la chute ne provoque le contact avec la peau en certains endroits, et chacun des points touchés, instantanément anémié et jauni, serait le lendemain le siège d'une ampoule tout à fait analogue à celle d'une *brûlure*: ce sont

en effet de véritables brûlures que provoquent ces basses températures en déterminant la disruptive violente des



FIG. 23. — La consigne est de casser!

tissus : ici comme en beaucoup de choses, les extrêmes se touchent.

· C'est encore en vertu d'un phénomène de caléfaction

que ce verre épais dans lequel je vais verser brusquement de l'air liquide (*fig. 25*) ne cassera pas au premier instant, l'air liquide n'étant pas en contact intime avec lui ; mais le verre, cependant, va se refroidir petit à petit ; à un moment donné, l'air liquide pourra le mouiller brus-

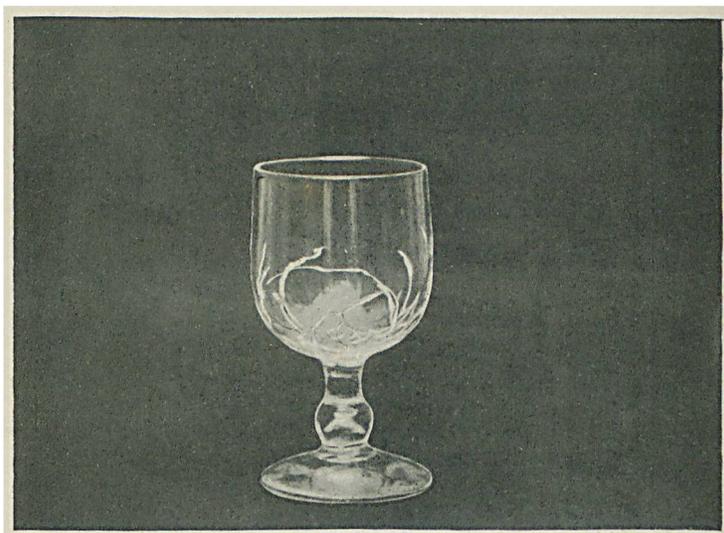


FIG. 26. — Crac !

quement et, fort probablement, vous le verrez voler en éclats (*fig. 26*) par suite de sa contraction violente à l'endroit du contact. Mais, si le verre contient un peu d'eau, on peut sans danger y verser de l'air liquide comme nous l'avons vu (*fig. 22*), de sorte qu'on pourra impunément frapper le champagne à l'air liquide dans les coupes classiques.

Passons à une expérience à laquelle vous ne vous seriez certainement pas livré de votre propre initiative : je plonge mon doigt dans l'air liquide (*fig. 27*) : je puis le retirer sans dommage à la condition *d'opérer très vite*.

Inutile, donc, de dire que la photographie qui me représente opérant moi-même — tel Pierre Petit — est un instantané! C'est encore là un effet dû à la discrète entremise d'une couche gazeuse microscopique. De la même façon, je pourrai saisir sans difficulté une allumette flottant sur l'air liquide. Mais, de grâce, si vous voulez

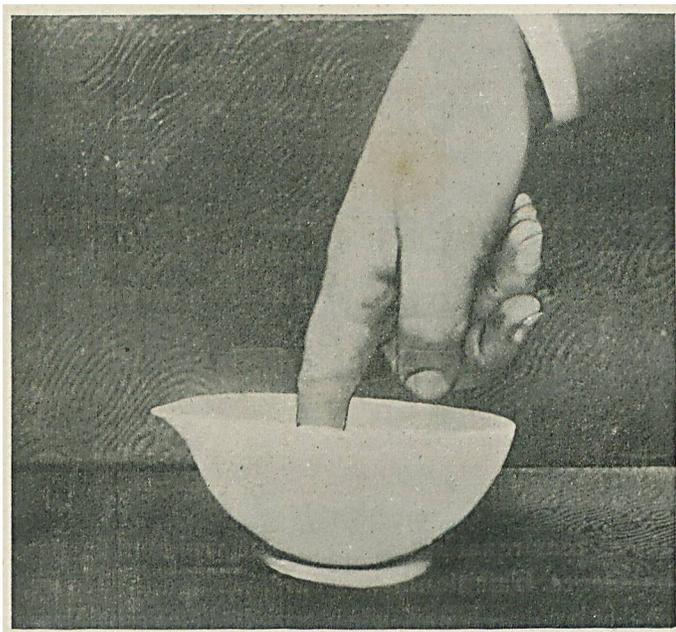


FIG. 27. — Curieuse conséquence de la caléfaction.

répéter l'essai pour votre compte, autant que possible ne restez pas en route! quelques secondes d'immersion, et vous en serez pour une brûlure très grave; quelques secondes encore, et votre doigt ne serait plus qu'un petit bloc de pierre, essentiellement friable sous le choc du marteau!

❖ Rien de plus facile, si l'expérience vous tente, de vous en assurer...

Grâce à cet effet de caléfaction que je viens de signaler, le contact direct de l'air liquide en cas de ruptures de récipients ou d'autres circonstances est généralement inoffensif; mais le toucher des objets métalliques refroidis à son contact peut être plus désagréable, aucune couche gazeuse protectrice ne pouvant évidemment s'entre-mettre ici. Aussi sera-t-il bon de ne toucher ces objets que par l'intermédiaire d'un chiffon tamponné, en évitant toutefois que ce chiffon ne vienne à se trouver imbibé d'air liquide, car son contact à lui-même serait alors des plus désagréables — sinon dangereux.

Propriétés magnétiques de l'air liquide. — Puisque nous en sommes à l'étude des propriétés physiques de l'air liquide, indiquons-en une d'un ordre un peu spécial,

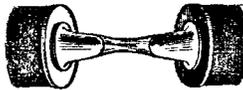


FIG. 28. — Air liquide maintenu par le magnétisme de l'oxygène entre les pôles d'un électro-aimant puissant.

mais si remarquable qu'on ne peut vraiment la passer sous silence. L'air liquide, en effet, partage avec le fer, le nickel et le cobalt la curieuse propriété d'être sensiblement *magnétique*. Assurément, son magnétisme n'est pas comparable à celui du fer : il lui permet cependant de s'attacher aux pôles d'un puissant électro-aimant (*fig. 28*) dont il se détache dès qu'on coupe le courant.

Cette propriété est due à l'oxygène et est en conséquence d'autant plus marquée que le liquide est plus oxygéné. Quand on fait *solidifier* l'azote de l'air en faisant, comme je le dirai plus loin, bouillir l'air liquide dans le vide, l'oxygène reste à l'état liquide dans la gelée formée et on peut alors, à l'aide d'un électro-aimant, faire sortir les gout-

telettes d'oxygène des mailles du réseau dans lequel elles sont emprisonnées. Nous sommes donc en état à l'heure actuelle de trier les molécules de l'air avec un aimant, exactement comme nous séparerions de la limaille de fer et de la limaille de cuivre.

C'est le cas, semble-t-il, d'observer que la science nous réserve parfois de singulières surprises !

On peut faire sous une autre forme, plus visible pour un nombreux auditoire, cette expérience du magnétisme de l'oxygène : un tube à essai en verre mince rempli d'air liquide est suspendu à un fil long et fin attaché à une potence. On colle le tube à cet électro-aimant, qu'on excite : le tube reste collé. On coupe l'excitation : le tube se détache.

Il faut, pour une bonne réussite, que l'électro soit assez puissant et le fil très long, 1^m,50 à 2 mètres, de manière que l'angle du fil avec la verticale quand le tube est collé soit très faible.

Durcissement de différents corps dans l'air liquide.

— Vous avez risqué, il n'y a qu'un instant, de vous geler un doigt en le plongeant dans l'air liquide : ceci n'eût été qu'un cas particulier d'une des applications les plus curieuses de ce corps — ou plutôt de la température anormale qu'il met en jeu — celle de durcir à son contact, au point de les rendre méconnaissables, la plupart des corps qui nous sont familiers.

Ce tube de caoutchouc que je trempe dans l'air liquide y devient raide comme une baguette de tambour et se casse comme du verre sous le choc du marteau (*fig. 29*) ; ces fruits, grains de raisin, cerises, deviennent de véritables billes de verres (*fig. 30*) et rebondissent comme telles sur un plan de métal.

Bien tristes seraient les menus de nos repas si nous

vivions à ces températures. A côté de ces fruits devenus

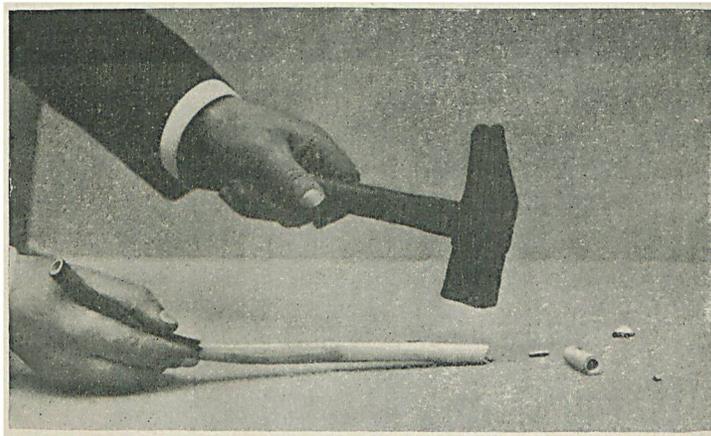


FIG. 29. — Pulvérisation d'un tube de caoutchouc durci dans l'air liquide.

devenus comme des cailloux, contemplez ce bifteck, de per-

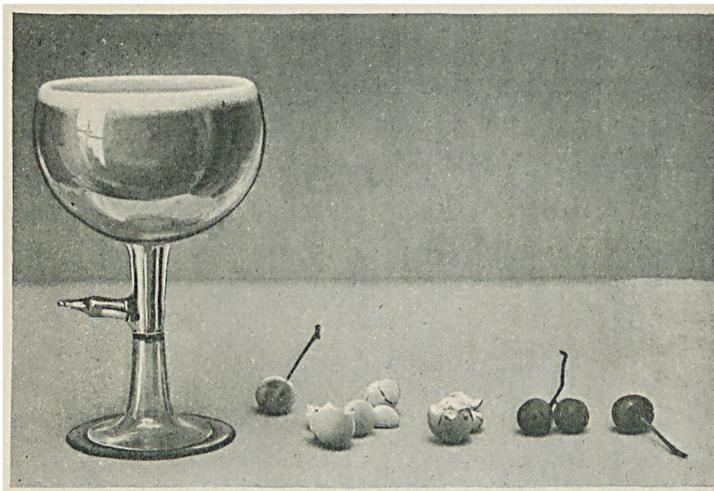


FIG. 30. — Fruits congelés dans l'air liquide. — A droite, fruits non congelés.

mière qualité, paraît-il, et qui, au sortir de ce léger bain

dans l'air liquide, ne vous ferait certes pas de bien en tombant sur vos cors, à en juger par l'entrain avec lequel

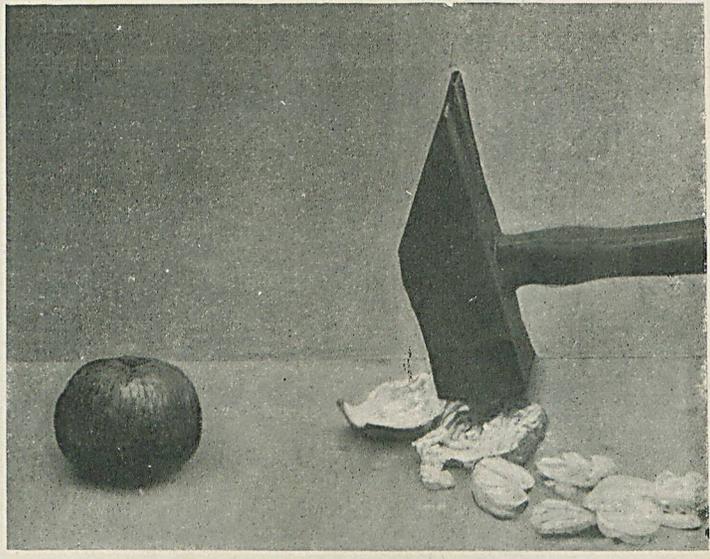


FIG. 31. — Pulvérisation d'une orange congelée

il casse les assiettes (*fig. 32*). C'est même sous cet aspect,

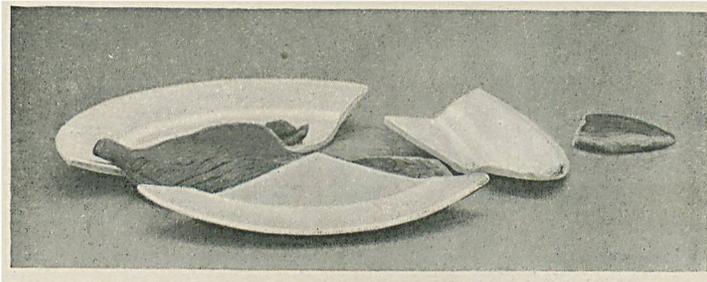


FIG. 32. — Un bifteck... coriace.

hélas! que l'air liquide est le plus connu du commun des mortels. Heureusement qu'il a à son actif des usages et des ambitions autrement relevés!...

Le liège, désespoir des gens qui ont à le pulvériser, se réduit en poudre avec la plus grande facilité lorsqu'il est imbibé d'air liquide ; la laine, le feutre, deviennent très friables dans les mêmes conditions, et, à ce propos, je vous signalerai la manière de traiter les vieux chapeaux comme

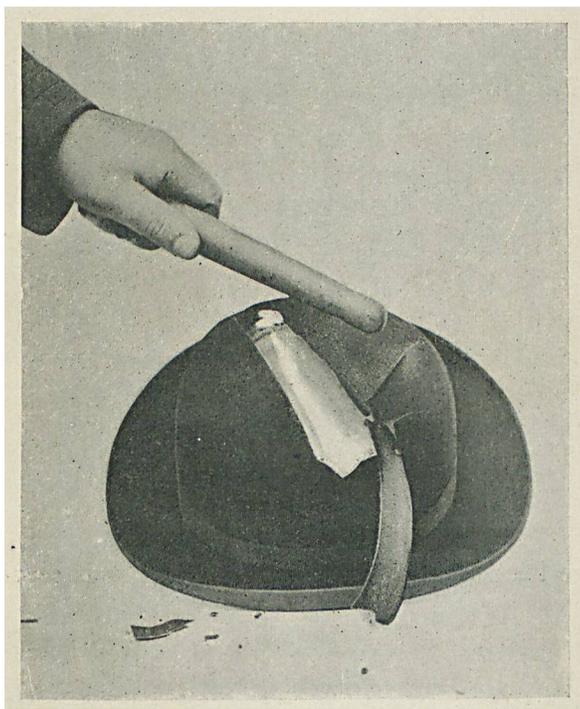


FIG. 33. — Ce que l'air liquide fait d'un chapeau de feutre...

ils le méritent en les imbibant d'un peu d'air liquide et leur assénant un coup de bâton, qui les réduit en miettes (*fig. 33*).

Autre expérience saisissante : des fleurs, cette rose par exemple, se transforme dans l'air liquide en *fleurs de porcelaine* que le moindre frôlement fait tomber en poussière (*fig. 34*).

Tous ces effets sont naturellement purement physiques

et momentanés, et, la température initiale retrouvée, le caoutchouc, les fruits, le bifteck, reviennent, chacun en ce qui le concerne, à l'état primitif.

Modifications dans la cohésion des métaux. — Il n'est pas jusqu'aux métaux qui ne voient dans l'air liquide leur cohésion complètement modifiée du fait du resserrement de leurs molécules.



FIG. 34. — Pulvérisation de fleurs gelées dans l'air liquide.

Des ressorts à boudin en plomb rivalisent avec des ressorts d'acier au sortir de l'air liquide, comme vous le voyez pour celui-ci (*fig. 35*), que j'ai chargé, après son immersion, d'un poids assez considérable! Mais son élasticité éphémère disparaît presque instantanément au point sur lequel mon souffle apporte un courant d'air chaud qui ramène le métal à sa mollesse initiale.

Une sonnette en plomb acquiert dans ce bain réfrigérant des qualités de *sonorité* qu'on n'est pas accoutumé à rencontrer chez ce métal.

Le fer lui-même est profondément modifié dans ses propriétés, au point qu'une casserole de fer-blanc mince plongée dans l'air liquide devient assez cassante pour se briser en morceaux sous un choc un peu fort (*fig. 36*). Par contre, si le métal devient plus cassant, sa résistance

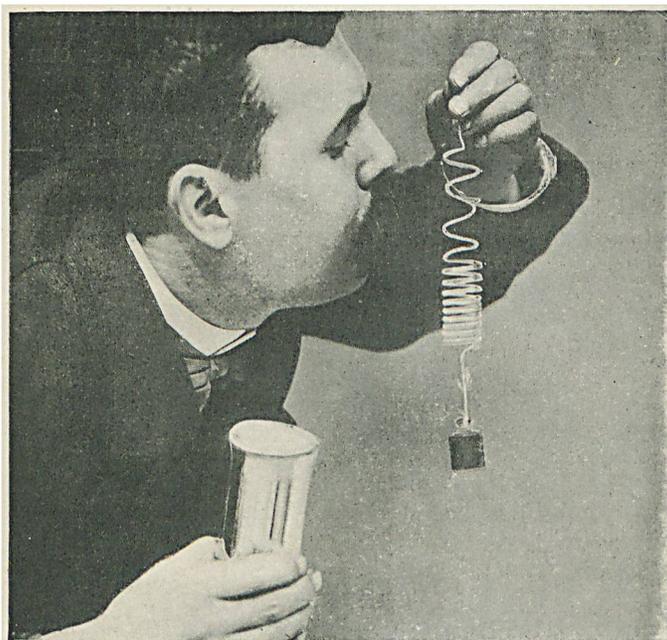


FIG. 35. — Un ressort à boudin paradoxal.

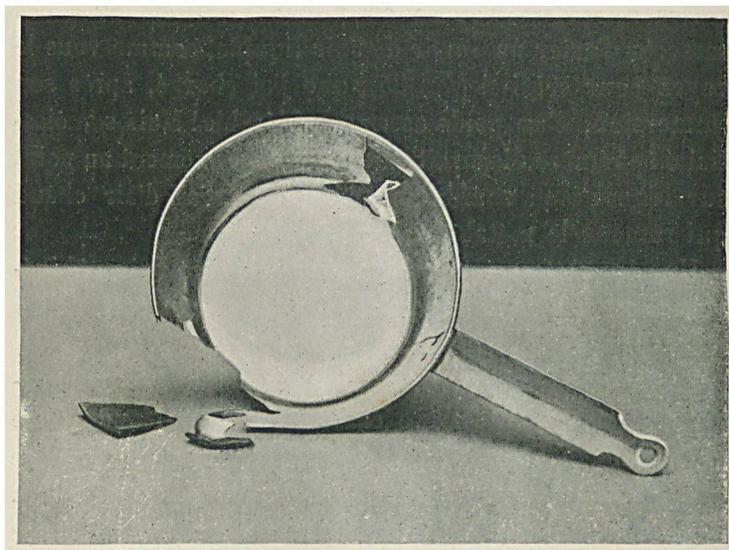


FIG. 36. — Fragilité du fer à la température de l'air liquide.

à la traction est énormément augmentée, au point que des fils en métal peuvent supporter sans se rompre des poids 4 à 5 fois plus lourds qu'à la température ordinaire !

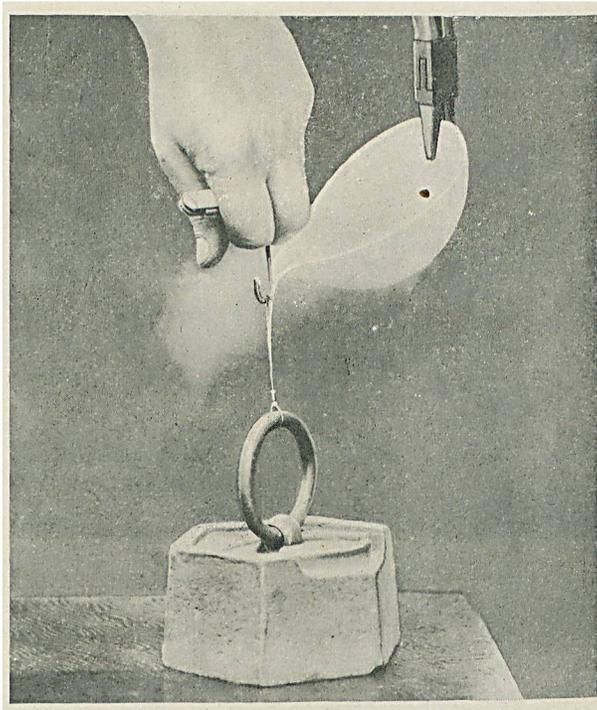


FIG. 37. — Refroidissement par l'air liquide d'un fil de métal destiné à soulever un poids considérable.

Voici, à ce sujet, une expérience tout à fait convaincante.

J'ai attaché un poids de 5 kilogrammes à cette poignée par l'intermédiaire d'un fil de cuivre de $0^{\text{mm}},3$, qui serait parfaitement insuffisant pour supporter ce poids : mais je fais couler le long du fil un mince jet d'air liquide (*fig. 37*) qui, après un instant permettant à la capillarité

de jeter son feu, mouille le fil depuis le point d'attaché jusqu'en bas. La résistance à la traction de ce fil s'est augmentée dans une mesure telle que je puis à présent soulever le poids par la poignée : seulement, le réchauf-

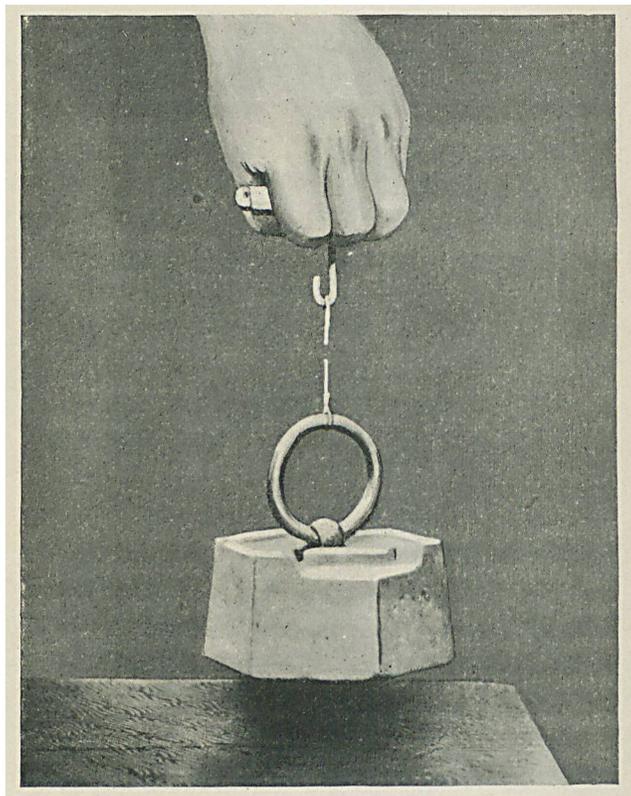


FIG. 38. — Avec le réchauffement, la rupture se produit.

fement du fil est rapide, et après quelques secondes... patatras! la rupture se produit (*fig. 38*).

Cette expérience ne laisse pas d'être assez délicate.

Pour faciliter l'écoulement de l'air liquide le long du fil de métal, on peut entourer celui-ci d'un fil épais de coton ou de laine.

Toutes ces expériences ne sont pas qu'amusantes : elles ouvrent d'intéressants horizons sur les lois qui régissent la matière et j'essaierai de montrer à la fin de ces pages que les savants y ont trouvé leur profit.

Congélation des liquides : mercure, alcool, etc. — Bien entendu, à ces températures ultra-sibériennes, presque tous les liquides de notre connaissance se résolvent à l'état

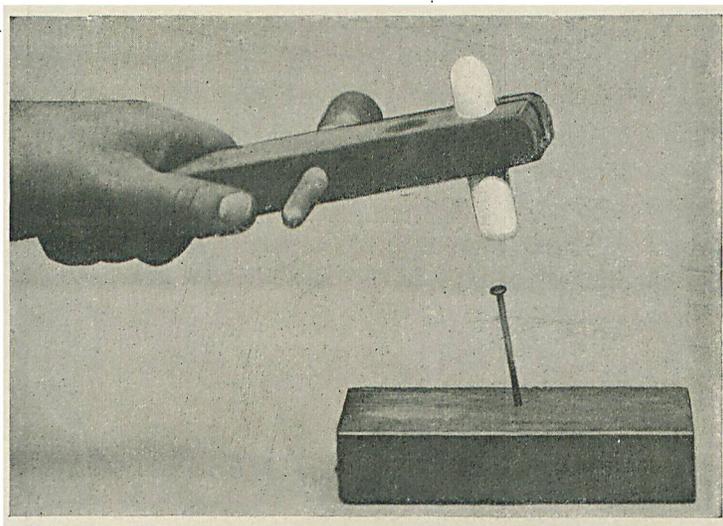


FIG. 39. — Un marteau peu ordinaire.

solide. Le mercure s'y congèle avec une facilité ridicule, puisque, pour les -40° qui lui sont nécessaires, nous en avons 190 à lui octroyer : de quoi faire la bonne mesure ! Et il n'est pas banal, comme je le fais ici (*fig. 39*), d'enfoncer des clous, qui pourraient être en mercure, eux aussi, avec un marteau de vif-argent coulé dans un tube à essai.

L'alcool absolu lui-même, considéré à une autre époque comme fort rebelle à la congélation, a perdu tous ses droits à cette réputation, car il possède depuis longtemps à la température de l'air liquide la dureté de la pierre.

— Malheur ! gronderaient nos bons pochards égarés dans un enfer fictif à -200° ...

L'expérience peut se faire, comme je la fais ici (*fig. 40*),

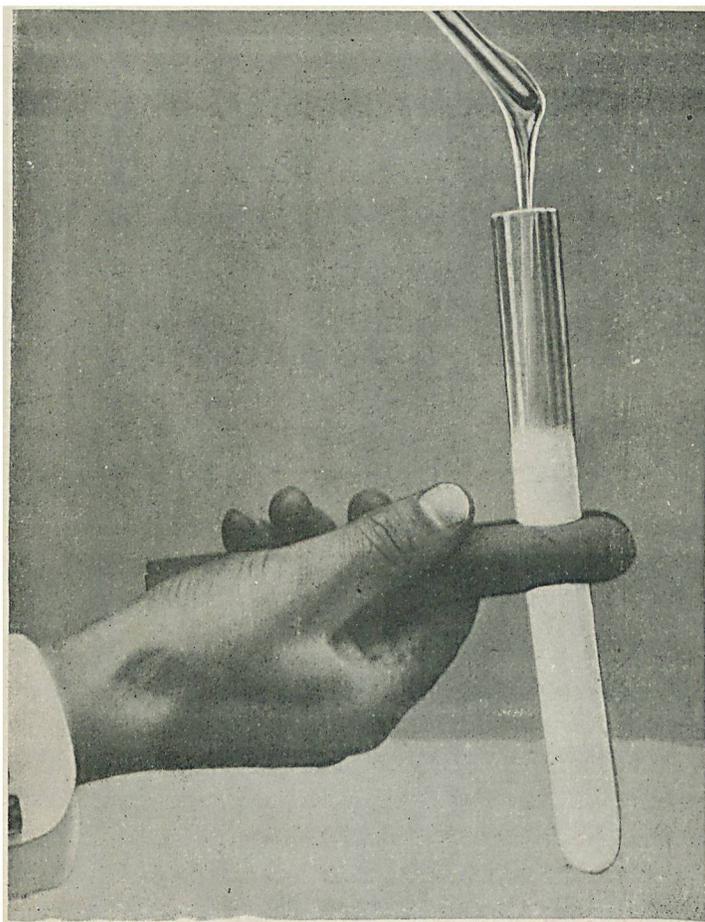


FIG. 40. — Congélation de l'alcool. — Première étape vers la solidification.

en immergeant dans l'air liquide un tube à essai en verre mince contenant un peu d'alcool.

Au bout d'un instant, l'alcool est transformé en un bloc cristallin (*fig. 41*).

Parenthèse extra-scientifique. — Effet insensibilisateur des basses températures. — Ici, une occasion se présente pour moi de faire concurrence à... la *Cuisinière Bourgeoise*. Occasion probablement unique dans mon existence, on m'excusera de ne pas vouloir la rater...

Donc, remplacez par du rhum, de l'anisette, de la chartreuse, l'alcool de l'expérience précédente : placez-les dans des gobelets en métal — crainte de casse ; — plongez à demi dans l'air liquide, à l'aide d'un fil, jusqu'à

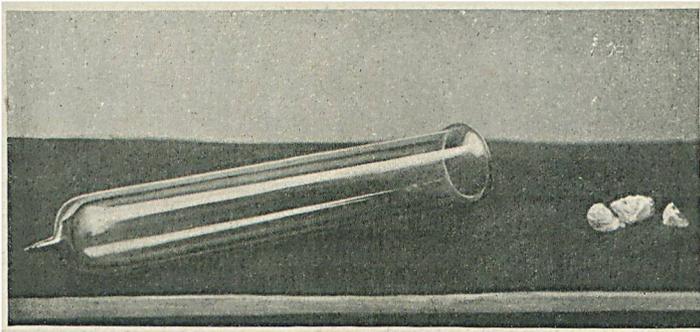


FIG. 41. — Alcool solidifié (à droite).

l'épaississement marqué qui est la première étape vers la congélation complète. Vous obtenez ainsi une sorte de pâte qu'on peut extraire à l'aide d'une cuiller et qu'il est possible d'ingurgiter sans effets douloureux, malgré sa température très basse, grâce à la faible chaleur spécifique et à la faible conductibilité calorifique de l'alcool, grâce aussi, sans doute, à cet *effet insensibilisateur* si remarquable des basses températures qui me fit autrefois geler la main presque jusqu'à l'os avant d'y prendre garde et qui permit à M. d'Arsonval cette expérience si curieuse : un cobaye est immergé dans l'alcool jusqu'au cou ; l'alcool est progressivement refroidi par de l'air liquide. L'effet anesthésique se produit, qui empêche le cobaye de s'apercevoir de rien : il continue de ronger tranquillement

sa carotte jusqu'au moment précis où il est transformé en un bloc de glace et où ses mâchoires refusent le service!

Quel parti nos chirurgiens, déjà si hardis, ne tireront-ils pas d'un pareil moyen d'action!

Mais je m'égare! la *Cuisinière Bourgeoise* n'a vraiment pas grand'chose à craindre d'une concurrence pour laquelle je ne me sens décidément aucune disposition. Il me faut pourtant bien dire, pour en revenir à notre chartreuse, à notre cognac semi-solidifiés et ingurgitables, qu'on réalise de cette façon des sorbets *exquis*, que Brillat-Savarin n'eût pas désavoués et qui seront sans doute bientôt tout à fait à la mode. Il n'est pas douteux, en effet, que les récipients de Dewar et d'Arsonval, si élégants d'aspect, n'animent bientôt de leurs feux argentés et de leurs fumées veloutées tout repas qui se respectera : ils apporteront dans leurs flancs rebondis — à la place de la glace vulgaire — de quoi soutenir l'étonnement des convives par mille expériences intéressantes.

Et cette propagande par le fait — ce sera son excuse — ne sera pas négligeable pour la cause de l'air liquide.

Et maintenant, revenons aux choses sérieuses!

Congélation de l'air liquide. — Non content de congeler les liquides dont la mauvaise volonté est la plus notoire, l'air liquide, chose plus étrange, est capable, dans son ardeur, de se geler lui-même!

Il suffit de le placer dans le vide consciencieux d'une bonne machine pneumatique pour le voir se résoudre, grâce à l'abaissement de température qui le porte alors au-dessous de -200° , en une gelée incolore : c'est l'azote qui se solidifie, tandis que l'oxygène peut être soustrait en pressant le mélange ou à l'aide d'un puissant aimant.

Si l'on opère à l'aide d'un simple tube à essai renfermant l'air liquide et relié à la machine à vide (*fig. 42*),

on peut observer une autre conséquence bien curieuse de l'abaissement de température ainsi réalisé : l'air extérieur qui baigne les parois du tube se *liquéfie* alors au contact de ce froid de -200° , et c'est tout naturel, puisque sa température de liquéfaction à la pression atmosphérique

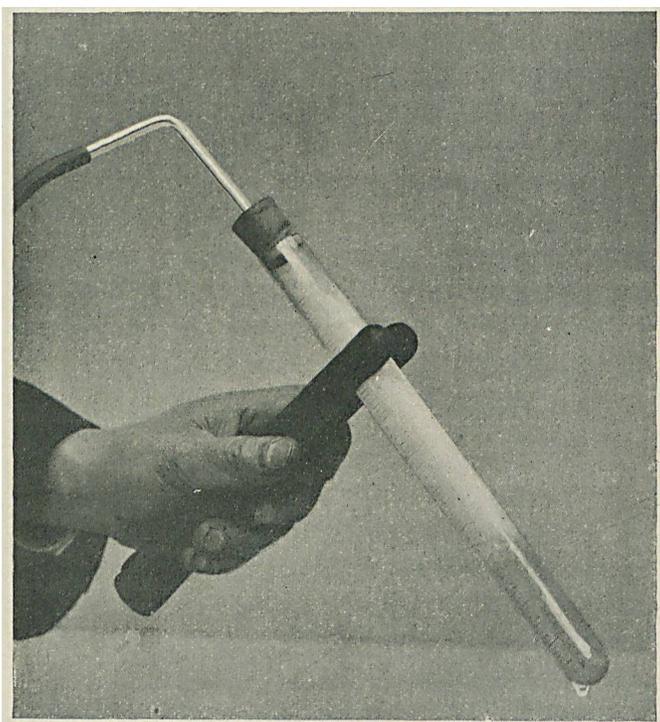


FIG. 42. — Liquéfaction spontanée de l'air de l'atmosphère. On voit la formation de gouttelettes d'air liquide à la partie inférieure du tube.

est seulement de -190° : il vient alors ruisseler sur les parois du tube et ce n'est pas un fait peu banal que de voir, sous la baguette magique de la science, l'air, si rebelle d'habitude à la liquéfaction, avoir la larme aussi facile en cette circonstance que la vapeur d'eau qui ruisselle en hiver sur les carreaux de nos appartements.

Cas de l'éther de pétrole. — Expériences de M. d'Arsonval. — Thermomètres pour l'air liquide. — A peu près seul parmi tous les liquides, l'éther de pétrole ou gazoline a le courage de ses opinions en présence de l'air liquide et peut résister à la congélation. On a vu précédemment que j'ai eu l'idée de mettre cette remarquable propriété à profit pour assurer le graissage des machines à organes mobiles destinées à la liquéfaction.

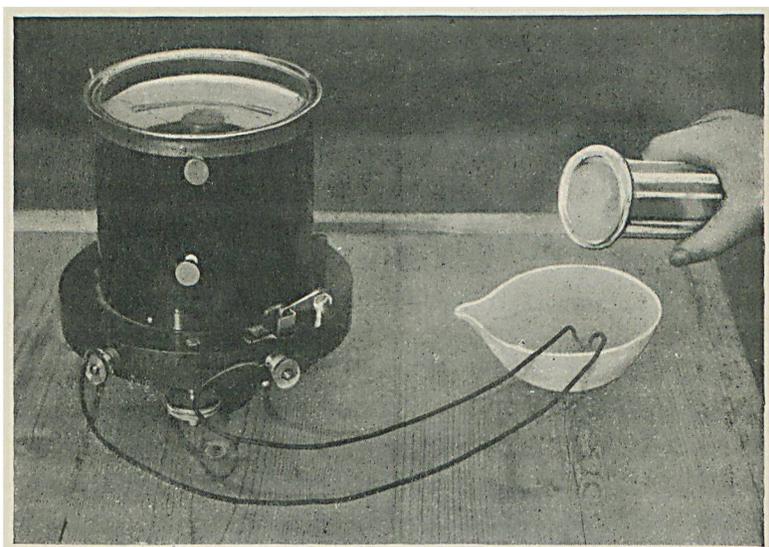


FIG. 43. — Mesure d'une basse température à l'aide d'un couple thermo-électrique relié à un galvanomètre (thermomètre électrique).

On peut aussi l'appliquer pour la construction de thermomètres analogues à nos thermomètres à alcool ordinaires et destinés à remplacer les thermomètres électriques dont on fait usage d'habitude (*fig. 43*) pour déterminer les basses températures et spécialement celle de l'air liquide.

Mais, pour cette application aux usages thermométriques, il est particulièrement important que le liquide constitutif soit rigoureusement incongelable, et les recti-

fications que l'on fait subir au pétrole dans l'industrie pour obtenir l'éther de pétrole seraient insuffisantes pour un très bon résultat.

M. d'Arsonval a imaginé à cet effet une méthode de purification extrêmement élégante et qui est susceptible d'être appliquée également à la séparation de gaz différents et de fournir ainsi un mode d'analyse très précieux. Je lui laisse la parole, le calme parfait avec lequel il énonce les idées les plus déconcertantes étant tout à fait suggestif.

« Le procédé est extrêmement simple : les pétroles peuvent contenir en solution certains hydrocarbures condensables aux basses températures. La première chose à faire, c'est de séparer ces gaz : on commence donc par soumettre ces pétroles au vide ; avec la trompe, on entraîne les gaz en solution ; puis on procède à une première congélation pour séparer la benzine dans le chlorure de méthyle à -23° ; pour séparer les autres produits dont le point de fusion est encore plus bas, on plonge le pétrole dans un mélange d'acétone et de neige d'acide carbonique à -80° et l'on arrive ainsi à condenser une autre série ; enfin, si l'on met en communication le récipient renfermant ce pétrole à -80° avec un récipient plongé dans l'air liquide à -190° de façon à obtenir une distillation en chauffant le pétrole à -80° et refroidissant ses vapeurs à -190° , on arrive à avoir des liquides tout à fait incongelables dans l'air liquide et pouvant servir à la construction de thermomètres pour les températures très basses. »

Chauffer du pétrole à -80° n'est certes pas banal, et beaucoup de mes lecteurs ne manqueront pas de tomber en arrêt devant cet extraordinaire procédé de distillation ! C'est cependant l'exacte vérité : qu'ils se rappellent ce que nous avons dit tout à l'heure : tant qu'un corps n'est

pas à -273° , il est relativement *chaud* et peut en conséquence servir de source de chaleur à l'égard d'un corps plus froid que lui.

Extraction des nouveaux gaz de l'atmosphère. — C'est d'ailleurs par des moyens identiques, mais en soumettant l'air liquide lui-même à la distillation fractionnée et en se servant au besoin comme réfrigérant de l'hydrogène liquide, qu'on arrive le plus aisément à mettre en évidence ces nouveaux gaz de l'atmosphère dont les découvertes successives ont constitué l'un des triomphes scientifiques de ces dernières années.

Il est d'ailleurs nécessaire, pour que ces distillations donnent les meilleurs résultats, que l'air liquide employé ait été préparé à très basse température, avec des précautions spéciales, de manière à ce que ses parties les plus volatiles elles-mêmes puissent se condenser pendant cette liquéfaction.

Congélation des gaz. — Préparation industrielle de l'hydrogène. — Si l'air liquide perturbe profondément la cohésion des métaux et solidifie les liquides les plus réfractaires, il agit naturellement avec autant d'énergie sur les gaz.

La plupart d'entre eux, acide sulfureux, chlore, acide carbonique, sont non seulement liquéfiés, mais solidifiés à son contact. L'hydrogène, cependant, doit à sa température de liquéfaction de -252° d'être absolument réfractaire à l'action de l'air liquide. D'où un ingénieux moyen signalé par M. d'Arsonval pour préparer économiquement l'hydrogène à l'aide du gaz d'éclairage, qui en renferme environ moitié de son volume.

Le procédé consiste simplement (*fig. 44*) à faire traverser au gaz d'éclairage un serpentín plongé dans l'air liquide. Toutes les impuretés sont condensées, l'hydro-

gène à peu près seul résiste à la condensation et sort à un état de pureté que peut déceler la flamme incolore avec laquelle il brûle.

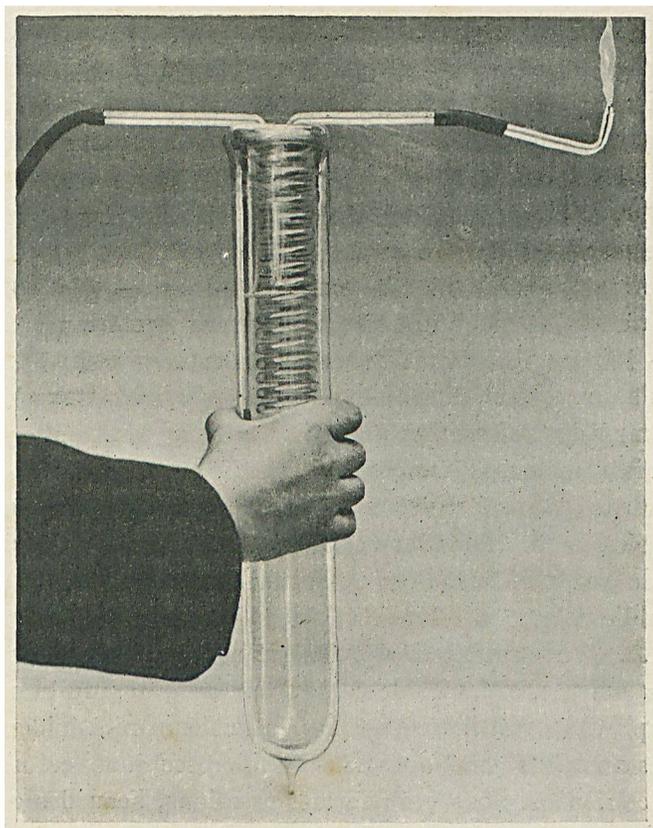


FIG. 44. — Préparation de l'hydrogène à l'aide du gaz d'éclairage.

Une variante évidente consiste à partir du gaz d'eau, beaucoup plus économique, mais aussi un peu plus réfractaire à la condensation.

En notre époque d'aérostation à outrance, le fait présente sans doute quelque intérêt et, si l'*Aéro-Club* ou la *Société de navigation aérienne* y mettent un tant soit peu

de bonne volonté, nous pourrions peut-être, dans un avenir prochain... enlever le ballon de Santos-Dumont de cette élégante façon.

Microbes récalcitrants. — Une belle santé! — Les bactériologistes, qui ne savent que faire pour énerver les microbes, n'ont pas manqué de leur jouer avec l'air liquide un tour de leur façon — en les y envoyant prendre une leçon de natation.

Or, à leur profond ébahissement, les microbes — gens d'esprit — ont fort bien pris la... leçon.

Alors qu'une modeste température de $+ 50^{\circ}$ suffit parfaitement pour détruire les germes bactériques, les $- 190^{\circ}$ de l'air liquide leur ont paru aussi indifférents qu'à un poisson une pomme et ils s'y sont trouvés... comme un poisson dans l'eau! La preuve, c'est qu'après trois semaines d'immersion, le bacille pyocyanique de Charrin, ramené dans un monde meilleur, recommence à sécréter philosophiquement la matière bleue qui lui a valu son nom, exactement comme s'il se f... ichait du public en général et des bactériologistes en particulier.

M. d'Arsonval, que décidément il nous faut citer à chaque pas, a donné de cette stupéfiante immunité une explication fort ingénieuse basée sur l'énormité évidente des pressions osmotiques dans les microscopiques cellules bactériennes. Sous ces énormes pressions, l'eau des cellules est dans l'impossibilité de se congeler même à $- 190^{\circ}$, et les cellules échappent ainsi à la désorganisation à laquelle elles seraient sans cela irrémédiablement condamnées.

Chaleur spécifique des corps aux basses températures. — Un fait d'un tout autre ordre, moins intéressant sans doute au point de vue superficiel, très impor-

tant, au contraire, au point de vue scientifique et pratique, est le suivant.

Au cours des expériences faites en vue de soumettre les corps aux températures très basses fournies par l'air liquide, on a été amené à constater que la capacité calorifique de ces corps subit au cours de l'abaissement de température des modifications importantes.

Les métaux, d'après les travaux de Behn, voient leur chaleur spécifique diminuer notablement, et cet effet s'accroîtrait avec l'abaissement de température au point qu'au voisinage du zéro absolu, il suffirait de très peu de chaleur donnée ou enlevée à une masse métallique pour modifier beaucoup sa température.

Les gaz, au contraire, ou tout au moins l'air, augmentent leur chaleur spécifique, surtout s'ils sont sous pression. Voici par exemple, d'après Linde, les valeurs de la chaleur spécifique de l'air à différentes températures et à différentes pressions.

TEMPÉRATURE	1 ATM.	10 ATM.	20 ATM.	40 ATM.	70 ATM.	100 ATM.
100°	0.237	0.239	0.240	0.245	0.251	0.258
0°	0.238	0.242	0.247	0.251	0.277	0.298
— 50°	0.238	0.246	0.257	0.279	0.332	0.412
— 100°	0.239	0.259	0.285	0.370	0.846	»
— 150°	0.240	0.311	0.505	»	»	»

On voit que si, à la pression ordinaire, la chaleur spécifique varie peu avec la température, la variation est énorme aux pressions élevées, puisqu'à 70 atmosphères elle quadruple presque de 0 à — 100°. Il y a naturellement à tenir le plus grand compte de ce fait dans le calcul des appareils destinés à la liquéfaction de l'air.

Résistance électrique et propriétés magnétiques des métaux aux basses températures. — Un effet extrêmement remarquable et du même ordre que le précédent est la diminution énorme que les métaux purs subissent dans leur résistance électrique à la température de l'air liquide. La résistance d'un fil de cuivre au passage du courant tombe par exemple au *cinquième* de sa valeur.

D'où l'expérience que je fais ici.

Voici un circuit électrique constitué par quelques accumulateurs, une lampe à incandescence et une bobine de fil de cuivre, de résistance assez grande. Les choses sont ainsi calculées que, si je ferme le circuit, le filament de la lampe rougit à peine. Mais je plonge la bobine dans l'air liquide, et la diminution de résistance qui se produit est telle que la lampe est portée au blanc éblouissant !

A première vue, on pourrait croire ce fait dénué de toute importance pratique.

Elihu Thomson, pince-sans-rire de haute envergure, a pourtant proposé de l'utiliser pour réduire, dans une forte mesure, les quantités énormes de cuivre immobilisées dans les grandes canalisations électriques modernes. En s'arrangeant pour faire baigner dans l'air liquide ces canalisations, on pourrait en réduire beaucoup la section, tout en réalisant encore sur la perte en ligne une économie d'énergie suffisante pour reconstituer l'air liquide perdu par évaporation ! Après tout, qui sait !...

Pendant qu'il y était, le savant ingénieur américain aurait pu proposer, pour cet emploi inattendu, l'hydrogène liquide. Avec ce corps, en effet, qui bout à -252° , c'est encore bien autre chose qu'avec l'air liquide : si les électriciens avaient le bonheur — peu enviable pourtant ! — de travailler à ces basses températures, ils pourraient faire passer leurs courants par des câbles

cent fois moindres, à perte d'énergie égale, que ceux dont il leur faut — infortunés provocateurs des hauts cours du Rio — utiliser les services à l'heure actuelle.

A défaut d'intérêt pratique immédiat, l'intérêt théorique de ces faits est très grand. Ils semblent vérifier en effet une hypothèse hardie formulée par Ampère, et d'après laquelle la résistance des métaux au courant électrique n'apparaîtrait qu'au passage des espaces intermoléculaires : au zéro absolu, ces vides n'existant plus par suite de la contraction, la résistance électrique des métaux purs devrait y être nulle, et c'est bien ce que, sauf une anomalie d'ailleurs fort inquiétante à la température de l'hydrogène liquide, l'expérience paraît confirmer.

Chose curieuse, alors que la résistance électrique des métaux subit des variations aussi énormes, les propriétés magnétiques du fer et des aciers varient à peine aux basses températures. J'ai montré, en 1899, qu'un échantillon de fer doux présente très sensiblement à — 190° la même perméabilité qu'à la température ordinaire, et que son hystérésis est à peine modifiée.

Pourtant, exceptionnellement, certains échantillons de fer dur voient leur perméabilité quintuplée sous l'action des faibles forces magnétisantes.

En outre, MM. Guillaume et Osmond ont trouvé que certains échantillons d'un métal qui jouit d'ailleurs des propriétés les plus singulières, l'acier au nickel, présentent la particularité de devenir magnétiques aux basses températures, et que quelques-uns même conservent indéfiniment les propriétés magnétiques ainsi acquises.

Comme dernière remarque intéressante sur ce chapitre, notons encore que l'un des meilleurs moyens de *vieillir* les aimants, de leur donner la fixité d'aimantation indispensable pour leur emploi dans les appareils de mesures

électriques, consiste à les tremper à plusieurs reprises dans l'air liquide.

Changement de coloration. Phosphorescence. —

Enfin, pour en finir avec la série des principaux faits que l'air liquide provoque par sa seule température, mentionnons que les contractions moléculaires qui accompagnent l'immersion des corps dans l'air liquide donnent parfois naissance à des changements curieux de coloration.

Cette feuille de papier rougie par le biiodure de mercure devient jaune lorsque je la trempe dans l'air liquide. Elle reprend d'ailleurs, en se réchauffant, sa couleur primitive. Ce crayon rouge subit la même modification passagère, due au vermillon qu'il renferme. Si quelque fabricant économe avait eu recours au minium pour le colorer, il ne faudrait d'ailleurs pas compter sur l'air liquide pour découvrir la fraude, car à cet égard le minium se comporte exactement de la même façon que le vermillon.

Notons encore que la paraffine, les œufs et maintes autres substances deviennent faiblement lumineuses dans l'air liquide, par un effet de phosphorescence qu'on ne peut naturellement déceler que dans une chambre tout à fait obscure.

Application de l'air liquide à la production de la force motrice. — Nous avons vu précédemment quelles pressions considérables l'air liquide renfermé en vases clos peut développer sous la seule action de la chaleur ambiante. On a pensé — c'était inévitable — à utiliser ces pressions si aisément fournies à la production de la force motrice. L'idée, *a priori*, peut paraître séduisante. Quelle merveilleuse source d'énergie en effet, cet air liquide que la chaleur ambiante suffit à mettre en branle ! Plus de feu, plus de fumée, plus de mauvaises odeurs,

plus de ces énervantes trépidations des moteurs à explosions : quel rêve, messieurs les automobilistes, et avec quel entrain vous renoncerez, au prix de tant de bienfaits, à cette épithète de *chauffeurs*, devenue désormais l'envers de la vérité !

Et combien peu, pourtant, pèserait tout ceci devant d'autres conséquences de cette application sensationnelle !

On ne se fait pas faute de nous le rappeler, en effet, cette chaleur ambiante qui suffirait au bonheur des moteurs à air liquide, cette chaleur ambiante *ne coûte rien*. L'atmosphère qui nous enveloppe, l'eau des mers et des rivières, chaque parcelle enfin de la substance terrestre en renferme des provisions inépuisables, que le Soleil, avec une sollicitude jamais en défaut, vient encore renouveler.

A toutes les qualités ci-dessus énumérées, la source d'énergie en question joindrait donc cette inestimable particularité d'être *gratuite*. Gratuite... à l'air liquide près, bien entendu ; mais, vraiment, voilà qui ne doit guère nous préoccuper, car la force motrice produite par un peu d'air liquide est si énorme qu'à son aide rien ne nous empêche d'en liquéfier *un peu plus* ! C'est Tripler, le grand liquéfacteur américain, qui nous débite sans sourciller ces calembredaines, histoire de chauffer l'enthousiasme des capitalistes et de liquéfier... quelques-uns de leurs millions. Les mânes de Keely, de célèbre mémoire, en doivent tressaillir d'aise.

Tout cela n'est vraiment pas sérieux, et on nous permettra de confier charitablement aux candidats automobilistes que s'ils voulaient, sur la foi de toutes ces bonnes histoires, attendre l'avènement des moteurs à air liquide pour se lancer sur la grand'route, ils courraient fort le risque de n'écraser personne avant longtemps...

Raisonnons un peu.

Pour les singuliers prophètes qui, au mépris des principes les plus intransigeants de la thermodynamique, prétendent résoudre comme par enchantement, grâce à l'air liquide, tous les problèmes soulevés par la production de la force motrice, toutes les difficultés de l'automobilisme et de l'aviation, ce liquide apparaît assez généralement comme un accumulateur d'énergie à nul autre pareil. Or, ce faisant, ils se trompent; ils se trompent doublement.

D'abord, l'air liquide, pas plus que peu importe quel gaz inerte liquéfié, n'est du tout un accumulateur d'énergie. Tout au contraire! Nous avons vu, en effet, qu'en réalité l'air liquide n'est autre chose que de l'air ordinaire auquel on a *soustrait* de l'énergie calorifique pour l'amener à la basse température qui le caractérise. Donc, il ne renferme pas en lui-même d'énergie utilisable et, s'il en met incontestablement en jeu pendant sa détente, c'est de toute nécessité qu'il l'a empruntée sous forme de chaleur au milieu ambiant, pendant sa vaporisation et pendant sa détente. C'est donc, tout au plus, un intermédiaire, un intermédiaire qui permet à la chaleur ambiante de se transformer, de se manifester sous la forme mécanique.

Mais nous ne chicanerions pas pour si peu si, du moins, c'était un intermédiaire de haute volée. Le malheur est qu'il n'en est rien, et si, appliquant une formule élémentaire de thermodynamique, nous faisons le compte de l'énergie mécanique qu'il peut mettre en jeu pendant sa détente supposée accomplie tout entière et isothermiquement à la température ordinaire, nous trouvons :

$$T = P_0 V_0 L_e \frac{P_0}{P_1} = 8.000 L_e 800 = 53.300 \text{ kilogrammètres,}$$

soit $\frac{53.300}{270.000} = \frac{1}{5}$ de cheval-heure par kilogramme d'air liquide dépensé.

C'est plutôt maigre!

Et quand bien même nous admettrions que, par un tour de force encore inconnu de nos constructeurs, on arrive à utiliser jusqu'à la dernière goutte une énergie si précieuse, ce 1/5^e de cheval-heure que chaque kilogramme d'air liquide pourrait alors abandonner aux organes de l'automobile nouveau jeu ne représenterait encore que la *dixième partie* de ce que, sans se gêner, le pétrole peut fournir. La belle affaire en vérité, et que voilà un moteur bien choisi pour pousser dans les airs l'aviateur de nos rêves!

Ainsi, nous verrons à reparler de l'emploi de l'air liquide comme source de force motrice lorsque son prix sera le dixième de celui du pétrole, le cinquième de celui du charbon. Et d'ici ce temps-là, on en peut être sûr, beaucoup d'eau sale coulera encore sous le Pont-Neuf!

On objectera peut-être aux réflexions qui précèdent qu'un fiacre mù par l'air liquide a circulé quelque temps, dans les rues de Londres, et que les Parisiens ont même pu voir fonctionner ledit fiacre lors de la dernière Exposition : ceci montre simplement que la chose est possible — et je ne l'ai jamais mis en doute — mais ne prouve pas du tout qu'elle soit économique, et c'est le seul point que j'entends contester.

D'ailleurs, ce cas particulier se justifiait par une raison toute spéciale : ce fiacre cherchait des capitaux — et il était dès lors tout à fait dans son rôle de... rouler.

Certes, autant et plus que quiconque, on le conçoit, je suis enclin à prôner les applications de l'air liquide ; encore faut-il qu'elles soient rationnelles, qu'elles n'ex-

posent pas fatalement à des mécomptes ceux qui voudraient les tenter. Ce nouveau produit a assez de cordes à son arc, on le verra tout à l'heure, pour qu'on n'éprouve sur son avenir aucune inquiétude ; et, semble-t-il, on ne devrait pas ressentir le besoin, au risque de desservir sa cause, de le mettre à toutes sauces.

Bien entendu, il faut excepter de l'appréciation pessimiste ci-dessus formulée en matière de force motrice certains cas particuliers où l'air liquide peut présenter des avantages spéciaux qui lui assureraient la préférence : c'est ainsi que son emploi dans certains locaux confinés, mines, sous-marins, etc., entraînerait, en même temps que la force motrice, le rafraîchissement et l'aération de ces locaux et augmenterait dans une sérieuse mesure leur habitabilité.

Applications de l'air liquide à la médecine. —

Grâce à sa température excessive, l'air liquide paraît en mesure de trouver une voie beaucoup plus intéressante en médecine et devoir devenir un agent thérapeutique de premier ordre. Des essais fort encourageants entrepris dans cette direction, les plus méthodiques et les plus probants paraissent avoir été ceux du docteur Campbell White, qui a consigné dans le *Medical Record* le résultat de ses observations. C'est particulièrement aux maladies de la peau que s'est attaqué le docteur White, bien que l'action violemment stimulante de l'air liquide ait paru aussi présenter les plus heureux effets en ce qui concerne les douleurs rhumatismales, etc. Appliqué avec quelques précautions sur les parties malades à l'aide de vaporisateurs ou de tampons de ouate, l'air liquide ferait disparaître après une seule application, et bien mieux même que les radiations photogéniques de Finsen, les lupus, chancres, ulcères de toutes natures, abcès, etc. En outre, l'effet

anesthésique très net qui accompagne son application permet la réalisation très aisée d'opérations superficielles.

Il y a là, on le voit, tout un nouveau champ ouvert à l'activité de nos médecins, et je m'en serais voulu de ne pas le leur signaler.

CHAPITRE QUATRIÈME

APPLICATIONS PHYSICO-CHIMIQUES ET CHIMIQUES

PARTICULARITÉS DE L'ÉVAPORATION DE L'AIR

Nous arrivons enfin au fait qui domine toute l'histoire de l'air liquide.

Quand l'air liquide s'évapore — au dépit, trop souvent, de son propriétaire ! — il ne faudrait pas croire que l'air gazeux qui lui a donné naissance se reconstitue purement et simplement.

On constate, au contraire, que, de ses deux constituants, c'est l'azote qui déguerpit le premier. Et, véritablement, c'est là une heureuse inspiration !

Par suite de cette circonstance, en effet, la liquéfaction de l'air fournit un moyen admirable de réaliser la séparation en ses deux éléments de l'air atmosphérique, car, si l'azote s'en va le premier, l'oxygène, apparemment, reste le dernier : vous pouvez voir, en effet, que, dans cette capsule où de l'air liquide achève de s'évaporer (*fig. 45*), l'atmosphère est constituée presque exclusivement par de l'oxygène, comme le prouve cette allumette en ignition qui s'y rallume avec vigueur, qui y brûle avec un éclat inaccoutumé.

Lois de l'évaporation de l'air liquide. — Si important par ses conséquences, nous le verrons tout à l'heure, on conçoit que le phénomène de l'évaporation de l'air liquide ait été soigneusement étudié jusque dans ses moindres détails.

Ce phénomène, en effet, est notablement plus complexe

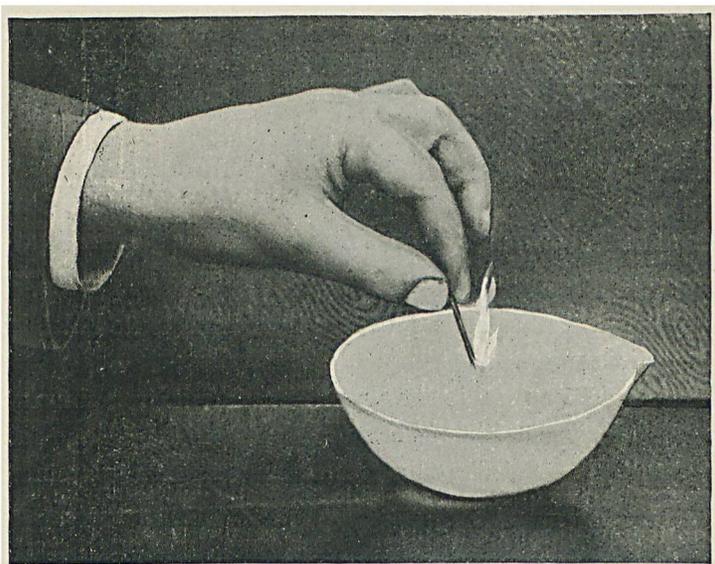


FIG. 45. — Rallumage d'une allumette par l'oxygène dégagé à la fin de l'évaporation de l'air liquide.

que, pour simplifier, nous ne l'avons admis. L'azote, même au début, ne s'évapore pas seul : il est toujours accompagné d'une certaine quantité d'oxygène, dont la teneur augmente rapidement à mesure de l'évaporation ; par contre, même très fortement évaporé, l'oxygène liquide résiduel renferme toujours un peu d'azote. Le gaz qui s'évapore commence, en définitive, par être très pauvre en oxygène : il éteint les allumettes ; puis il s'enrichit progressivement, atteint, puis dépasse la teneur de

l'air ordinaire, mais ce n'est que tout à fait à la fin qu'il est constitué par de l'oxygène absolument pur.

A un moment quelconque de l'évaporation, le liquide est toujours plus oxygéné que le gaz qu'il dégage, ce qui est d'ailleurs indispensable pour justifier l'enrichissement de plus en plus grand du liquide résiduel.

Ces résultats sont mis en évidence par les courbes

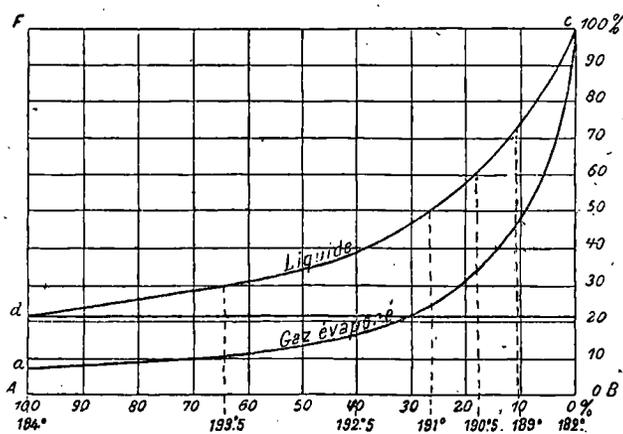


FIG. 46. — Courbes mettant en évidence les particularités de l'évaporation de l'air liquide.

(fig. 46), calculées d'après les tableaux de Linde, dont mes propres expériences et celles de Baly confirment sensiblement l'exactitude.

La courbe supérieure représente, en fonction du pourcentage de l'évaporation, la teneur volumétrique en oxygène du liquide, la courbe inférieure indique la richesse du gaz évaporé correspondant. On voit que, si nous parlons d'air liquide à 21 0/0 d'oxygène, ce qui représente la composition de l'air atmosphérique, le gaz évaporé au début renferme déjà 7 0/0 d'oxygène.

Parallèlement à l'évaporation, la température d'ébullition du liquide remonte, comme nous savons, à mesure

de la concentration en oxygène, et passe de -194° à $-182^{\circ},5$. Ces températures sont indiquées aux points correspondants des abscisses et montrent, par exemple, qu'à la teneur 50 0/0 dans le liquide, le point d'ébullition est à -191° .

Ces résultats expliquent que, pour réussir brillamment les expériences ci-après, qui exigent une forte teneur en oxygène, il faut laisser évaporer une forte proportion d'air liquide, et arriver à un faible résidu, correspondant, par exemple, au dixième de la quantité employée : ceci, d'après les courbes, ne correspondrait encore qu'à une teneur de 75 0/0 dans le liquide résiduel et de 48 0/0 dans le gaz évaporé, à supposer qu'on parte de 21 0/0. Mais on part, en général, d'air à 35 ou 40 0/0 et le résultat final en est naturellement beaucoup amélioré.

Propriétés chimiques de l'air liquide. — Pour la rendre plus rapide, opérons de préférence cette évaporation dans une capsule de porcelaine, moins fragile d'ailleurs que les récipients à double enveloppe, et sur le blanc de laquelle le bleu de l'oxygène tranchera d'une façon fort visible lorsque l'évaporation sera poussée assez loin. Si à ce moment nous introduisons dans l'atmosphère de la capsule une allumette enflammée, nous savons qu'elle y brûle avec un vif éclat : si le soufre de l'allumette n'est pas encore consumé, il donne, au moment de l'immersion dans l'oxygène gazeux, une magnifique flamme violette.

Mais il y a mieux.

Plongeons notre allumette dans le liquide lui-même : vous vous attendez certainement à la voir s'éteindre, paralysée sans rémission par la froidure énorme du liquide. Or, pas du tout ! Non seulement la combustion continue, mais elle est encore plus brillante : on a donc ce spec-

taele curieux d'une température énorme au contact du froid le plus terrible. J'ai déjà constaté tout à l'heure que les extrêmes se touchent, je m'en voudrais de me répé-

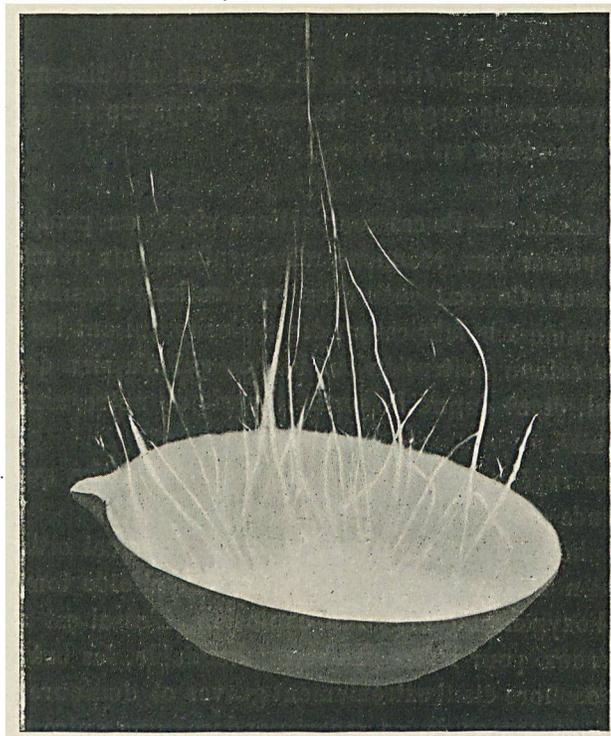


FIG. 47. — Combustion du charbon de bois dans l'oxygène liquide.

ter... Inutile de dire que la caléfaction n'est pas étrangère à ce singulier résultat.

L'expérience est encore plus brillante quand on augmente les dimensions du morceau de combustible employé. Avec un morceau de charbon de bois, un bouchon, on obtient un véritable feu d'artifice du plus bel effet (*fig. 47*). Dans ces expériences, une partie des gaz de la combustion, au lieu de s'échapper à l'état gazeux, sont

happés par le liquide, qui devient laiteux par suite de la présence de nombreux cristaux d'acide carbonique.

Le fer lui-même peut brûler fort vivement dans l'oxygène liquide, à condition d'y être immergé déjà rougi au blanc.

Quant au magnésium en fil, c'est un éblouissement ! et devant cette orgie de lumière, la plaque photographique se refuse au service.

Explosifs. — De ces combustions vives, on peut sans effort passer aux réactions ultra-rapides, aux réactions explosives. Ce sont même les applications possibles de l'air liquide à la fabrication des explosifs qui ont les premières retenu l'attention sur lui, ce qui n'a rien que de naturel, étant donné le genre d'esprit de notre aimable humanité.

Pour répéter ces expériences, inutile de dire que la prudence est de rigueur.

Le phosphore offre un premier exemple de cet ordre de faits. Un fragment enflammé de ce métalloïde tombant dans l'oxygène liquide y fait explosion. L'essai est assez dangereux pour n'être pas recommandable, les brûlures de phosphore étant extrêmement graves et douloureuses.

Pas davantage je ne recommanderai une autre expérience dont j'ai été un jour l'involontaire victime et qui m'a valu l'implantation bien sentie d'une nuée de fragments de verre dans la figure : c'est dire que j'ai frisé de près, ce jour-là, une visite aux Quinze-Vingts.

L'expérience consiste à verser de l'air liquide évaporé sur de l'alcool et à approcher une flamme pendant l'ébullition violente qui se produit alors : explosion formidable, rupture du récipient en mille miettes, inflammation de l'alcool, toutes les herbes de la Saint-Jean ! Inutile de dire que dans mon cas la flamme ne s'était

pas approchée toute seule... Mais il faut au moins que l'imprudence des uns profite aux autres. Donc, fabricants de sorbets nouveau jeu, pas de distractions : la chartreuse et la « fine » sont sujets à caution !

Le pétrole, dans les mêmes circonstances, se comporte d'aussi bruyante façon.

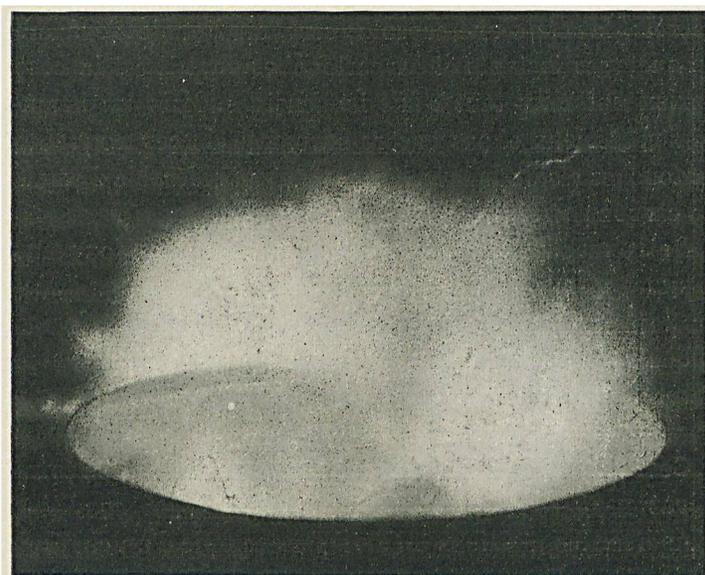


FIG. 48. — Déflagration instantanée du coton imbibé d'oxygène liquide.

Dans cet ordre d'idées, on peut citer une très intéressante application de l'oxygène liquide : versez un peu de cet air liquide évaporé sur une poignée de charbon de bois pulvérisé et mettez-y le feu (*fig. 47*) : dans cette jolie expérience de cours, ce mélange fuse comme un mélange de charbon et de salpêtre et vous réalisez ainsi un petit feu d'artifices, d'ailleurs inoffensif, à la condition d'écarter tout risque d'incendie. Mais mettez ce mélange en vase clos et amorcez la réaction brutalement et à distance, par

une capsule de fulminate : une explosion formidable se produit.

On a percé une partie du Simplon avec cette dynamite originale, qui a, entre autres avantages, celui d'être bien moins coûteuse que la vraie, tout en étant aussi efficace. De plus, son emploi éliminerait le grave danger des explosions tardives que cause parfois, avec les explosifs actuels, le raté d'une capsule; car l'air liquide s'évapore en quelques instants et les cartouches dont il est la base deviennent alors tout à fait inoffensives. Mais un inconvénient sérieux et pas encore surmonté de ces nouvelles cartouches réside dans le dégagement considérable d'oxyde de carbone qu'elles provoquent.

De même, le coton, la laine, trempés dans l'oxygène liquide, s'enflamment et brûlent à l'air libre, avec déflagration, comme du coton-poudre (*fig. 48*), et avec explosion si l'inflammation est provoquée en vase clos par une capsule de fulminate.

Cessation des affinités chimiques aux basses températures. — Nous venons de voir qu'à la condition d'amorcer les réactions à l'aide par exemple d'un charbon en ignition, l'air liquide peut devenir le siège de phénomènes chimiques d'une intensité excessive. Mais cette condition d'un amorçage préalable est absolument indispensable, car, abandonnés à eux-mêmes à ces basses températures, les corps qui ont les uns pour les autres les affinités les plus violentes peuvent rester en contact indéfiniment sans éprouver la moindre modification. Ils ne se connaissent plus !

La soude et l'acide sulfurique, par exemple, restent indéfiniment côte à côte sous l'air liquide.

Le potassium, qui offre l'un des exemples les plus remarquables d'affinité pour l'oxygène, puisqu'il l'arrache

à l'hydrogène de l'eau en dégageant encore par sa combinaison, malgré cet exploit, assez de chaleur pour enflammer spontanément l'hydrogène produit, ce potassium peut être plongé dans l'oxygène liquide sans éprouver la moindre oxydation !

Pour la même raison, les phénomènes photographiques sont considérablement ralentis aux températures de l'air liquide, ainsi que d'intéressantes expériences de Dewar et de MM. Lumière l'ont mis en évidence.

Plus nous nous rapprochons du zéro absolu, en un mot, plus se multiplient les indices de cette *mort de la matière* prévue depuis longtemps par les physiciens.

Cependant, une exception remarquable à la règle qui procède vient tout récemment d'être signalée par M. Moissan, d'autant plus inattendue que c'est à une température bien plus basse encore que celle de l'air liquide, soit à -252° , que cette exception a été constatée. Elle consiste dans le fait qu'à cette température la combinaison du fluor solide avec l'hydrogène liquide se fait spontanément ; et qu'on ne s'y trompe pas, il ne s'agit pas ici d'une de ces combinaisons pénibles que les chimistes, à grand renfort de lunettes, peuvent à peine déceler au bout de six mois, mais d'une réaction d'une vivacité extrême, accompagnée, s'il vous plaît, d'une violente explosion !

Et voilà encore une belle théorie compromise, à moins d'admettre, une fois de plus, que c'est l'exception qui justifie la règle...

SÉPARATION DE L'AIR EN SES ÉLÉMENTS

Extraction de l'oxygène de l'air. — J'en arrive enfin à la véritable, et, pour mieux dire, à la seule raison d'être vraiment industrielle de l'air liquide, c'est-à-dire

à la séparation des éléments de l'atmosphère qu'il permet de réaliser : grâce à certaines considérations sur lesquelles ce n'est pas le lieu d'insister ici, grâce, en particulier, au fait que, quand une certaine quantité d'air liquide s'évapore, elle peut déterminer la liquéfaction gratuite d'une quantité presque égale d'air gazeux, cette séparation, réalisée si rudimentairement devant vous en évaporant l'air liquide, peut se faire, vous le concevez, dans des conditions de perfection et d'économie infiniment meilleures.

En une prochaine occasion, je reviendrai avec tous les détails nécessaires sur cette curieuse industrie, mais je voudrais, dès à présent, vous mettre à même d'en apprécier les étonnants résultats en vous disant que, dans un avenir très proche, l'oxygène pur, extrait de l'atmosphère par cet intermédiaire de la liquéfaction, ne coûtera vraisemblablement guère plus de 12 à 15 francs la tonne, 1,5 à 2 centimes le mètre cube!

C'est la solution, sans doute définitive, d'un problème cherché avec acharnement depuis les origines de la chimie industrielle, et si les Tessyé du Motay, les Sainte-Claire Deville, les Boussingault et les Debray revenaient en ce monde, ils auraient tous les droits de rester stupéfaits et de sourire de pitié au souvenir des plus belles espérances de jadis!

L'avenir! — Or, avec l'oxygène à vil prix, quels horizons immenses se découvrent par delà les édifices ruinés de la vieille industrie!

Vous direz peut-être que je suis bien lyrique? Eh bien, jugez vous-même s'il n'y a pas de quoi!

On sait combien puissantes sont les affinités de l'oxygène, dont nous ne retrouvons dans l'air atmosphérique qu'un souvenir infiniment affaibli. Les combustibles

qui brûlent dans l'oxygène y développent des températures absolument énormes, voisines de celles de l'arc électrique; les sources lumineuses, sous son souffle, décuplent leur éclat; sous le dard bleuâtre du chalumeau oxy-acétylénique, le fer et l'acier, instantanément, ruissellent comme de l'eau, le rubis et les autres pierres précieuses se forment comme par enchantement. Sous l'action vivifiante de l'oxygène distribué aujourd'hui parcelle par parcelle, la médecine obtient déjà en maintes circonstances des résultats merveilleux. Mille réactions oxydantes se trouvent, par son usage, activées dans une mesure fantastique, telle la transformation de l'acide sulfureux en acide sulfurique par les vapeurs nitreuses, base de la grande industrie chimique, que l'emploi d'oxygène, d'après mes essais, rend *deux cents fois* plus prompt!

Quels effets ne tirera-t-on pas de ces incomparables propriétés dès que l'oxygène, obtenu au prix que je viens d'indiquer, sera à la disposition des industriels modernes, si extraordinairement ingénieux!

Ces températures énormes dégagées par la combustion du gaz ou du charbon dans l'oxygène, la métallurgie se les appropriera pour remplacer par la soudure autogène du fer le rivetage d'aujourd'hui, précaire et coûteux; pour faciliter et activer les réactions actuelles dans une mesure inappréciable; pour rendre d'une facilité insoupçonnée la fabrication de ces aciers au chrome, au nickel, au titane qui prennent dans la technique moderne une importance si grande.

Ces mêmes températures seront susceptibles de provoquer nombre de réactions inédites, comme la formation au haut fourneau, donc à très bas prix, du carbure de calcium et, par suite, de l'acétylène; de fondre comme de l'eau les métaux les plus réfractaires, les quartz aurifères

le plus durs, le sable — d'où, peut-être, en même temps qu'une révolution dans l'industrie aurifère, la formule d'une verrerie nouvelle, bien intéressante, étudiée déjà sur une échelle minuscule en Allemagne et dont le cristal de roche au lieu du verre sera la base.

Les procédés d'éclairage ne pourront échapper à la révolution qui les guette une fois de plus, telles ces pauvres républiques de l'Amérique du Sud.

Cette industrie énorme de l'acide sulfurique, si malmenée par les procédés de contact — triomphe de l'industrie allemande — ne manquera pas de s'infuser un sang nouveau, grâce à cette suractivation des réactions que je signalais tout à l'heure, et, par la diminution du volume des chambres et des capitaux engagés, par l'obtention directe d'acide concentré, trouvera sans doute là le moyen de se ressaisir.

Le procédé Deacon pour la préparation du chlore subira de son côté, par une intervention analogue, une modification aussi avantageuse.

La préparation si importante de l'ozone, celle de l'eau oxygénée et de ses dérivés, tant d'autres encore, pourront s'établir sur des bases économiques toutes nouvelles.

Primordial pour l'hygiène des grandes villes, le problème de la suppression des fumées d'usines trouvera une solution parfaite dans l'injection au-dessus des foyers de faibles quantités d'air légèrement suroxygéné, tandis que, pour la tranquillisation de ceux que préoccupe à juste titre l'épouvantable gaspillage de nos richesses houillères, l'utilisation des combustibles de la plus médiocre qualité deviendra chose facile.

Dans le même ordre d'idées, la substitution à l'air de l'oxygène plus ou moins pur dans la fabrication ou l'utilisation du gaz pauvre ou dans la combustion des gaz de hauts fourneaux changera complètement les conditions

économiques déjà si remarquables des moteurs à gaz pauvre en remontant leur puissance spécifique et leur rendement au niveau et au delà de ce qu'on a réalisé jusqu'ici avec le gaz de houille le plus riche.

Et l'azote! Sous-produit abondant de cette fabrication de l'oxygène, il trouvera vraisemblablement une utilisation au moins partielle dans sa combinaison avec l'hydrogène, extrait de son côté, comme nous l'avons dit, par la liquéfaction partielle et très économique du gaz d'eau, dont l'oxyde de carbone, brûlé dans des moteurs à gaz spéciaux, donnera par la même occasion une surabondance de force motrice. On obtiendra ainsi en quantités illimitées le sulfate d'ammoniaque, dont le marché est en quelque sorte indéfini par suite des besoins de l'agriculture; et de l'ammoniaque on passera sans difficulté aux composés nitrés, de première importance eux aussi.

La médecine, d'autre part, aura à sa disposition, grâce à cet oxygène répandu à flots, un moyen d'action extrêmement puissant et dont les résultats obtenus aujourd'hui ne sauraient, à coup sûr, donner qu'une faible idée.

Chimères d'hier, les fantaisies du *Docteur Ox* seront les réalités de demain et, une fois de plus, Jules Verne aura été prophète!

Ainsi, pour nous résumer: trois des éléments les plus importants de la chimie, hydrogène, oxygène, azote, mis à notre disposition à l'état pur et à des conditions de bon marché extrême par les méthodes nouvelles; à l'une des extrémités de l'échelle thermométrique, hautes températures produites par les combustions dans l'oxygène; à l'autre extrémité, températures très basses fournies par l'air liquide, voilà les leviers extraordinairement puissants dont une fois encore l'utilisation attentive et rationnelle des propriétés de la matière aura doté l'industrie humaine.

Et, si nous avons essayé de prévoir quelques-unes de leurs applications éventuelles, qui donc saurait dire combien plus énorme encore pourra être en un terrain si neuf le champ des surprises réservées aux chercheurs!

Certes, ici comme en toutes choses, le progrès ne marchera ni sans entraîner dans sa mise au point de considérables difficultés, ni sans éveiller sur sa route de multiples résistances. Les intérêts si puissants engagés dans les industries existantes, compromis par les méthodes nouvelles, ne se laisseront pas malmenés, c'est trop évident, sans quelque mauvaise grâce.

Peut-être nous sera-t-il permis de leur rappeler que, s'il est possible de retarder la marche du progrès, il est au-dessus des forces humaines de prétendre l'arrêter...

Quant à mes lecteurs, j'en ai le ferme espoir, ils seront suffisamment édifiés par les horizons que je leur ai fait entrevoir. Ils concluront vraisemblablement, eux aussi, que les jours sont comptés des méthodes surannées de la vieille industrie.

Si donc les émotions du chercheur présentent pour eux quelque attrait, s'ils veulent se laisser aller à ces rêves qui ne sont pas sans quelque grandeur, eux aussi, et présentent du moins sur ceux des poètes l'ineffable supériorité de se muer parfois en réalités sous la tension de la volonté et du travail, l'instant est favorable : dans ce champ immense et presque vierge encore des applications de l'oxygène, ils peuvent se lancer hardiment, avec la persuasion que ce puissant outil sera bientôt fourbi.

CHAPITRE CINQUIÈME

LES BASSES TEMPÉRATURES ET LA MORT DE LA MATIÈRE

Si la science industrielle peut se réjouir par avance de la fortune réservée à l'air liquide, si l'homme peut se dire avec satisfaction qu'il vient de prendre en main un levier comparable à ce que fut au siècle dernier la vapeur ou l'électricité, de singulières surprises ont été enregistrées aussi dans le domaine de la science pure à la faveur des basses températures.

Et s'il n'était pas téméraire de prétendre toucher d'aussi hautes questions dans un aussi modeste ouvrage, j'essaierais de montrer comment, de tous les faits en apparence sans liens passés en revue tout à l'heure, on a pu déduire de quoi ébranler dans leurs assises les plus solides les idées séduisantes où s'étaient complus jusqu'ici les physiciens modernes.

Il y a déjà longtemps qu'aux yeux de la science la notion de *froid*, créée et mise au monde pour expliquer les sensations opposées de notre organisme, est devenue parfaitement superflue, confondue qu'elle est avec celle de *chaleur*. Un corps *plus froid* qu'un autre est un corps *moins chaud*. Un corps qui se refroidit est un corps qui

perd de la chaleur. Insistons un peu sur cette dernière image. Dire qu'un corps perd de la chaleur revient à supposer qu'il détient en lui-même, emmagasinée dans sa masse, une certaine provision de calorique ; mais une provision ne peut évidemment être illimitée. Si donc, nous plaçant dans des conditions convenables, nous parvenions à extraire de ce corps *tout* ce qu'il renferme de calorique, nous l'amènerions à l'extrême limite du froid, à la plus basse température qu'il soit possible de réaliser et que pour cette raison on a qualifiée de *zéro absolu*.

Cette conception a tout d'abord été purement intuitive et philosophique. Elle découlait en droite ligne des idées de Stahl sur le phlogistique, premier essai de théorie qui valut à la science moderne ses premiers succès.

Certes, il n'était pas encore question d'apprécier les profondeurs auxquelles il fallait descendre dans l'échelle des températures pour atteindre cette ultime limite du zéro absolu, mais déjà les penseurs pouvaient voir, sous le souffle de cette chaleur intrinsèque des corps, s'animer désormais le monde de la matière.

« Ils voyaient la matière, a dit en un brillant article un savant professeur¹, ils voyaient la matière, formée de corpuscules ou d'agrégats moléculaires isolés les uns des autres, en proie à un mouvement incessant, comme les essaims de poussières qui vibrent dans un rayon de soleil, et de ce tourbillonnement s'échappaient des ondes qui se propageaient dans l'espace, portées par un milieu infiniment subtil, *l'éther*, qui était au plus léger des corps connus, l'hydrogène, ce que l'hydrogène même est aux métaux les plus denses. Les gaz, en particulier, apparaissaient comme formés de projectiles microscopiques, lancés dans tous les sens et hombardant sans trêve les

1. L. Houllévigie, *Revue de Paris*, 1^{er} avril 1903.

parois du vase qui les renfermait, pour rebondir sur elles et recommencer sans fin leur éternel voyage. La chaleur contenue dans ces gaz prenait, du même coup, un sens plus précis : elle signifiait à présent l'énergie de tous ces corpuscules en mouvement ; refroidissait-on le gaz, les vitesses des projectiles diminuaient, les trajectoires se détendaient, puis tous les corpuscules tombaient les uns sur les autres, animés encore de mouvements tourbillonnaires : c'était la liquéfaction. Puis, à mesure qu'on leur enlevait encore de l'énergie, les molécules vibrantes prenaient des mouvements moins étendus, le liquide se contractait en se refroidissant. Bientôt le rapprochement des molécules leur permettait de contracter entre elles de nouveaux liens : leurs positions relatives devenaient à peu près invariables et le liquide se solidifiait ; mais ce solide était encore animé du frisson de la vie ; on pouvait le refroidir encore, jusqu'au point où les molécules reposaient inertes les unes sur les autres : alors, la matière était morte. »

Peu à peu, des expériences précises permirent de donner à ces superbes conceptions la base qui leur manquait et de changer en un commencement de certitude ce qui n'avait été jusque-là que simples présomptions.

Avec Gay-Lussac, un fait d'importance extrême est mis en évidence.

Sous l'action de la chaleur, tous les gaz se dilatent ou se contractent de la même façon ; quelle que soit leur nature, quand on les refroidit, ils se contractent d'un deux cent soixante-treizième de leur volume à 0° pour chaque abaissement d'un degré dans leur température ; si donc nous pouvions les refroidir jusqu'à 273° au-dessous de 0, le volume de ces gaz y deviendrait nul. Or si, conformément aux idées qui viennent d'être exprimées, si la grandeur des espaces intermoléculaires est liée à la quan-

tité de chaleur contenue dans les corps, dire que pour les gaz ces espaces deviennent nuls à -273° revient à dire qu'à cette température les gaz en question ne renferment plus de chaleur et que nous y touchons en conséquence au zéro absolu.

La notion se précise donc.

On conçoit cependant qu'il eût été téméraire de tirer sans plus de précautions des déductions d'ordre aussi général d'un ordre de faits aussi particulier. Mais de tous les côtés, dans des champs fort divers, des faits bien précis se dessinent, qui viennent apporter à la thèse l'appui précieux de leur témoignage. Tenons-nous-en ici à l'un des plus remarquables, forgé avant la lettre par le génie d'Ampère.

Poussé par la nécessité de relier en une même théorie les phénomènes inséparables de l'électricité et du magnétisme, l'illustre savant avait été conduit à envisager le magnétisme comme dû à la circulation de courants électriques autour de chaque molécule des corps aimantés. Une objection, cependant, l'embarrassait. Comment concilier la dépense d'énergie inhérente à la circulation des courants électriques telle qu'elle se révèle à nous avec le maintien indéfini et *sans dépense d'énergie* du magnétisme des aimants ? L'objection, assurément, valait d'être réfutée. Une hypothèse admirable la résolut, que les faits, jusqu'en ces derniers temps, s'accordaient à confirmer de la plus remarquable façon. D'après cette hypothèse, les molécules conductrices n'opposeraient à la propagation du courant aucune résistance et ce ne serait qu'au passage des espaces intermoléculaires qu'apparaîtrait la résistance électrique. Or, les courants élémentaires entretenant le magnétisme de chaque molécule aimantée, n'ayant à franchir aucun espace intermoléculaire, pourraient persister indéfiniment sans dépense d'énergie. Ainsi se con-

cilierait avec la thèse de l'identité du magnétisme et de l'électricité le fait déconcertant de la permanence des aimants.

Mais une hypothèse ne peut subsister dans la science qu'autant que se vérifient les diverses conséquences auxquelles elle conduit. Or, de l'hypothèse d'Ampère, on peut déduire que la résistance des corps bons conducteurs de l'électricité doit diminuer avec la température, puisque, lorsqu'ils se refroidissent, s'atténuent les espaces intermoléculaires que le courant doit franchir. Cette conséquence, l'expérience la vérifie d'une manière parfaite : non seulement la résistance des métaux purs diminue lorsque la température s'abaisse, mais cette diminution se produit avec une telle régularité qu'il est possible, en prolongeant les courbes de résistance au-delà des limites expérimentées, de voir à quelle température il faudrait descendre pour que toute résistance disparaisse complètement, c'est-à-dire pour que, d'après Ampère, les molécules viennent au contact les unes des autres.

Or, coïncidence bien remarquable, les physiciens qui, à la suggestion de Maxwell, procédèrent pour la première fois à cette extrapolation, relombèrent précisément ainsi sur cette limite de -273° assignée par la théorie des gaz au zéro absolu ! C'était à la fois, pouvait-on croire, la justification éclatante des vues d'Ampère, la confirmation de la théorie qui assigne au magnétisme et à l'électricité une communauté d'origine et la consécration définitive des idées des physiciens sur le zéro absolu.

Au surplus, chaque étape franchie par la suite dans la production des basses températures avait été l'objet de vérifications qui rendaient plus complète la quiétude des savants. A la température de l'air liquide, soit à 85° à peine du zéro absolu, la diminution de résistance du cuivre pur, la contraction de l'hydrogène et de l'hélium

avaient fourni précisément les résultats calculés à l'avance en partant des théories de Gay-Lussac et d'Ampère ; la cohésion des métaux s'était, nous l'avons vu, considérablement augmentée, conformément aux *desiderata* de la physique moderne ; le dernier choc, du même coup, avait été porté aux partisans de cette vieille et poétique théorie cosmogonique de Laplace, d'après lesquels les liens de la matière devaient se relâcher aux basses températures pour permettre aux astres morts de tomber en poussière et de contribuer de leurs cendres à la formation des mondes nouveaux...

Enfin, les réactions les plus vives à la température ambiante perdaient dans un refroidissement progressif leur vivacité primitive pour n'en plus conserver à la température de l'air liquide qu'un bien pâle reflet, mettant ainsi en relief d'une manière frappante l'entrée en léthargie de la matière, avant-coureur de sa mort définitive.

Pourtant, avec Dewar, avec les magnifiques travaux de la *Royal Institution*, un pas considérable est encore franchi dans la marche vers le zéro absolu. Après cinq années de recherches et de persévérants efforts, en 1899, l'hydrogène liquide — ce corps dont, au dire de certains physiciens, le globe énorme de Saturne serait constitué — est pour la première fois manipulé par des mains humaines. Avec lui, 21° nous séparent seulement du zéro absolu, c'est-à-dire que se trouve divisé par 4 l'intervalle qui subsistait encore avec l'air liquide. Moment palpitant ! A cette température, une décisive expérience va-t-elle consacrer définitivement notre science dans ses fondements les plus essentiels ?... Amère désillusion ! Plongé dans le bain d'hydrogène liquide que protège contre la chaleur extérieure un triple manteau de vide, le fil de cuivre expérimenté n'accuse dans sa résistance qu'une réduction au *cent cinquième* de sa valeur initiale, réduc-

tion énorme sans doute, mais cependant insuffisante pour permettre à la courbe de rejoindre au zéro absolu l'axe des abscisses !

Cette cuisante déception, au reste, semble n'être qu'un signal.

Tandis que les savants escomptaient à la température de l'hydrogène liquide une cessation complète de toute réaction, Dewar et Moissan enregistrent la combinaison singulièrement violente du fluor et de l'hydrogène ; tandis que la matière devait se dépouiller de toute énergie dans sa marche vers le zéro absolu, elle paraît au contraire capable d'acquérir en route des énergies nouvelles, comme en témoignent ces phénomènes de phosphorescence et de fluorescence qui, très rares à la température ordinaire, deviennent à celle de l'hydrogène liquide la règle générale.

Chose plus surprenante encore, non seulement la matière ne paraît nullement moribonde, mais la vie elle-même semble pouvoir résister à ces froidures extrêmes : témoin ces microbes, aussi vigoureux après des semaines d'immersion dans l'hydrogène liquide ; témoin ces graines qui, dans les mêmes circonstances, ne perdent rien de leurs facultés germinatives, tendant ainsi à donner raison aux défenseurs de cette thèse si originale de la communauté des origines de la vie dans l'Univers, puisque les germes vitaux auraient pu être transmis d'une planète à l'autre sans être arrêtés par le froid énorme des espaces célestes.

En serait-ce donc définitivement fait de nos vieilles théories, si simples et si séduisantes, dont tant de déductions expérimentales ou philosophiques semblaient étayer l'ensemble harmonieux ? Faudrait-il donc nous résigner désormais à croire que rien n'est simple dans la nature ?...

Certes, les motifs ne manqueraient pas en ce moment pour inciter à cette croyance décevante les savants un peu désemparés. Avec le radium, dont je disais quelques mots au commencement de ces pages, n'ont-ils pas, sur d'autres points primordiaux, heurté l'inexplicable ? Avec cette science des basses températures elle-même, n'ont-ils pas vu la complexité, presque la confusion, s'introduire dans une question qui paraissait si simple depuis les origines de la chimie, celle de la constitution de l'atmosphère !

L'atmosphère, en effet, n'est plus le mélange invariable d'azote et d'oxygène avec lequel nous nous étions si bien familiarisés. Après le premier coup porté à cette croyance par la découverte de l'argon, les surprises se sont multipliées de singulière façon quand la liquéfaction de l'air et celle de l'hydrogène ont permis d'entreprendre ces distillations fractionnées dont dix éléments nouveaux ont été le fruit.

Pourtant, qui sait si nous ne nous alarmons pas trop vite et si toute cette complexité qui nous trouble n'est pas plus apparente que réelle ! Si le radium cache encore jalousement son mystère, nous pouvons peut-être espérer sur les autres points une explication plus simple. Si, comme le pensent tant d'esprits éminents, l'unité de la matière peut être un jour démontrée, ce n'est pas le fait d'avoir trouvé dans l'atmosphère de quoi allonger de quelques noms la liste de nos corps simples qui sera une difficulté, puisqu'il ne s'agira que de quelques termes de condensation de plus du prototype de toute matière, le *pantogène* d'Hinrich et de Schutzenberger, qui n'est peut-être bien, après tout, que l'*éther* des physiciens...

Bien mieux, le fait de retrouver dans l'atmosphère terrestre le *nébulum*, dont les lointains amas d'étoiles de la Voie Lactée nous envoient les radiations, le *coronium* ou gaz

de la couronne solaire, l'*hélium*, dont le Soleil et quelques étoiles détenaient jusqu'ici le monopole; le fait d'ajouter tous ces nouveaux liens à toutes les preuves de parenté établies entre la terre et les étoiles par l'existence dans celles-ci du fer, du sodium, de l'hydrogène et de tant d'autres hôtes de notre globe, ce fait est bien plutôt un nouvel acheminement vers la démonstration de la simplicité originelle des choses, puisqu'il vient étayer la grande idée de l'Unité de la constitution de l'Univers, renforcé maintenant, nous venons de le voir, par la possibilité d'attribuer à la vie une origine unique! Enfin, autre compensation appréciable à cette complexité, nous avons vu un peu de lumière éclairer enfin l'irritant mystère des aurores boréales, dont les savants désespéraient de jamais triompher et dont les énigmatiques radiations ont pu être identifiées avec le spectre de quelques-uns des nouveaux gaz de l'atmosphère.

Et maintenant, revenant une dernière fois aux basses températures, nous nous demanderons, dans un esprit analogue, s'il n'y a pas du moins quelque exagération à s'attacher, comme on paraît le faire, aux résultats inattendus trouvés à la température de l'hydrogène liquide au point de mettre en doute du coup toutes nos anciennes croyances.

Nous savons très bien maintenant, grâce aux indications de la théorie confirmées par les travaux de Dewar, qu'à mesure que nous nous approchons du zéro absolu, les difficultés de l'étape suivante augmentent avec une énorme rapidité. C'est qu'en réalité l'échelle thermométrique, graduée d'après des considérations d'un ordre déterminé, ne doit pas être envisagée, au point de vue qui nous occupe, comme constituée d'un bout à l'autre par des degrés d'importance identique. Bien plus que par des *différences* de

températures, c'est par des *rappports* entre les températures absolues que se mesure l'importance des étapes successives et les degrés placés vers le bas de l'échelle acquièrent en conséquence une importance extrême.

C'est ainsi que la difficulté de descendre de la température ambiante aux -190° de l'air liquide n'est pour ainsi dire rien comparativement à celle d'arriver aux -252° de l'hydrogène liquide, parce que ces -252° représentent une température absolue de $273 - 252 = 21^{\circ}$, *quatre fois plus faible* que les 83° absolus de l'air liquide. C'est ainsi encore que, par l'ébullition dans le vide de l'hydrogène liquide et par sa solidification, Dewar a pu arriver assez aisément à -258° , soit 15° absolus, mais qu'il n'a pu, malgré cette source de réfrigération à nulle autre pareille, atteindre à la liquéfaction de l'hélium, dont 8° seulement le séparent pourtant — parce qu'en réalité les 7° absolus qu'il faudrait obtenir représentent une température *deux fois plus basse* au moins que celle de l'hydrogène solide.

Et quand l'hélium à son tour aura capitulé, pourrions-nous nous vanter d'avoir avancé d'un pas bien sérieux vers ce pôle du froid que nous nous flattions trop tôt de pouvoir conquérir ? Nullement, car à supposer même que nous réussissions à chaque nouvelle étape à réduire de moitié l'écart qui nous en sépare, le zéro absolu n'en resterait pas moins comme le terme ultime d'une progression géométrique décroissante dont les différents termes ne nous seront accessibles qu'au prix, pour chacun d'eux, d'une lutte aussi acharnée que celle engagée contre l'hélium depuis 1899.

Et devant cette importance capitale des derniers échelons de l'échelle thermométrique, nous pourrions sans doute conclure qu'on ne peut vraiment guère tirer des déductions si pessimistes de résultats obtenus à une température que nous concevons maintenant comme si

éloignée encore du but de nos efforts — et que, jusqu'à plus ample informé, nous pouvons conserver intactes nos idées sur la nature des rapports entre l'énergie et la matière.

Ainsi donc, ici comme partout, le but recule à mesure de nos progrès, et sur aucun point notre science ne peut se flatter d'avoir touché à l'origine des choses. Mais nos efforts pour l'atteindre n'en sont pas moins féconds, et la science des basses températures, pour sa part, a bien mérité de l'humanité, puisque cette lutte pour la conquête du zéro absolu, en même temps qu'elle dotait l'industrie de ressources sans limites, a ouvert à l'esprit des horizons immenses.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
PRÉFACE.	v

CHAPITRE PREMIER

La liquéfaction des gaz permanents

QUELQUES CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

Gaz liquéfiables par simple pression	8
Gaz permanents	10
La température critique	11
Compression des gaz	15
Refroidissement des gaz.	16
Les mélanges réfrigérants.	16
La détente	16

LA LIQUÉFACTION DE L'AIR

L'air atmosphérique liquéfié par Cailletet	19
Appareils à cycles multiples.	20
Production industrielle de l'air liquide	21
Détente dite sans travail extérieur	22
Machine de Linde	22
Détente avec travail extérieur récupérable.	27
Méthode de M. G. Claude	29

CHAPITRE DEUXIÈME

Conservation de l'air liquide

UN PROBLÈME DIFFICILE

	Pages.
Conservation de l'air liquide en vases ouverts.	33
Moyens de ralentir l'évaporation.	37
Procédé de M. d'Arsonval.	39
Récipients à double enveloppe et vide intermédiaire.	39
Perfectionnement de Dewar.	43
Récipients à vide argentés.	43
Efficacité des récipients d'Arsonval et Dewar	49
Emploi des basses températures pour la production des vides parfaits	51
Impossibilité de conserver l'air liquide en vases clos	53

CHAPITRE TROISIÈME

Propriétés et effets physiques de l'air liquide

UN LIQUIDE PEU BANAL

Couleur.	57
Point d'ébullition.	59
Densité.	59
Quantité de froid mise en jeu par l'air liquide.	60
Son emploi comme réfrigérant.	60
Effets singuliers dus à la caléfaction.	63
Propriétés magnétiques de l'air liquide	68
Durcissement de différents corps dans l'air liquide.	69
Modifications dans la cohésion des métaux.	73
Congélation des liquides : mercure, alcool, etc.	77
Effet insensibilisateur des basses températures.	79
Congélation de l'air liquide.	80
Cas de l'éther de pétrole	82
Expériences de M. d'Arsonval	82

	Pages.
Thermomètres pour l'air liquide.	82
Extraction des nouveaux gaz de l'atmosphère	84
Congélation des gaz	84
Préparation industrielle de l'hydrogène	84
Microbes récalcitrants : une belle santé!	86
Chaleur spécifique des corps aux basses températures	86
Résistance électrique et propriétés magnétiques des métaux aux basses températures	88
Changement de coloration	90
Phosphorescence.	90
Application de l'air liquide à la production de la force motrice.	90
Applications de l'air liquide à la médecine.	94

CHAPITRE QUATRIÈME

Applications physico-chimiques et chimiques

PARTICULARITÉS DE L'ÉVAPORATION DE L'AIR LIQUIDE

Lois de l'évaporation de l'air liquide.	98
Propriétés chimiques de l'air liquide.	100
Explosifs	102
Cessation des affinités chimiques aux basses températures	104

SÉPARATION DE L'AIR EN SES ÉLÉMENTS

Extraction de l'oxygène de l'air.	105
L'avenir!	106

CHAPITRE CINQUIÈME

Les basses températures et la mort de la matière	111
---	------------

Tours, imprimerie Deslis Frères, 6, rue Gambetta.

L'AIR LIQUIDE

Société Anonyme pour l'Étude et l'Exploitation

des Procédés GEORGES CLAUDE

PARIS - Rue St-Lazare, 62 - PARIS



PRODUCTION ET UTILISATION

**de l'Air liquide
de l'Oxygène
de l'Hydrogène
de l'Azote**

Des hautes Températures et des Températures très basses



Pour répondre aux demandes qui lui ont été adressées, la Société a décidé de mettre dès maintenant à la disposition des personnes désireuses de s'en procurer, l'AIR LIQUIDE et les récipients nécessaires pour les recherches scientifiques, la Médecine, les Conférences, etc.

Tous renseignements complémentaires seront fournis au Siège Social de la Société, 62, RUE SAINT-LAZARE.