

## L'air liquide

M. D'Arsonval

► **To cite this version:**

M. D'Arsonval. L'air liquide. J. Phys. Theor. Appl., 1898, 7 (1), pp.497-504.  
<10.1051/jphystap:018980070049700>. <jpa-00240244>

**HAL Id: jpa-00240244**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00240244>**

Submitted on 1 Jan 1898

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## L'AIR LIQUIDE;

Par M. D'ARSONVAL.

Avant de décrire sommairement la machine du professeur Linde, cet intéressant appareil, je rappellerai brièvement les phases de cette opération, aujourd'hui si simple : la liquéfaction de l'air atmosphérique.

C'est dans la séance du 24 décembre 1877 que M. Cailletet annonça à l'Académie des Sciences qu'il était arrivé à liquéfier la plupart des gaz réputés permanents. Sa méthode, aussi neuve qu'originale, consistait à refroidir brusquement le gaz, par sa propre détente, après l'avoir comprimé à une pression plus ou moins élevée.

Nous connaissons aujourd'hui la condition essentielle pour liquéfier un gaz quelconque : il suffit d'abaisser sa température au-dessous de la température critique qui lui est propre. Tant que cette condition n'est pas réalisée, aucune pression, si grande soit-elle, ne peut amener la liquéfaction.

Pour liquéfier l'air, il faut d'abord abaisser sa température à  $-140^{\circ}$ ; cela fait, une pression inférieure à 40 atmosphères permet de l'obtenir à l'état liquide. Si l'on veut l'obtenir à une pression encore plus faible, à la pression atmosphérique, par exemple, de manière à l'avoir en vase ouvert, il faudra abaisser la température jusqu'à  $-191^{\circ}$ .

Ces notions, qui nous paraissent aujourd'hui si simples, n'ont pu se faire jour que peu à peu, et c'est grâce à elles que la liquéfaction de l'air atmosphérique a cessé d'être une curiosité de laboratoire pour devenir une opération industrielle entre les mains de M. Linde.

Dans l'expérience de M. Cailletet, la masse gazeuse détendue étant très limitée, et la détente n'amenant qu'un refroidissement momentané, la liquéfaction ne persistait que quelques instants, juste le temps matériel de la constater. Ce refroidissement était seulement *dynamique*, c'est-à-dire essentiellement transitoire. Pour obtenir le gaz liquéfié d'une façon stable à l'état *statique*, il fallait le refroidir au-dessous de la température critique. C'est également notre confrère, M. Cailletet, qui indiqua le moyen d'obtenir ce refroidissement en plongeant le récipient contenant le gaz comprimé dans l'éthylène liquide, qui bout à  $-105^{\circ}$ . Cet abaissement de température n'étant pas encore suffisant pour atteindre le point critique de l'oxygène

*J. de Phys.*, 3<sup>e</sup> série, t. VII. (Septembre 1898.)

34

— 113°, M. Cailletet suggéra l'idée de descendre plus bas en évaporant l'éthylène liquéfié dans le vide, comme Faraday l'avait fait pour le protoxyde d'azote.

Cette expérience définitive, qui permit d'obtenir liquides à l'état *statique* l'oxygène, l'azote et l'oxyde de carbone, fut réalisée seulement en 1883 par MM. Wroblewski et Olszewski qui, en perfectionnant les appareils de M. Cailletet, atteignirent la température de — 139°, au moyen de l'éthylène liquide évaporé dans le vide. C'est en évaporant également dans le vide des corps de plus en plus volatils : acide carbonique, éthylène, oxygène, que les physiciens, et tout particulièrement M. Olszewski, ont pu nous faire connaître les propriétés des gaz liquéfiés.

M. James Dewar, depuis l'année 1884, en suivant la même voie et en perfectionnant les appareils, a obtenu des masses de gaz liquéfiés incomparablement plus grandes que ses devanciers, puisque, comme il le dit lui-même, il a pu recueillir l'oxygène liquide *par pintes* et réaliser ainsi les belles expériences que l'Académie connaît.

En somme, les appareils graduellement perfectionnés par MM. Cailletet, Olszewski et Dewar, se composent de trois machines à froid par évaporation, employant des liquides de plus en plus volatils : acide carbonique, éthylène, oxygène. On comprend sans peine, comme le fait remarquer M. Linde, que l'installation et l'exploitation de pareilles machines entraînent des frais et des difficultés qui s'opposent à leur emploi dans l'industrie.

Pour arriver à obtenir ce refroidissement, qui est la condition nécessaire et suffisante pour liquéfier un gaz quelconque, M. Linde a repris le principe si fécond de la détente, imaginé par M. Cailletet, en rendant cette détente continue, si je peux m'exprimer ainsi, et en usant d'artifices des plus ingénieux.

Cet appareil à liquéfier l'air a ceci d'extrêmement remarquable qu'il n'emploie aucun agent réfrigérant autre que l'air lui-même, et que tout le mécanisme se réduit à une pompe qui comprime cet air et à un serpentín où il se détend de façon continue par la manœuvre d'un simple robinet.

Mais, pour arriver à ce résultat, M. Linde a dû révoquer en doute un axiome admis par tous les physiciens, à savoir qu'une machine à air froid dépourvue de cylindre de détente (où se produit un *travail extérieur*) ne pourrait pas produire de froid du tout. Cela est absolument exact pour un gaz *parfait*, comme le supposent les lois de

Mariotte et de Gay-Lussac, parce que, pour ce gaz parfait, les forces *intérieures* sont infiniment petites.

M. Linde s'est heureusement souvenu que Thomson et Joule ont démontré depuis près de quarante ans que l'air atmosphérique n'est pas un gaz *parfait* et que, lorsqu'il s'écoule d'une pression élevée à une pression plus basse, il éprouve un refroidissement  $\theta$ , *indépendant de l'énergie du jet*, qui est donné par la formule

$$\theta = 0,276 (p_1 - p_2) \left( \frac{273}{T} \right)^2,$$

où  $p_1 - p_2$  représente la différence de pression en atmosphères, et T la température *absolue* du jet.

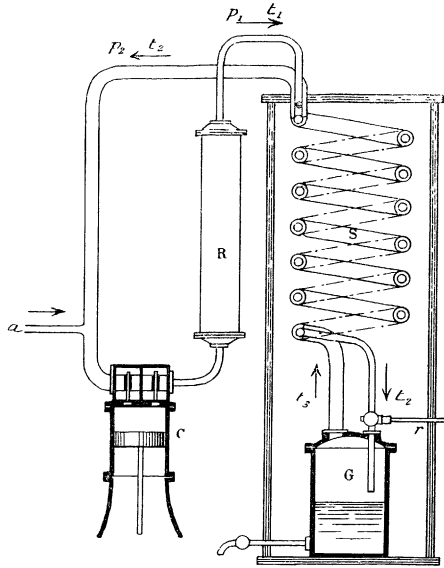


FIG. 1.

- C, Compresseur d'air à 220 atmosphères.
- R, Réfrigérant ramenant l'air comprimé à la température ambiante.
- $t_1, t_2$ , Serpentin intérieur parcouru de haut en bas par l'air comprimé à 220 atmosphères.
- $r$ , Robinet détenteur.
- G, Réservoir où l'air se détend de 220 atmosphères à 20 atmosphères et où une partie se liquéfie par la détente.
- $t_3, t_4$ , Serpentin extérieur que l'air détendu parcourt de bas en haut. Cet air revient au compresseur.
- $a$ , Tubulure apportant de l'air nouveau pour remplacer celui qui se liquéfie.

C'est sur le froid résultant de cette détente continue qu'est basée la nouvelle machine. Ce refroidissement, comme on peut le voir, est d'abord très faible (un quart de degré par atmosphère), ce qui nécessiterait des différences de pression formidables (au moins 800 atmosphères) pour abaisser la température de l'air à  $-200^{\circ}$ . Inutile de dire que de pareilles pressions ne seraient pas pratiques. De plus, le travail de compression serait énorme. M. Linde a tourné ces deux difficultés très ingénieusement : 1° en *accumulant* les effets de la détente continue; 2° en ne laissant pas détendre l'air comprimé jusqu'à la pression atmosphérique.

L'accumulation des effets est obtenue au moyen de deux tuyaux concentriques en cuivre entrant l'un dans l'autre et longs de 15 mètres. Le tuyau intérieur est parcouru par l'air venant d'une pompe qui le comprime à 220 atmosphères. Arrivé au bout de ce tuyau, l'air se détend dans le second tuyau à 20 atmosphères et le parcourt *en sens inverse* après s'être refroidi de  $50^{\circ}$  par la détente; mais, dans son trajet, il cède le froid produit à l'air qui arrive comprimé à 220 atmosphères, de sorte qu'à l'extrémité du second tuyau l'air, détendu à 20 atmosphères, retourne à la pompe de compression à la température ambiante, après avoir cédé tout le froid produit par la détente à l'air qui arrive. Ces deux tuyaux sont roulés en serpentin pour tenir moins de place et isolés dans une caisse en bois bourrée de laine brute pour éviter les apports de chaleur extérieure. Par ce moyen la température, avant et après l'écoulement, s'abaisse graduellement jusqu'à ce que la température de liquéfaction soit atteinte et qu'une partie de l'air qui s'écoule se rassemble à l'état liquide dans le récipient adapté à l'extrémité de l'appareil.

D'après la formule de Thomson et Joule, le *refroidissement* dépend de la *différence* des pressions  $p_1 - p_2$ , tandis que le *travail* de compression dépend du *quotient* de ces mêmes pressions  $\frac{p_1}{p_2}$ . Il y a donc avantage à avoir  $p_1 - p_2$  très grand et  $\frac{p_1}{p_2}$  le plus petit possible. C'est le résultat atteint par M. Linde en faisant  $p_1 = 220^{\text{atm}}$  et  $p_2 = 20^{\text{atm}}$  et non 1; en effet  $p_1 - p_2 = 200$ , tandis que  $\frac{p_1}{p_2} = 11$  et non 200, comme cela arriverait si l'on détendait jusqu'à la pression atmosphérique.

En somme, sans vouloir donner de description plus détaillée, la machine de M. Linde repose sur trois points principaux :

1° Refroidissement par *travail intérieur* de l'air se détendant et résultant de ce qu'il n'est pas un gaz parfait suivant les lois de Mariotte et de Gay-Lussac;

2° Accumulation du refroidissement par le principe du contre-courant réalisé d'une façon parfaite par l'échangeur de température, composé de deux serpentins concentriques où l'air circule en sens inverse;

3° Diminution du travail de compression en ne laissant pas l'air se détendre jusqu'à la pression atmosphérique.

Tels sont les points extrêmement ingénieux qui caractérisent la machine de M. Linde et qui rendent industrielle la liquéfaction de l'air atmosphérique. La machine que j'ai au laboratoire produit environ 1 litre d'air liquide à l'heure en dépensant un peu moins de trois chevaux. C'est déjà un résultat remarquable, mais qui est dépassé de beaucoup par les machines industrielles du même inventeur donnant 60 kilogrammes d'air liquide à l'heure.

On suit très facilement l'abaissement de température au moyen d'une soudure thermo-électrique (constantan-fer), reliée à un galvanomètre Deprez-d'Arsonval indiquant jusqu'à  $-250^{\circ}$ .

Une fois liquéfié, il faut pouvoir recueillir et garder cet air à la pression atmosphérique. Pour cela, il faut des récipients aussi imperméables que possible à la chaleur. M. J. Dewar recommande pour cet usage des vases spéciaux où l'enveloppe isolante est constituée par le vide de Crookes.

C'est Dulong et Petit qui, dans leurs remarquables recherches sur le refroidissement, ont les premiers montré qu'un corps placé dans une enceinte vide se refroidit (ou se réchauffe) de 20 à 25 fois plus lentement que dans l'air atmosphérique.

Sans vouloir soulever aucune discussion de priorité, je crois devoir rappeler que, me basant sur les expériences de Dulong et Petit sur le pouvoir thermo-isolateur du vide, j'ai répandu depuis 1887, parmi les médecins français, des réservoirs en verre identiques, *comme destination et comme forme*, à ceux employés par M. Dewar.

Voici en effet ce que je disais dans une Note publiée le 11 février 1888 dans les *Comptes rendus de la Société de Biologie* (Masson, éditeur) :

« Dans bien des circonstances il importe de réaliser un milieu aussi imperméable que possible à la chaleur et qui soit néanmoins parfaitement transparent. Après bien des essais, dans le détail desquels je ne saurais entrer ici, j'ai trouvé que le vide sec, fait dans un vase

en verre, constitue une excellente enveloppe pour arrêter la chaleur obscure. L'appareil se compose en principe de deux vases en verre entrant l'un dans l'autre et soudés de façon à former un vase unique. Cet ensemble constitue un récipient qui présente deux cavités concentriques : l'une intérieure, qui est le réservoir proprement dit; l'autre annulaire, où l'on fait le vide sec à l'aide de la pompe à mercure. La transparence des parois de ce récipient permet de voir tout ce qui se passe dans son intérieur. L'enveloppe annulaire, où le vide sec existe, constitue la paroi thermo-isolatrice. J'ai pu constater qu'un liquide chaud, placé dans le vase intérieur, se refroidit de quinze à vingt fois plus lentement que si l'enveloppe isolatrice n'existait pas. Cette protection est encore bien plus efficace si l'on place dans l'appareil un liquide très froid, tel, par exemple, qu'un gaz liquéfié (acide sulfureux, acide carbonique et éther, chlorure de méthyle, etc.)...

«... Le résultat obtenu est déjà plus satisfaisant en plongeant le tube dans l'air sec, mais cette protection est bien moins efficace que le vide sec parce que, dans l'air desséché, le tube s'échauffe par convection, l'air de l'espace annulaire passant constamment d'une des parois à l'autre. Dans un récipient constitué comme je viens de le dire, on peut conserver les gaz liquéfiés pendant des heures à la température ambiante et les manier aussi facilement que l'eau ordinaire, la transparence absolue du récipient permettant de suivre tous les phénomènes qui se passent dans le liquide. »

J'ajouterai que, pour produire avec le chlorure de méthyle (ou d'autres gaz liquéfiés) des températures aussi basses qu'en évaporant ces liquides dans le vide, j'ai signalé depuis nombre d'années le procédé suivant qui dispense de tout mécanisme : il suffit de verser le chlorure de méthyle dans un vase *poreux* de pile pour que la température du liquide se maintienne automatiquement dans ce vase aux environs de  $-60^{\circ}$ , bien que le chlorure de méthyle bouille seulement à  $-23^{\circ}$ . Ce procédé est plus simple que l'insufflation d'air ou l'évaporation dans le vide et m'a rendu de grands services.

*Extraction de l'oxygène de l'air.* — Pendant la liquéfaction de l'air ses éléments passent *simultanément* à l'état liquide, bien que l'azote soit plus volatil; mais, pendant la réévaporation, l'azote se dégage le premier. Il est donc possible d'utiliser ce fait pour séparer l'azote de l'oxygène. Mais, par économie, il est évident que l'azote gazeux doit sortir de l'appareil à la température ambiante. Il doit restituer à l'appareil tout le froid produit pendant sa distillation. M. Linde

obtient ce résultat par la disposition suivante représentée schématiquement (fig. 2) :

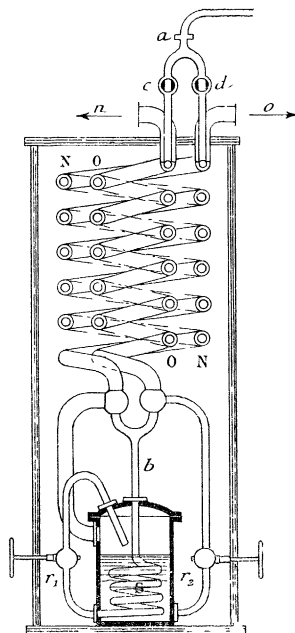


FIG. 2.

L'air comprimé est distribué en *a* à deux appareils à contre-courant, N et O, se rassemble de nouveau en *b*, s'écoule par un serpentin placé dans le collecteur et arrive enfin, par le robinet  $r_1$ , dans ce collecteur, où une partie (principalement de l'oxygène) se liquéfie, tandis que l'autre partie (principalement de l'azote) retourne par l'appareil tubulaire N et quitte la machine en *n*. Au moyen du serpentin placé dans le liquide, l'air comprimé cède de la chaleur à ce liquide et en provoque ainsi l'évaporation d'une plus ou moins grande partie (et d'abord de l'azote qu'il contient encore).

Le robinet  $r_2$  permet de régler la sortie du liquide du collecteur de façon à pouvoir faire varier à volonté le niveau de ce liquide et par conséquent la surface active du serpentin, suivant la quantité de chaleur nécessaire pour assurer à l'oxygène un certain degré de pureté. Le liquide qui sort en  $r_2$  (oxygène plus ou moins pur) passe dans l'appareil à contre-courant *o* et enlève à l'air comprimé, qui arrive en



sens inverse, la chaleur qui lui est nécessaire pour la réévaporation et pour équilibrer sa température. La division de l'air en  $a$  s'effectue au moyen de deux robinets  $c$  et  $d$ , de façon que la température de sortie des gaz en  $n$  et  $o$  soit égale et seulement de quelques degrés inférieure à la température ambiante. De cette façon, la machine n'a à produire que le froid nécessaire pour compenser les pertes dues à l'imperfection des échangeurs et au rayonnement. Les essais ont démontré qu'il était possible, par ce procédé, d'extraire de l'air atmosphérique plus de 6 mètres cubes d'oxygène pur par cheval-heure.

D'autres mélanges gazeux peuvent être séparés par le même procédé.

On voit donc qu'il est possible, avec l'air liquide, d'obtenir et les températures les plus basses et les températures les plus élevées que l'on puisse produire. On a déjà fait une application industrielle pour la préparation du carbure de calcium par la combustion directe du carbone dans l'oxygène en présence de la chaux. Étant donné le bas prix de l'oxygène, le prix de revient serait inférieur à celui du four électrique.

---