

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 33 (1907)
Heft: 7

Artikel: Les machines pour la liquéfaction de l'air
Autor: Demierre, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-26227>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

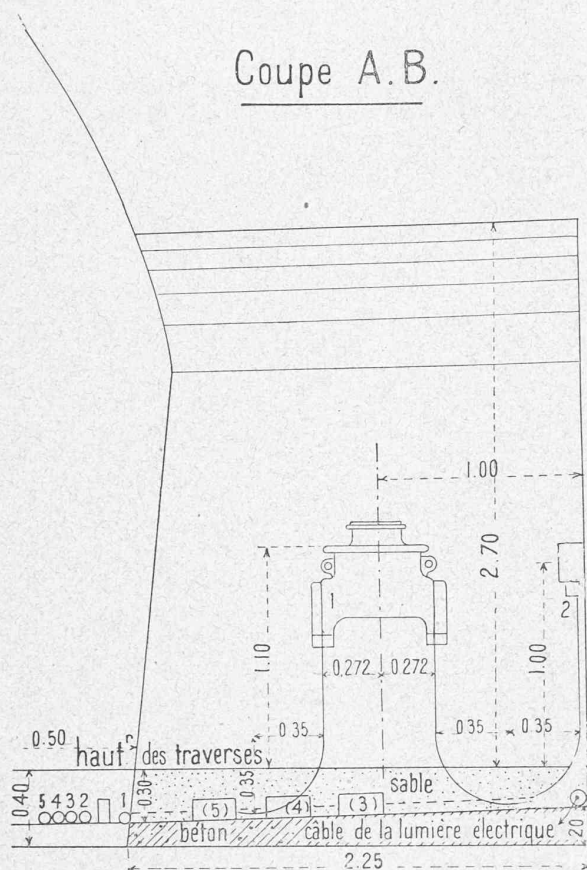


Fig. 10 bis. — Position des boîtes dans les niches du tunnel.

1,16 mm.², isolés au papier imprégné; gaine de plomb de 1,7 mm. d'épaisseur et armature en fils de fer ronds galvanisés.

Pour le service local des appareils de correspondance et de signaux, ainsi que pour quelques circuits d'éclairage, il a été posé à Brigue, à Iselle et à la station du tunnel, des câbles à 1, 2, 3, 5, 16, 18 et 30 conducteurs simples, isolés à la gutta-percha, au caoutchouc, ou au papier imprégné et protégés par une armature en fils de fer. Ils sont généralement posés dans un double fer zorès, à une profondeur de 0,60 à 0,80 cm., sauf à la station du tunnel où ils sont posés en partie dans le canal des grands câbles, en partie dans un canal spécial sous le ballast, ou bien suspendus le long des piédroits et protégés, dans ce dernier cas, par des fers en U.

La longueur totale des câbles du chemin de fer, au Simplon, est de 109,93 kilomètres avec un développement de 898,64 km. de conducteurs.

La fourniture des grands câbles à faible courant a été faite par la fabrique Berthoud, Borel & Cie, à Cortaillod, à l'exception de la moitié Sud du câble à 4 paires de conducteurs qui a été fournie par la maison Felten & Guillaume. Ces deux fabriques ont également fourni les câbles locaux à faible courant, sauf le câble pilote.

Les câbles à haute tension et le câble pilote ont été fournis par la maison Aubert, Grenier & Cie, à Cossonay.

Le câble télégraphique et téléphonique de l'Etat et le câble militaire ont été fournis par la maison Felten & Guillaume.

Longueur, diamètre
et poids des câbles du chemin de fer.

Désignation des câbles	Nombre des conducteurs	Section des conducteurs mm ²	Longueur		Diam. des câbles mm.	Poids net par kilom. K ^{os}
			des câbles m.	des conducteurs m.		
<i>Grands câbles</i>						
<i>Brigue-Iselle</i>						
Télégraphe	5 × 2	2,54	22,168	221,680	45	6700
Téléphone et cloches	7 × 2	2,54 7,00	22,716	318,024	47	7800 Nord 6100 Sud
Bloc-système	4 × 2	2,54	22,147	177,176	43	6600
Lumière, h. t.	3	6,00	20,580	61,740	51	6730
			87,611	778,620		
<i>Câbles locaux</i>						
Brigue, y compris les 3000 mètres de câble à haute tension et le câble pilote .			11,567	91,663		
Iselle			1,902	4,209		
Station du Tunnel.			8,847	24,150		
			22,316	120,022		

(A suivre).

Les machines pour la liquéfaction de l'air.

Par H. DEMIERRE, ingénieur.

Considérations générales.

On sait que pour chaque gaz il existe une température parfaitement déterminée, dite *température critique*, au-dessus de laquelle le gaz ne peut être liquéfié quelle que soit d'ailleurs la pression qu'il supporte. Le tableau ci-dessous donne la *température critique*, la *température d'ébullition* (sous la pression atmosphérique) et la *température de fusion* relatives aux corps qui nous intéressent.

	Tempér. critique.	Tempér. d'ébullition.	Température de fusion.
	Degrés C.	Degrés C.	Degrés C.
Hydrogène	— 240,8	— 252,8	— 258,9 (50 mm. de pression)
Azote	— 146,0	— 195,6	— 210,5 (62,51 » »)
Oxygène	— 118,8	— 182,8	— 227,0 (0,9 » »)
Air	— 140,0	— 190,0 ¹	— —

¹ Cette température n'est pas constante mais varie au fur et à mesure de l'évaporation de l'air liquide.

Pour liquéfier ces gaz, nous serons donc obligés de les amener à une température *au plus* égale à leur température critique dont la plus élevée, celle de l'oxygène, est encore de $-118,8^{\circ}\text{C}$. Si nous voulons liquéfier l'air sous la pression d'une atmosphère, nous devons atteindre -190°C ., ce qui, en prenant l'air à la température de $+17^{\circ}\text{C}$., donne une chute de $17 + 190 = 207^{\circ}\text{C}$. La chaleur spécifique de l'air (indépendante de la température) étant 0,2373 nous aurons à y enlever

$1 \times 0,2373 \times 207 = 49,12$ calories
pour chaque kilo.

On utilise à cet effet le froid produit par la *détente adiabatique* du gaz. Voici en quoi elle consiste : *Joule*, en 1845,

ment proportionnel au carré de la température absolue, initiale de la détente. Voici, pour l'air et pour l'hydrogène l'abaissement, η , de température qui accompagne une chute de pression d'une atmosphère¹.

	Température.	η
Air	$0,0^{\circ}\text{C}$.	$-0,29^{\circ}\text{C}$.
»	$17,1^{\circ}$ »	$-0,255^{\circ}$ »
»	$91,6^{\circ}$ »	$-0,203^{\circ}$ »
Hydrogène	$6,8^{\circ}$ »	$+0,089^{\circ}$ »
»	$90,3^{\circ}$ »	$+0,046^{\circ}$ »

On voit que la détente est accompagnée d'un abaissement de la température pour l'air et, au contraire, d'une

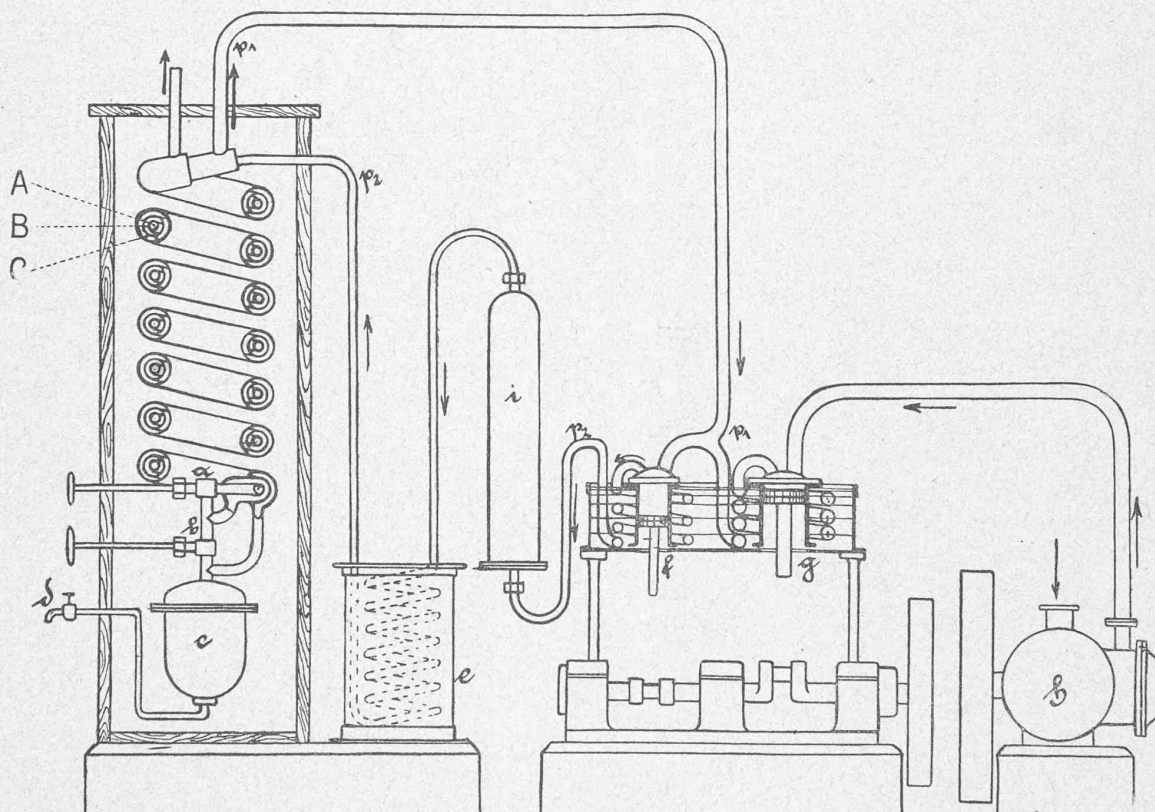


Fig. 1. — Machine de Linde.

avait démontré que si un gaz se détend isothermiquement *sans fournir de travail extérieur*, il ne se produit ni absorption ni dégagement de chaleur, autrement dit, l'énergie interne d'un gaz est indépendante de son volume et par conséquent de sa pression. En collaboration avec lord Kelvin, Joule reprit ses expériences, mais en employant un dispositif qui permettait d'effectuer les mesures avec une plus grande précision que celle atteinte dans ses premières recherches.

Les deux savants trouvèrent alors que la loi énoncée par Joule n'était qu'approximative et qu'en réalité la détente, sans travail extérieur, des gaz était accompagnée d'un effet thermique variable d'un gaz à l'autre, directement proportionnel à la variation de pression et inversé-

élévation pour l'hydrogène. Ce dernier gaz présente un point d'inversion à $-80,5^{\circ}\text{C}$. au-dessous duquel la détente entraîne un abaissement de la température. Nous avons donc dans la main un moyen de refroidir l'air, en utilisant cet effet thermique, l'*effet Joule*, concomittant de la détente. Voyons quelle est la chute de pression nécessaire pour abaisser la température de l'air des 207°C . dont nous avons parlé plus haut. Nous aurons

$207 = 0,255 (p_1 - p)$, d'où $p_1 - p = 812$ atmosphères².

¹ Travers. Experimentelle Untersuchung von Gasen. — Vieweg. u. Sohn, Braunschweig.

² La formule rigoureuse serait $\eta = \frac{a}{T^2} + b$, où a et b sont des constantes.

On voit donc qu'en utilisant seulement l'effet Joule pour le refroidissement du gaz, on serait obligé de travailler avec des pressions formidables. *Linde*, en Allemagne, et *Hampson*, en Angleterre, eurent l'idée d'employer le gaz détendu et par conséquent à une température déjà plus ou moins basse pour refroidir l'air comprimé avant sa détente.

Un pareil dispositif peut être facilement réalisé par un simple appareil à contre-courant. Le gaz est alors soumis à un véritable cycle de réfrigération et sa température s'abaisse progressivement jusqu'à ce qu'elle ait atteint la température de liquéfaction sous la pression donnée.

Machines de Linde.

La figure 1 représente schématiquement une machine de Linde. L'air est aspiré dans le compresseur *G* qui l'envoie, sous une pression de 4 atmosphères, dans le cylindre à basse pression *g* du compresseur compound, à injection d'eau, *g*, *f*, où il est porté à une pression de 50 atmosphères. L'air est alors comprimé dans le cylindre à haute pression *f* jusqu'à 200 atmosphères, puis passe à travers le dessiccateur *i* où il perd son humidité. La dessiccation parfaite de l'air est indispensable pour éviter les obstructions que pourrait causer la glace. L'air, comprimé et sec, pénètre dans l'échangeur formé de trois serpentins concentriques enroulés en hélice, comme on le voit sur la figure. La conduite d'arrivée de l'air comprimé débouche dans le serpentin central *A* qui aboutit à la valve *a* où l'air se détend jusqu'à une pression de 50 atmosphères. Une fraction de cet air se détend, en traversant la deuxième valve *b*, jusqu'à la pression atmosphérique et se liquéfie en partie; le résidu — non liquéfié — s'échappe hors de l'échangeur après avoir passé dans le serpentin extérieur *C* où il forme une chemise de protection contre la pénétration de la chaleur. L'autre fraction, à la pression de 50 atmosphères, qui a traversé seulement la valve *a*, retourne au cylindre à haute pression *f*, en suivant le serpentin médian *B* et en refroidissant l'air comprimé contenu dans le serpentin central. Le cylindre *G* aspire autant d'air qu'il s'en échappe par la valve *b* et ne sert qu'à combler le déficit. En *e* est représenté un dispositif — serpentin plongé dans un mélange réfrigérant ou petite machine à ammoniaque liquide — permettant de refroidir l'air comprimé avant son entrée dans l'échangeur. Cette réfrigération préalable augmente beaucoup le rendement en air liquide, comme l'indique le tableau ci-dessous :

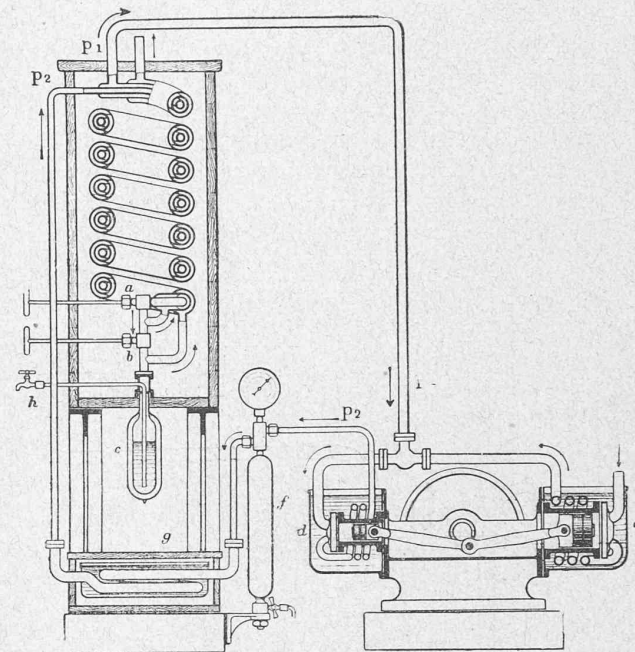


Fig. 2. — Machine de Linde, type de laboratoire.

Examinons d'un peu plus près le fonctionnement de l'échangeur; au commencement de l'opération, une première masse d'air comprimé à 200 atm. pénètre dans le serpentin central *A* puis se détend jusqu'à 50 atm. en traversant la soupape *a*. Nous avons ainsi une chute de pression correspondant à un effet Joule (abaissement de température) de t° . Cet air, traversant le serpentin médian *B* va refroidir l'air comprimé contenu dans le serpentin central *A* et, si l'échange était parfait, il aurait, au sortir du serpentin, la température de l'air comprimé entrant, tandis que la température de ce dernier, à son arrivée à la soupape *a* aurait été abaissée de t° . Cet air, se détendant à son tour, sa température tombe de t° et l'effet total est donc égal à $-2t$. Cet air détendu va traverser le serpentin médian en refroidissant l'air comprimé du serpentin central, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'accumulation du froid — si l'on peut ainsi parler — soit suffisante pour permettre la liquéfaction de l'air.

Les serpentins de l'appareil à contre-courant sont en cuivre. L'air liquide est recueilli dans le récipient *c* d'où on l'extract par le robinet *d*.

Grâce au cycle fermé de réfrigération : cylindre haute pression *f* $\rightarrow$, dessiccateur *i* $\rightarrow$, réfrigérant *e* $\rightarrow$, ser-

N° de la machine	I	II	III	IV	V	VI	VII	X	XV	
Production d'air liquide en litres par heure	avec réfrigération .	0,75	1,25	2	3	5	10	20	50	100
	sans réfrigération .	—	—	—	—	—	5,5	12,5	35	70
Puissance motrice, en chevaux	3,5	5,5	8,5	12	19	30	52	105	190	

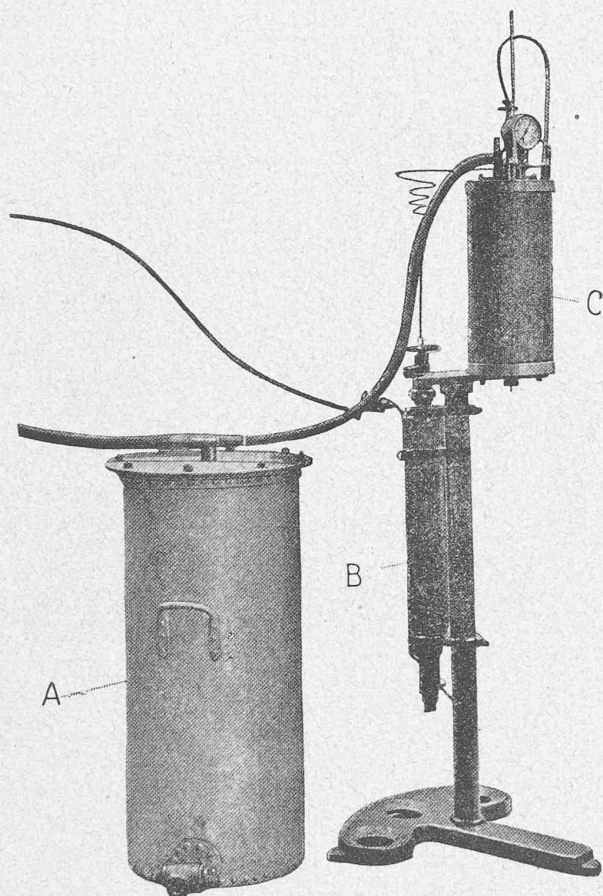


Fig. 3.

pentin central A de l'échangeur $\rightarrow$, valve a $\rightarrow$, serpentín médian B $\rightarrow$, cylindre à haute pression f, le long duquel la pression ne varie que de 200 à 50 atm., le travail de compression est considérablement diminué. En effet ce travail, qui doit être minimum pour rendre l'appareil économique, est proportionnel à $\log. \frac{p_1}{p}$ (p = pression initiale, p_1 = pression finale de la compression).

L'effet Joule étant, d'autre part, proportionnel à $p_1 - p$, il s'agissait donc de rendre le rapport $\frac{p_1}{p}$ minimum tout en laissant à la différence $p_1 - p$ une valeur aussi grande que possible.

Ce sont ces considérations qui ont amené Linde à employer une double détente (valves a et b) et à ne laisser qu'une faible partie de la masse d'air se détendre jusqu'à la pression atmosphérique.

Voici les caractéristiques d'une machine de Linde à trois cylindres, produisant 5 litres d'air liquide à l'heure¹.

Les deux cylindres à basse pression compriment 16 m³ d'air à l'heure (mesurés sous la pression atmosphérique) jusqu'à une pression de 50 atmosphères. Le troisième cylindre comprime 75 m³ d'air (mesurés sous la pression atmosphérique) de 50 à 200 atmosphères. La puissance ab-

¹ Ces renseignements m'ont été obligeamment transmis par l'« Aktiengesellschaft für Linde's Eismaschinen », à Munich.

sorbée est de 18 HP¹, auxquels il faut ajouter 1 HP. pour actionner la petite machine à ammoniac qui sert au refroidissement de l'air comprimé avant son entrée dans l'échangeur. Nous avons donc au total 19 HP. Cette machine, bien conduite, peut fournir facilement 7 litres d'air liquide

à l'heure. Le rendement est donc de $\frac{7}{19} = 0,368$ l. au cheval-heure. Dans les grandes installations Linde on obtient jusqu'à $\frac{1}{2}$ kilo d'air liquide par cheval-heure.

* * *

La « Société Linde » construit aussi des machines dites de « laboratoire », dont un modèle est représenté figure 2. L'air liquide n'apparaît qu'après plus de deux heures de marche; nous verrons que le liquéfacteur de Hampson, inférieur à celui de Linde, au point de vue industriel, permet d'obtenir l'air liquide déjà quelques minutes après la mise en train du compresseur; c'est un gros avantage pour un appareil de laboratoire et de démonstration.

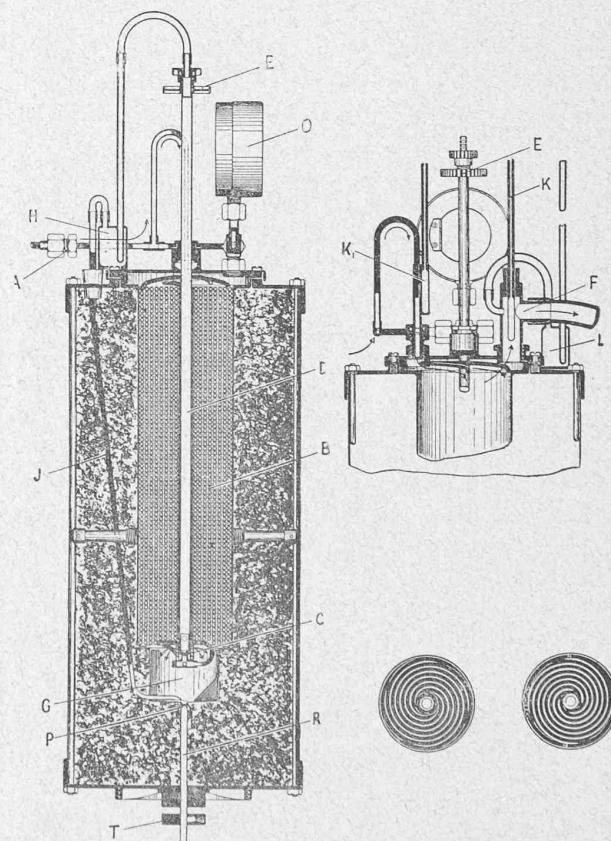


Fig. 4.

¹ La puissance théorique est 1° pour les 2 cylindres à basse pression $P_1 = \frac{16 \times 10332 \times 2.3}{75 \times 3600} \log_{10} 50 = 2.38$ HP. 2° pour le cylindre à haute pression $P_2 = \frac{75 \times 10332 \times 2.3}{75 \times 3600} \log_{10} 4 = 3.97$. Total = $P_1 + P_2 = 6.35$ HP.

Machines de Hampson.

Nous avons vu que dans les machines de Linde la détente se fait en deux temps et qu'une petite fraction seulement de l'air comprimé est ramenée à la pression atmosphérique ; dans les machines de Hampson, au contraire, il n'y a qu'une seule détente, *tout* l'air comprimé passant brusquement et *en une seule fois* de la pression de 200 atmosphères à la pression atmosphérique.

On voit tout de suite que le travail de compression doit être considérablement augmenté puisque la masse *totale* de l'air en circulation devra continuellement être portée de la pression atmosphérique à la pression de 200 atmosphères. Toutefois, l'échangeur de Hampson — l'appareil à contre-courant — réalise un tel degré de perfection que, comme nous le verrons plus loin, son rendement n'est pas très inférieur à celui des petites machines de Linde.

Voici, brièvement, la description d'une installation Hampson :

L'air, aspiré à travers le récipient *A*, figure 3, contenant de la chaux éteinte, pénètre dans le cylindre à basse pression du compresseur compound à injection d'eau (fig. 5) où il est porté à la pression de 14 atmosphères. Il traverse ensuite un serpentin en cuivre plongé ainsi que le cylindre dans l'eau courante puis il arrive dans le cylindre à haute pression où il est comprimé à 200 atmosphères. Après avoir parcouru un second serpentin (ce serpentin et le cylindre à haute pression sont aussi refroidis par un courant d'eau) il pénètre dans un séparateur d'eau (non représenté) et passe ensuite dans le purificateur à haute pression *B* (fig. 3) rempli de potasse caustique en bâtons où il perd son acide carbonique et ses dernières traces d'eau. L'air parfaitement desséché arrive dans l'échangeur *C* (fig. 3).

Le compresseur (fig. 5), construit par la grande fabrique de torpilles Whitehead, à Fiume, peut être entraîné soit au moyen d'une courroie, soit au moyen d'un moteur électrique. Il est d'une puissance de 6 à 7 chevaux et à 400 tours par minute, avec un débit de 16 m³ à l'heure et une pression finale de 200 atm., il peut produire 1 1/2 litre d'air liquide à l'heure. Le rendement est donc de 0.25 litre au cheval-heure.

La figure 6 représente un compresseur de la « Brin's oxygen Company » (propriétaire des brevets Hampson). Le

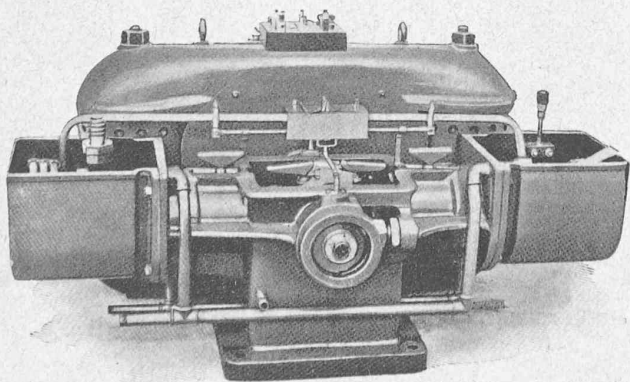


Fig. 5. — Compresseur « Whitehead ».

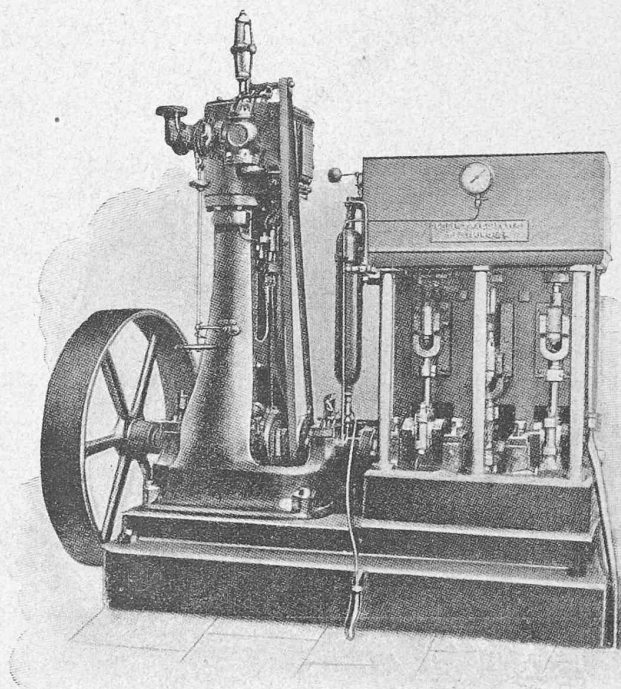


Fig. 6. — Compresseur de la « Brin's Company ».

débit en est de 28 m³ à l'heure la pression finale de 200 atmosphères et la puissance absorbée de 12 à 14 HP., avec 90 tours à la minute. Il fournit 2 1/2 à 3 litres d'air liquide par heure. Rendement = 0.25 litre au cheval-heure.

Reprenons la marche de notre air comprimé à son arrivée dans l'échangeur où il pénètre par le tube *A* (fig. 4). Ce tube est en communication avec 4 tubes *B* enroulés en spirales autour de l'axe *D*, comme on le voit au bas et à droite de la fig. 4. L'air comprimé à 200 atm. se divise en 4 portions, utilisant chacune un des 4 tubes spirales. Ceux-ci aboutissent en *c* à une valve de détente. L'air, en la traversant, passe brusquement de la pression de 200 atm. à la pression atmosphérique et se liquéfie en partie grâce au refroidissement dû à l'effet Joule. L'air détendu s'échappe au dehors par le tube *F*, mais seulement après avoir parcouru les interstices laissés entre les tubes *B*. Il est ainsi soumis à un mouvement hélicoïdal au cours duquel il refroidit l'air comprimé contenu dans les tubes *B*. L'échange de chaleur est tellement parfait que l'air sortant en *F* a une température à peine d'un degré supérieure à celle de l'air entrant dans les tubes *B*. Les considérations que nous avons développées à propos de l'échangeur de Linde s'appliqueraient aussi à celui de Hampson ; dans les deux machines nous avons affaire à un cycle de réfrigération le long duquel on « accumule » le froid, mais l'échangeur de Hampson réalise à la perfection toutes les conditions d'un excellent appareil à contre-courant, savoir : une grande surface de contact entre l'air comprimé et l'air détendu ; une faible épaisseur des tubes aussi bons conducteurs que possible ; un petit volume de l'échangeur, de façon à réaliser une surface minimum de rayonnement.

L'air liquide se rassemble dans le réservoir *G* d'où on l'extrait au moyen de la valve *P* commandée par le volant *T*. *O* est un manomètre indiquant la pression de l'air comprimé à son entrée dans l'échangeur. *E* est le volant de réglage de la valve de détente *C*. *L* est un manomètre à glycérine mesurant la pression de l'air qui s'échappe de l'échangeur.

La ventilation et la réfrigération du tunnel du Simplon.

Par E. MERMIER, ingénieur des C. F. F.,
ancien ingénieur au tunnel du Simplon.

Le 1^{er} juin 1906, les Chemins de fer fédéraux ouvrirent à l'exploitation la ligne de Brigue à Domodossola. Ce fut un grand événement pour la Suisse romande, car la ligne nouvelle reliait enfin par rails les deux tronçons de la voie internationale Paris, Lausanne, Milan, que la barrière des Alpes avait séparés jusqu'alors.

Pour franchir cette barrière, on perça sous le massif du Simplon, entre Brigue et Iselle, un tunnel de base, qui se distingue des ouvrages similaires par son extrême longueur, la forte épaisseur de terrain qui le surmonte et la haute température des roches qu'il traverse.

Le tunnel du Simplon mesure en effet 19 804 m. et traverse des couches situées à 2135 m. au-dessous de la surface du sol. La température du rocher rencontré a dépassé 54° C. pendant l'exécution des travaux.

Malgré cette température extraordinairement élevée et quoique les ingénieurs aient été aux prises, en outre, avec des irrutions d'eaux chaudes et froides dont le volume, réuni presque en entier sur un seul versant, s'est chiffré par plus de 1200 litres à la seconde, on est parvenu à parachever cette œuvre remarquable avec une grande rapidité et en dépensant par mètre courant de tunnel une somme inférieure à celle qu'ont coûtée les autres grandes traversées des Alpes.

Nous ajouterons que si les difficultés ont été grandes, si la température a dépassé de beaucoup les prévisions les plus pessimistes, la conduite de ce travail a pu néanmoins se poursuivre sans que l'état sanitaire général du nombreux personnel occupé ait eu à souffrir.

Or, il est incontestable pour ceux qui, comme nous, ont pu suivre de près les travaux du Simplon, qu'un résultat aussi satisfaisant doit être attribué, dans une large mesure, aux soins avec lesquels le renouvellement et le rafraîchissement de l'air des galeries a été assuré. Aussi, croyons-nous qu'il peut être intéressant de donner ici quelques indications sur les procédés de ventilation et de réfrigération qui ont été appliqués, et de montrer l'importance qu'ils ont eue sur la bonne marche des travaux.

Nous voulons rappeler d'abord, à titre de comparaison, ce qui a été fait pour la ventilation des chantiers de construction des trois grandes traversées alpines qui ont précédé la percée du Simplon.

Le tableau suivant reproduit les principales données intéressant la question qui nous occupe.

Au **Mont-Cenis**, la ventilation a été assurée par l'air détendu des machines à percussion du système Sommeiller employées à la perforation. L'air était comprimé à l'extérieur à 6 ou 7 atmosphères par des compresseurs à piston hydraulique, mus par des roues à augets et était amené à l'avancement dans une conduite de 0^m,20 de diamètre, débitant de 0^m,50 à 0,90 m³ d'air à la pression atmosphérique. Ce système de ventilation était complété par des aspirateurs à cloches servant à l'évacuation de l'air vicié.

La température du rocher a dépassé 29° sur une longueur de galerie de 500 m. environ. Le Docteur Giaccone, qui a été médecin du chantier Nord pendant trois ans, rapporte que, dans les parties chaudes du tunnel, l'insuffisance de la ventilation a eu une répercussion fâcheuse sur la santé des ouvriers et que l'anémie des mineurs a fait un grand nombre de victimes.

Les équipes étaient à la vérité peu nombreuses et le travail marchait avec une sage lenteur. La ventilation rudimentaire dont on disposait n'aurait d'ailleurs pu permettre un travail plus intense.

Saint-Gothard. — Comme au Mont-Cenis, la ventilation du Saint-Gothard a été faite par l'air d'échappement des perforatrices à percussion. Comprimé à 8 atmosphères, au moyen de pompes Colladon actionnées par des turbines, cet air, ramené à la pression atmosphérique, a atteint au maximum 2 m³ par seconde et est descendu parfois à 0,50 m³. On bénéficiait, il est vrai, de l'air des locomotives employées à la remorque des trains de matériaux.

La température du rocher a été supérieure sur 5 kilomètres au maximum constaté au Mont-Cenis (29°,5) et a atteint 31°. ××

Le faible volume d'air introduit, malgré l'abaissement de température dû à sa détente, se réchauffait si rapidement dans ce milieu que, non seulement il n'en résultait aucun refroidissement perceptible du rocher, mais que la présence des hommes, la combustion des lampes et l'explosion des mines élevait encore la température de l'air à 32°,5 en moyenne et même jusqu'à 35°.

Dans une note publiée en 1883¹, M. E. Stockalper, ingénieur, ancien chef de service de la tête Nord du tunnel du Gothard, montre d'une façon saisissante les funestes conséquences qu'ont eues ces hautes températures sur le personnel ouvrier. L'anémie des mineurs, déjà constatée au Mont-Cenis, prit au Gothard une rapide extension, au point que, du côté d'Airolo, le 60 % des ouvriers en fut plus ou moins gravement atteint. Dans la mauvaise période, les ouvriers quittaient en moyenne le travail au bout de deux mois et cependant ils ne travaillaient que deux jours sur trois avec un nombre d'heure de travail journalier réduit à 5 seulement.

¹ E. STOCKALPER. *Les grands tunnels alpins et la chaleur souterraine*. 1883.