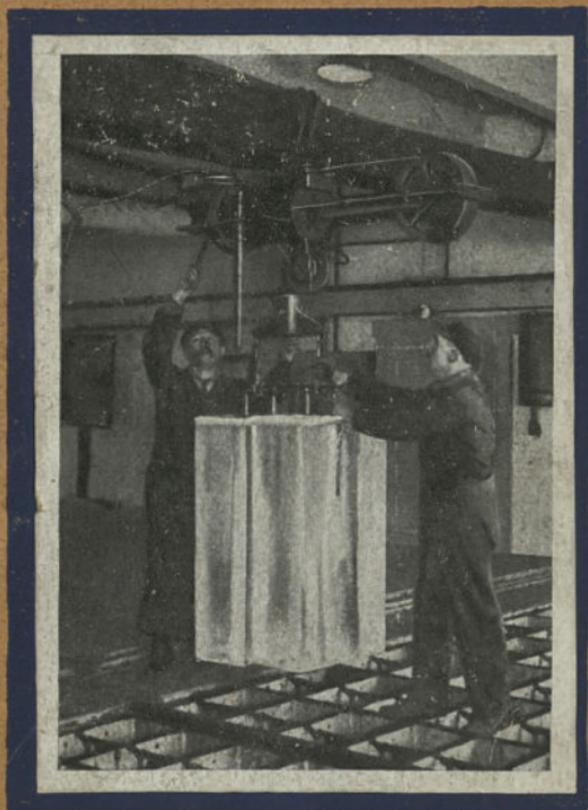


BIBLIOTHÈQUE DES MERVEILLES

LUCIEN FOURNIER

LE FROID



LIBRAIRIE HACHETTE

IRIS - LILLIAD - Université Lille

~~N° 2000~~

15/8/30

bib. 386205 / - 101597

BMIC 35

LIBRAIRIE J.-B. BAILLIÈRE ET FILS
• 19, rue Hautefeuille, Paris (VI^e)

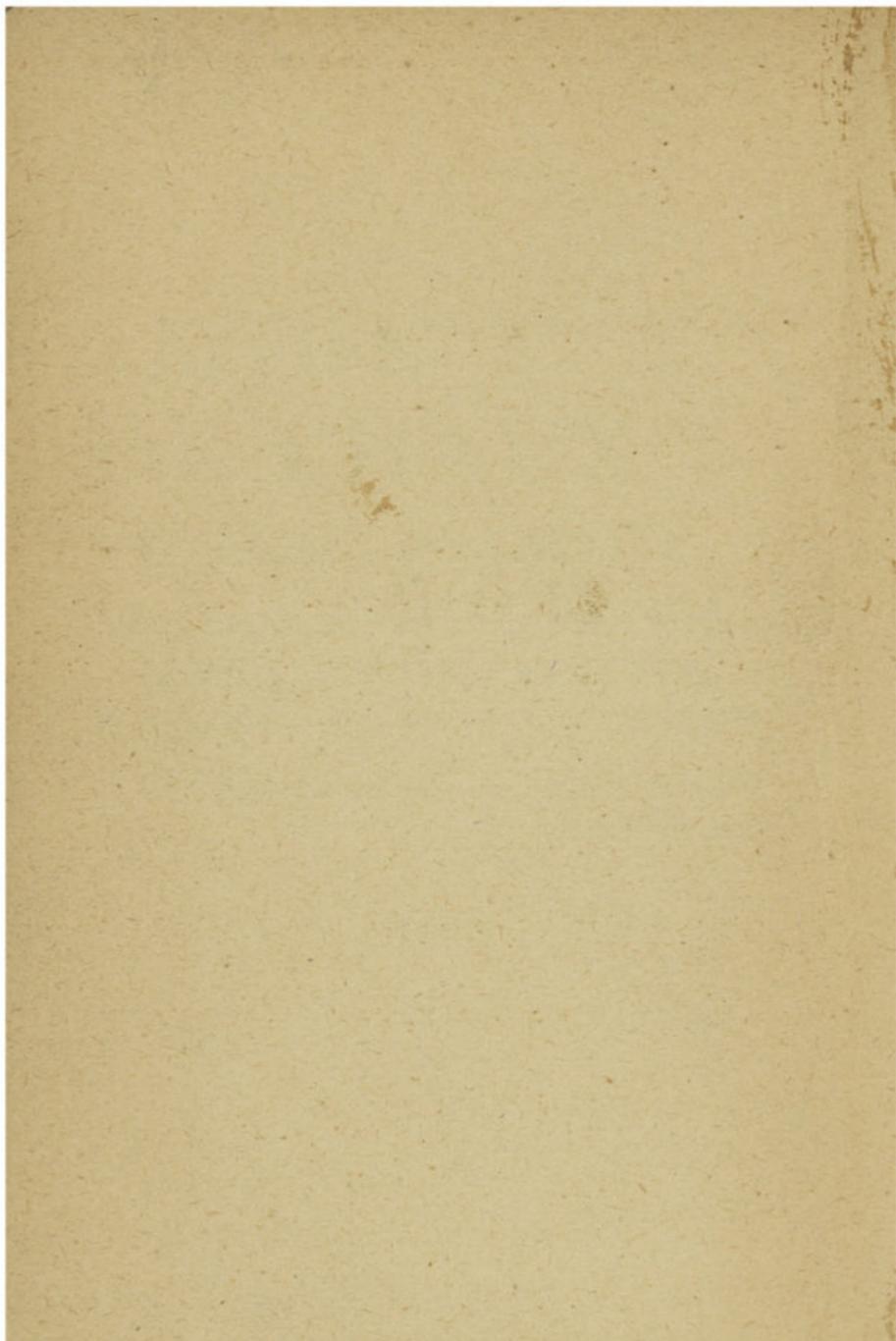
MANUEL
DU
Frigoriste

Par R. BOURBEY
Ingénieur A. et M.

1 vol. in-16 de 286 pages, avec 65 figures.

Cartonné..... 25 fr.

Ajouter pour frais d'envoi : France, 10 % ; Étranger, 15%



LE FROID

BIBLIOTHÈQUE DES MERVEILLES

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

de M. A. BERGET

Professeur à l'Institut Océanographique

Les Volumes parus sont marqués d'un astérisque

LA TÉLÉGRAPHIE
SANS FIL*

par M. A. Berget.

LES SOUS-MARINS*

par M. Clerc-Rampal.

LE FOND DE LA MER*

par M. Joubin.

LES INSECTES*

par M. Caustier.

LE CINÉMA*

par M. Ernest Coustet.

LES MERVEILLES DU CIEL*

par M. Fouché.

LES CHEMINS DE FER*

par M. R. Millaud.

LES NAVIRES*

par M. Clerc-Rampal.

LES AVIONS*

par M. J.-A. Lefranc.

L'ÉLECTRICITÉ*

par M. Ernest Coustet.

LE CORPS HUMAIN*

par M. le docteur Vaucaire.

LES MOTEURS*

par M. Petit.

AGUES ET MARÉES*

par M. A. Berget.

LES GRANDS TRAVAUX*

par M. Lucien Fournier.

RADIUM ET RAYONS X*

par M. Niewenglowski.

LA PHOTOGRAPHIE*

par M. R. Millaud.

L'ATMOSPHÈRE*

par M. A. Viger.

L'ÉCLAIRAGE*

par M. Lucien Fournier.

LA CHIMIE*

par M. A. Chaplet.

L'AGRICULTURE*

par M. André Prudhommesux.

LA CHIRURGIE*

par le docteur Henri Bouquet.

VOLCANS ET TREMBLEMENTS
DE TERRE*

par M. Paul Lemoine.

LA MÉCANIQUE*

par M. Eugène-H. Weiss.

LES PLANTES*

par M. Becquerel.

LE FROID*

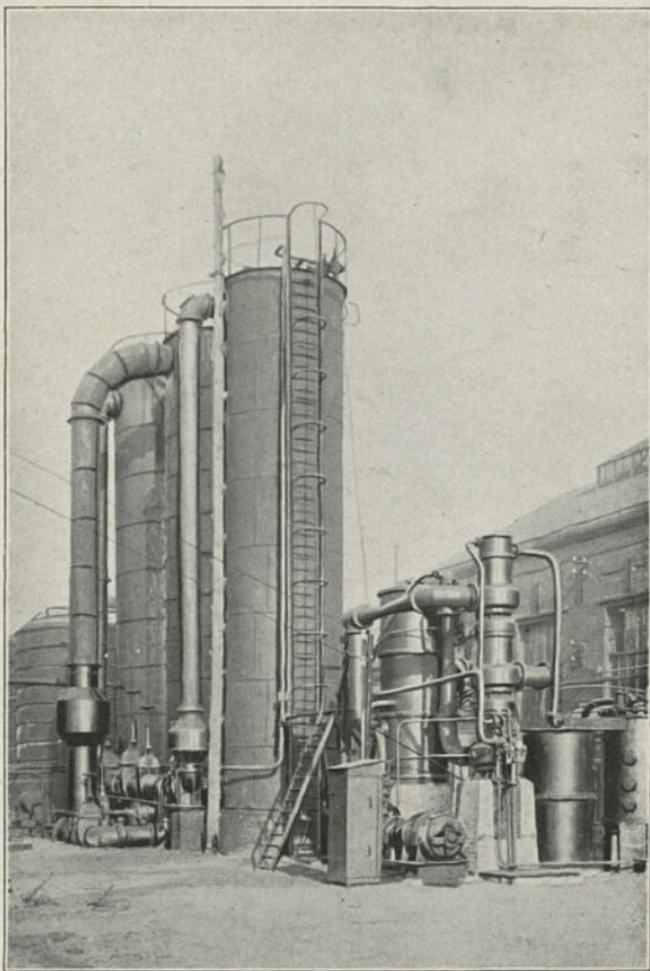
par M. Lucien Fournier.

LES MACHINES PARLANTES

par M. Eugène-H. Weiss.

etc. etc.

CHAQUE VOLUME ILLUSTRÉ DE 100 GRAVURES ENVIRON



Cl. Tesson.

INSTALLATION PRODUCTRICE DE FROID PAR LA VAPEUR D'EAU.

• BIBLIOTHÈQUE DES MERVEILLES •

LE FROID

PAR
LUCIEN FOURNIER

•
AVEC 95 GRAVURES
•

787

MUSEE
COMMERCIAL
LILLE



• LIBRAIRIE HACHETTE •

*Tous droits de traduction, de reproduction
et d'adaptation réservés pour tous pays.
Copyright by Librairie Hachette, 1930*

LE FROID

AVANT PROPOS

VOICI, dans notre Bibliothèque des Merveilles, un livre dont on peut dire qu'il est « d'actualité ».

Jamais, en effet, l'industrie du froid n'a connu le développement qu'elle possède aujourd'hui et qui ne fait qu'augmenter : conservation des denrées alimentaires, anesthésie, fabrication de la glace, « froid central » correspondant au « chauffage central ». Wagons, navires, entrepôts frigorifiques sont des applications dont le nombre et l'importance s'accroissent chaque jour, sans parler des côtés purement industriels dont l'industrie de l'air liquide est un exemple caractéristique.

Tout cela rendait nécessaire la publication d'un volume de notre collection consacré au FROID.

Nous l'avons demandé à M. Lucien Fournier, dont nos fidèles lecteurs ont pu apprécier la clarté d'exposition et la documentation si sûre et si étendue dans deux autres ouvrages de notre « Bibliothèque ». Il l'a écrit avec le même souci d'exactitude, avec les mêmes qualités que l'Eclairage et les

AVANT PROPOS

Grands travaux, et nos lecteurs les y retrouveront avec plaisir et avec profit.

Après avoir rappelé les notions indispensables sur « le chaud et le froid », après avoir précisé la différence essentielle entre la « température » et la quantité de « chaleur » qu'on confond si souvent dans le langage usuel, après avoir dit dans un chapitre très captivant ce qu'est le froid dans la nature, il nous indique les principes de la production du froid, de la liquéfaction des gaz ; il nous initie au développement de la construction et de l'emploi des machines frigorifiques, des plus puissantes productrices aux appareils domestiques les plus modestes : il nous dit les prodigieuses applications actuelles du froid ; il nous montre l'effet qu'il a sur les organismes vivants ainsi que sur la matière que nous persistons encore à appeler « inerte ». Son livre se lit avec une curiosité toujours satisfaite « de la bonne manière ».

J'espère donc que nos lecteurs lui feront le même accueil qu'à ses devanciers... et ce sera justice.

A. B.



CHAPITRE I

LA CHALEUR ET LE FROID

Qu'est-ce que la chaleur? || Le froid est de la chaleur négative. || La quantité de chaleur. || La mesure des températures. || La mesure des quantités de chaleur. || Le zéro absolu. || Fusion et solidification. || La vaporisation. || La liquéfaction. || Les sources de froid. || Equivalent mécanique de la chaleur.

LA chaleur et le froid, qui impressionnent si différemment notre organisme, ne constituent cependant qu'une manifestation unique d'un phénomène auquel la nature entière est soumise.

C'est une loi universelle qui veut que l'équilibre des températures s'établisse entre deux corps en présence comme s'établit l'équilibre des liquides dans deux vases communicants. Mais, s'il est facile de vérifier l'exactitude de ce dernier phénomène, on ne peut procéder à des investigations dans le domaine de la chaleur qu'en utilisant des appareils spéciaux, parce que nous sommes en présence d'un agent physique invisible. Pour cette raison, beaucoup de gens affirment encore que l'on ne sait rien de son origine.

C'est là une erreur profonde que nous allons essayer de détruire.

QU'EST-CE QUE LA CHALEUR? // // Nos connaissances actuelles sur la composition de la matière permettent de définir avec précision le phénomène de la chaleur.

Un corps quelconque, solide, liquide ou gazeux, est constitué par un certain nombre de molécules en perpétuel état d'agitation. Dans les corps solides, ces molécules

LE FROID

tournoient sur place comme le fait une toupie sur une table. Mais dans les liquides, les toupies moléculaires peuvent se déplacer et c'est précisément cette faculté de déplacement qui caractérise la différence qui existe entre un solide et un liquide. Plus les molécules sont mobiles, plus le liquide est fluide, plus il tend à se rapprocher de l'état gazeux, dont les molécules se meuvent dans tous les sens avec des vitesses dont l'ordre de grandeur est de 500 mètres à la seconde.

Les molécules de tous les atomes étant animées d'une même vitesse, se heurtent, se choquent, avec une grande violence et une telle rapidité que chacune d'entre elles change des millions de fois de direction en une seconde !

Bien entendu, plus un gaz est raréfié, moins il y a de molécules en présence et moins elles se heurtent. Dans le vide absolu, il n'y a plus de molécules et, si on en introduit une, elle ne sera retenue, dans son déplacement, que par les parois du tube qui la contient.

Partons donc de ce principe que plus l'air est raréfié, plus chaque molécule a de champ à parcourir.

Pour cette raison, quand il fait bien chaud, l'air se dilate et les molécules, ayant plus de jeu entre elles, se déplacent plus facilement, parcourant des espaces plus étendus. Nous nous en apercevons aussitôt par la « morsure » de ces molécules sur notre épiderme, plus profonde qu'à la température normale.

Les physiologistes, que tente une explication des sensations de chaud et de froid, admettent que nous possédons un *sens thermique*. Les physiciens expliquent par lui la morsure de la chaleur; mais ils ont été jusqu'ici incapables d'expliquer celle du froid autrement qu'en supposant — encore — qu'il existe un *sens du chaud* et un *sens du froid*. Le ralentissement du mouvement moléculaire produit par un abais-

LA CHALEUR ET LE FROID

sement de température intéresserait seulement le *sens du froid*. Comment ? On ne nous le dit pas.

LE FROID EST DE LA CHALEUR NÉGATIVE. ¶ ¶

L'air, en raison de sa faible conductibilité calorifique, joue le rôle de régulateur de température à la surface du globe. C'est grâce à lui que nous sommes à l'abri des différences énormes de température que la terre supporterait entre la nuit et le jour, entre l'été et l'hiver.

Si, sous l'action d'un foyer artificiel, la température d'un corps s'élève, il cède automatiquement de la chaleur à tous ceux qui l'entourent. Si on cesse de chauffer, toute la chaleur acquise ne tarde pas à passer aux corps avoisinants et surtout à l'air ambiant. Il se refroidit, par conséquent, jusqu'à ce qu'il soit revenu à la même température que celle du milieu auquel il appartient.

Chaleur et *froid* sont donc deux mots synonymes. Ils ont été imaginés pour différencier deux impressions physiologiques opposées, bien que de même origine. Le *froid* définit une température inférieure à celle que notre corps trouve agréable ; elle est caractérisée par ce fait que l'échange de chaleur entre notre épiderme et l'atmosphère s'effectue à notre détriment. Nous fournissons plus de chaleur que nous n'en recevons et les vêtements ne sont que des *enveloppes d'air* destinées à conserver la plus grande partie de cette chaleur autour de notre corps. S'ils n'y parviennent pas, nous avons froid.

On peut donc dire que le froid est de la chaleur négative. Les médecins l'admettent, mais les physiologistes savent que la chaleur détruit les cellules, tandis que le froid les conserve. Ce sont là deux effets contraires que l'on obtient d'un même agent selon qu'il est massif ou raréfié. C'est pourquoi il a donné naissance à deux sciences bien différentes,

LE FROID

sur chacune desquelles se sont greffées de nombreuses industries.

LA TEMPÉRATURE. La notion de *température* est différente de celle de *chaleur*, bien que l'on confonde souvent les deux expressions dans le langage courant. Nous allons expliquer en quelques mots la différence qui existe entre ces deux notions fondamentales.

D'abord la sensation de *chaud* ou de *froid* est essentiellement physiologique: nous *sentons* qu'il fait chaud ou qu'il fait froid. Et si nous considérons un corps dont nous puissions mesurer à chaque instant les dimensions, nous constatons que ces dimensions *augmentent* quand on passe d'un milieu où l'on a froid à un milieu où l'on a chaud.

Cela posé, on observe que certains phénomènes présentent cette particularité que, pendant leur manifestation, le volume du corps considéré demeure invariable: par exemple la fusion de la glace à la pression ordinaire, par exemple l'ébullition de l'eau dans les mêmes conditions: on dit alors que, pendant la durée de ces phénomènes, *la température reste constante*.

Alors, si nous prenons le corps dont nous avons parlé, celui dont nous pouvons connaître le volume à chaque instant; si nous le plongeons dans la glace fondante, qui est une « température constante », nous inscrirons le chiffre *zéro*, arbitrairement, en face de l'indication du volume du corps qui y est plongé. Cela fait, nous le transporterons dans la vapeur d'eau bouillante sous la pression normale: c'est aussi une « température constante ». Nous inscrirons, encore arbitrairement, le chiffre *cent* en face de l'indication du volume du corps qui y est plongé.

Et nous partagerons l'intervalle entre le point *zéro* et le point *cent* en cent parties égales, dont chacune sera un *degré*.

LA CHALEUR ET LE FROID

Si, alors, nous plongeons le corps à volume variable dans un milieu où l'indication de ce volume s'arrête devant le chiffre 17, nous dirons que *la température de ce milieu est de 17°*; et le corps dont on peut connaître le volume à chaque instant s'appelle un *thermomètre*. Les thermomètres usuels sont les *thermomètres à mercure*, formés d'un petit réservoir de verre mince, rempli de mercure et surmonté d'un tube très fin sur lequel sont tracés les degrés. Comme le mercure se *dilate* plus que le verre, toute variation de température à laquelle le réservoir sera soumis se traduira par une ascension ou une descente du métal dans le tube fin. Les températures au-dessous de zéro correspondent aux milieux froids.

LA QUANTITÉ DE CHALEUR. ¶ ¶ Nous venons de voir ce qu'est la *température*; voyons maintenant ce qu'est la *quantité de chaleur*.

Prenons deux récipients, l'un d'un litre, l'autre de 100 litres, contenant tous deux de l'eau à 0°. Mettons sous ces deux récipients des réchauds à alcool, d'une contenance suffisante pour porter l'eau jusqu'à l'ébullition. Quand ce résultat sera atteint, nous constaterons qu'il a fallu brûler *100 fois plus d'alcool* pour faire bouillir l'eau du grand récipient que pour celle du petit, c'est-à-dire lui fournir une quantité de chaleur cent fois plus grande, et cependant deux thermomètres plongés dans les deux vases *indiqueront la même température* : 100°.

On voit donc qu'il ne faut pas confondre *chaleur* et *température*. La température est une « indication » reliée à la « quantité de chaleur », mais elle se mesure avec le *thermomètre*; la quantité de chaleur se mesure avec le *calorimètre*.

LA MESURE DES TEMPÉRATURES. ¶ ¶ Les deux

LE FROID

mots, *chaleur* et *température*, sont toujours associés; il est impossible d'écrire l'un sans penser à l'autre. Chacun sait, d'ailleurs, que le mot *température* définit l'état que possède un corps relativement à la chaleur.

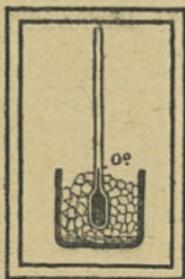


Fig. 1. — Un thermomètre dans la glace fondante.

On dit que la température du corps humain est de $37^{\circ},5$, que celle de la glace fondante est de 0° , etc. Ce sont là des mesures rigoureuses définies à l'aide d'une unité spéciale : le *degré*. Le degré n'a pas été choisi arbitrairement; sa longueur est basée sur la dilatation des liquides sous l'influence de la chaleur. On sait depuis longtemps, en effet, que les corps augmentent de volume quand on les chauffe et que la température d'un corps en fusion ne varie pas tant que

dure la fusion, de même que la température d'ébullition est constante.

Le *thermomètre* est né de ces remarques. Plongé dans la glace fondante (fig. 1), il marque 0° ; dans l'eau bouillante (fig. 2), il marque 100° . Il a donc suffi de diviser en cent parties la hauteur du tube entre les deux niveaux pour obtenir la valeur du degré.

Le mercure et l'alcool sont les liquides les plus communément employés. Le premier ne peut convenir que pour mesurer les températures comprises entre son point d'ébullition qui est à 357° et son point de congélation qui est à 44° au-dessous de zéro (on écrit -44°); le second, entre 70° et -125° . Ces différences sont dues aux températures de

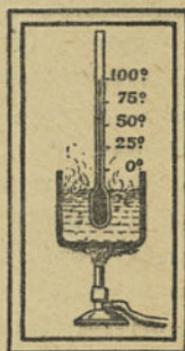


Fig. 2. — Un thermomètre dans l'eau en ébullition.

LA CHALEUR ET LE FROID

changements d'état des deux corps, températures d'ébullition d'une part, de solidification d'autre part.

Dans l'industrie, qui utilise communément des températures beaucoup plus élevées, on emploie des appareils spéciaux, comme les pyromètres optiques, basés sur les phénomènes de rayonnement et qui permettent même de mesurer la température des astres, les couples thermo-électriques, basés sur le principe de la pile à soudures, etc. Pour les basses températures, on fait usage de thermomètres à résistance.

LA MESURE DES QUANTITÉS DE CHALEUR. ∅ ∅ La mesure de la température d'un corps n'indique nullement la quantité de chaleur qu'il a fallu fournir à ce corps, ou lui enlever, pour l'amener à la température indiquée par l'instrument de mesure.

Cette connaissance est pourtant nécessaire, car, dans l'industrie, la production de la chaleur et celle du froid entraînent une dépense de combustible que l'on a intérêt à réduire le plus possible. Aussi les physiciens ont-ils imaginé des appareils dits *calorimètres* permettant d'effectuer ces mesures.

Les *calorimètres* indiquent le nombre de *calories* qu'il faut fournir à un corps pour porter sa température à une valeur déterminée. L'unité de chaleur est donc la *calorie*, qui représente la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'un centimètre cube d'eau à la pression atmosphérique. C'est là la *petite calorie*. La *grande calorie*, qui est l'unité industrielle, est mille fois plus grande.

Le *calorimètre* (fig. 3) est moins connu que le thermomètre ; aussi nous en donnons la description.

Dans un bac rempli de glace est noyée une construction en verre constituée par un tube ouvert enveloppé d'un autre

LE FROID

tube plus grand qui se rétrécit à la base pour former une courbure terminée par une partie capillaire. Le tube de grand diamètre est rempli d'eau et le tube recourbé plein de mercure. Si on verse un liquide très volatil dans le tube ouvert,

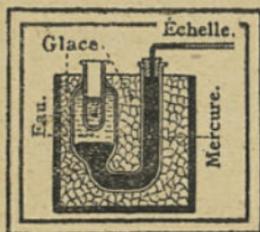


Fig. 3. — Calorimètre.

du chlorure de méthyle, par exemple, l'évaporation de ce liquide empruntant de la chaleur à l'eau extérieure déterminera la formation d'une enveloppe de glace autour du tube ouvert. Comme l'eau augmente de volume en se solidifiant, elle exercera une pression sur la surface du mercure en contact avec elle et le mercure progressera dans le tube capillaire convenablement gradué. On connaîtra ainsi la quantité de chaleur absorbée par le chlorure de méthyle pendant son évaporation, c'est-à-dire le nombre de calories.

Dans l'industrie frigorifique, où l'on considère les *quantités de froid*, on donne à l'unité le nom de *frigorie*. La frigorie représente donc la quantité de froid fournie à un kilogramme d'eau (ou la quantité de chaleur enlevée) pour abaisser sa température de un degré. La frigorie correspond ainsi à la *grande calorie*.

LE ZÉRO ABSOLU. Les progrès récents de la physique ont démontré qu'il n'y a pas de température si haute qui ne puisse être dépassée.

Industriellement, on peut produire des températures de plusieurs milliers de degrés : 1 755° pour la fusion du platine, 3 200° pour la volatilisation (sans fusion) du tungstène dont sont faits les filaments de nos lampes à incandescence, 4 400° pour le charbon des lampes à arc. C'est l'arc élec-

LA CHALEUR ET LE FROID

trique qui nous fournit ces températures métallurgiques.

Mais le monde stellaire en présente de bien plus élevées. Le soleil, qui est une étoile en voie de refroidissement, a une température de 5 000 à 6 000°; on attribue 20 000° à l'étoile Véga, de la Lyre, Ce sont là, d'ailleurs, des températures superficielles; qui nous dira jamais celles qui règnent à l'intérieur de ces astres?

Par contre, si on veut descendre l'échelle des températures, on est arrêté par un minimum infranchissable que l'on appelle le *zéro absolu*, situé à 273° au-dessous du zéro du thermomètre. Pourquoi ce chiffre, qui est devenu, dans la science du froid, un chiffre fatidique?

Les thermomètres ordinaires étant constitués par des liquides ne peuvent fournir d'indications relatives aux basses températures que jusqu'à la limite de congélation des liquides employés. Les gaz sont plus résistants au froid; aussi les physiciens ont-ils eu recours à l'un d'eux pour les aider dans leurs recherches.

Si on enferme un gaz à la pression atmosphérique dans un récipient étanche et que l'on élève sa température de un degré, on constate que sa pression intérieure a augmenté de $\frac{1}{273}$ de sa pression initiale. Inversement, si on diminue sa température de un degré, la pression ne sera plus que des $\frac{272}{273}$ de ce qu'elle était à la température normale.

Si on prend comme point de départ la température de la glace fondante, c'est-à-dire le zéro du thermomètre ordinaire, on constate une diminution de pression de $\frac{1}{273}$ par degré de température descendante. De là, à conclure qu'à -273° il n'y a plus de pression, nous paraît paradoxal, car il est impossible à notre esprit d'admettre qu'un gaz ne possède plus aucune des propriétés physiques que nous lui connaissons. Cependant, la chose est admise théoriquement, et les thermomètres à hydrogène sont basés sur ce principe; le

LE FROID

degré — 273 au-dessous du zéro normal est appelé le *zéro absolu*.

Il est fort probable que jamais l'homme ne parviendra à réaliser une température aussi basse caractérisée par le repos complet des atomes; il s'en rapproche cependant jusqu'à moins d'un degré, ainsi que nous le verrons dans un prochain chapitre.

FUSION ET SOLIDIFICATION. *▯ ▯* Plaçons un morceau de glace dans une casserole sur un foyer. Elle se transforme en eau. Un thermomètre plongé dans cette eau indique zéro degré, et le niveau du mercure ne variera pas pendant toute la durée de la fusion, quelle que soit la chaleur dégagée par le foyer.

Presque tous les corps obéissent à cette loi de la fusion. Si nous opérons sur de la naphthaline, nous constaterons que le thermomètre marque 80° depuis l'apparition des premières gouttes de liquide jusqu'à la fin de l'opération. Toute la chaleur fournie par le foyer, en admettant qu'il n'existe aucune perte extérieure, est donc entièrement absorbée par le corps solide pour l'amener à l'état liquide. *La fusion absorbe donc de la chaleur.*

La température de fusion varie d'un corps à un autre, mais elle est toujours la même, pour un même corps, à la pression atmosphérique.

Ajoutons que presque tous les corps augmentent de volume en passant de l'état solide à l'état liquide; l'eau, le bismuth, l'antimoine, l'argent et la fonte, seuls, font exception à cette règle.

Inversement, si un corps passe de l'état liquide à l'état solide, il diminue de volume (exception faite pour ceux que nous venons de citer) et il perd de la chaleur. *La solidification est donc une source de froid.*

LA CHALEUR ET LE FROID

LA VAPORISATION. ¶ ¶ Nous devons rappeler maintenant quelques principes physiques dont la connaissance est indispensable pour bien comprendre les phénomènes qui figurent à la base de la production du froid.

Si, dans une chambre barométrique (partie du tube dans laquelle le vide a été produit par la descente de la colonne de mercure) on introduit, à l'aide d'une pipette courbe, quelques gouttes d'un liquide volatil, on remarque aussitôt que la colonne de mercure descend. Et on n'aperçoit bientôt plus aucune trace de ce liquide, qui s'est vaporisé.

On peut continuer à envoyer du liquide, mais bientôt la colonne de mercure cesse de descendre. On aperçoit alors, sur le mercure, une certaine quantité de liquide qui ne s'est pas vaporisée. On dit alors que la *vapeur* contenue dans la chambre barométrique est *saturée*.

Mais, si on soulève le tube, le niveau du mercure baisse de nouveau et la totalité du liquide se transforme en vapeur. On peut faire réapparaître du liquide en abaissant le tube.

La vapeur saturée exerce donc une pression sur la colonne de mercure; cette pression dépend de la nature du liquide et de la température. Il existe, pour tous les liquides, une pression maximum de vaporisation qui varie avec la température. Ainsi, à 20°, la pression maximum de la vapeur d'eau est de 17 millimètres; à 50°, elle est de 92 millimètres; de 760 millimètres, ou une atmosphère, à 100°; de 16 atmosphères à 200°; de 200 atmosphères à 365°. Cette dernière température est dite *température critique de vaporisation* de l'eau; c'est la limite extrême à laquelle il soit possible de conserver de l'eau à l'état liquide.

Dans une enveloppe contenant un gaz avant l'introduction du liquide, la vaporisation de celui-ci s'effectue dans les mêmes conditions que dans le vide; mais la formation des vapeurs est d'autant plus ralentie que la pression du gaz

LE FROID

est plus élevée. Lorsque la vaporisation s'effectue dans de telles conditions on lui donne le nom d'*évaporation*. C'est d'ailleurs le phénomène qui se reproduit chaque jour sous nos yeux, dans l'atmosphère. Celle-ci n'étant pas une enceinte limitée, l'évaporation du liquide se poursuit jusqu'à sa disparition totale. Sur la surface de la mer, sur celle des lacs et des étangs, les apports dus à la condensation remplacent le liquide évaporé. L'évaporation totale ne peut donc se produire comme se réaliserait celle de l'eau contenue dans une assiette.

La vitesse d'évaporation dépend de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, et surtout de la température du liquide. Si on élève progressivement cette température, le liquide ne tarde pas à donner naissance à de grosses bulles qui agitent fortement sa surface. On dit qu'il entre en *ébullition*.

A la pression atmosphérique, la température d'ébullition des liquides varie avec chacun d'eux. Elle est de -35° pour l'ammoniaque, de $+35,5^{\circ}$ pour l'éther sulfurique, de $+48^{\circ}$ pour le sulfure de carbone, de $+78^{\circ}$ pour l'alcool, de $+100^{\circ}$ pour l'eau, de $+357^{\circ}$ pour le mercure.

Mais, ne l'oublions pas, toutes les calories fournies au liquide pour provoquer l'ébullition sont entièrement utilisées au maintien du phénomène; la température ne varie à aucun moment pendant toute sa durée. On donne le nom de *chaleur de vaporisation* à cette quantité de chaleur. Elle est de 537 calories pour l'eau, de 259 calories pour l'ammoniaque, de 208 pour l'alcool, de 77 pour le mercure, de 61 pour le chloroforme, à la température ordinaire.

La transformation d'un liquide en vapeur, quel que soit le mode opératoire employé, et quelle que soit la température, absorbe donc de la chaleur. On se rafraîchit les mains en été en les plongeant dans l'eau et en les laissant ensuite sécher

LA CHALEUR ET LE FROID

à l'air libre. On fabrique de la glace, comme nous le verrons plus loin, en provoquant l'évaporation rapide de l'eau dans le vide.

LA LIQUÉFACTION. // Tout ce que nous venons de dire était nécessaire pour comprendre les conséquences de la liquéfaction, qui est un phénomène inverse de la vaporisation.

Si une vapeur — ou un gaz — sont au-dessus de leur température de vaporisation, il est impossible de les liquéfier. Ainsi, quelle que soit la pression mise en œuvre, on ne parviendra jamais à liquéfier de la vapeur d'eau à 400° , du gaz carbonique à 32° (température critique, 31°). Ainsi s'expliquent les difficultés rencontrées pour obtenir la liquéfaction des gaz de l'atmosphère : oxygène, dont la température critique est de $-118^{\circ},82$; azote, $-147^{\circ},13$; hydrogène, $-239^{\circ},91$; hélium, $-267^{\circ},84$. Nous reviendrons en détail sur ces questions dans notre chapitre *La Science du Froid*.

Ajoutons, sans nous y arrêter, que cette liquéfaction est obtenue par le refroidissement du gaz au-dessous de sa température critique et par la compression.

LES SOURCES DE FROID. // La source de froid la plus communément répandue est la glace. Si on met un morceau de glace dans une boisson, il fond en empruntant au liquide lui-même la chaleur qui lui est nécessaire. Le liquide se refroidit. Dans les glaciers domestiques, la glace est utilisée pour refroidir l'air ambiant.

Souvent, un mélange de deux corps différents abaisse la température de fusion de chacun d'eux, pris isolément, dans de grandes proportions. Ainsi le sel marin, mélangé à de la glace pilée, donne une température de fusion de plusieurs

LE FROID

degrés au-dessous de zéro. En mélangeant divers corps, on constitue des mélanges dits réfrigérants employés dans l'industrie du froid : sel ammoniac ou chlorure de calcium et glace pilée, sulfate de soude et acide chlorhydrique, etc. Mais ces mélanges ne permettent pas de descendre au-dessous de -50° .

La simple vaporisation de l'eau donne du froid : les alcazars sont basés sur ce principe. Si l'évaporation a lieu dans le vide, l'eau bout à 0° , et se transforme en glace par suite de la rapidité de l'évaporation. Le chlorure de méthyle, qui bout à -20° , est utilisé en petite chirurgie pour l'anesthésie locale en projetant le liquide sur la partie à traiter ; l'évaporation rapide provoque un froid intense, insensibilisateur.

Nous savons également que si la compression d'un gaz se produit avec accompagnement de chaleur, la détente lui enlève cette chaleur, et à la fin de l'opération on le retrouve à la température ambiante. Mais, si on laisse refroidir le gaz comprimé, sa détente produira nécessairement du froid. C'est par compressions, refroidissements et détentes successifs que l'on est parvenu à liquéfier l'air.

ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR. *▀ ▀*

Il existe une relation étroite entre tout travail mécanique et la production de la chaleur. Quel que soit ce travail, il y a toujours dégagement de chaleur et, inversement, la chaleur peut être transformée en travail mécanique. Le frottement, le choc, la compression produisent de la chaleur.

Ainsi le choc d'une balle de plomb contre une plaque d'acier dégage assez de chaleur pour fondre la balle si la vitesse est suffisante. Dans le briquet à air, la chaleur de compression enflamme l'amadou. Dans toutes les machines rotatives et autres, il faut lubrifier les frottements pour combattre les effets de la chaleur.

LA CHALEUR ET LE FROID

Inversement, si on brûle du charbon dans un foyer pour chauffer de l'eau, on transforme cette eau en vapeur et la force élastique de cette vapeur peut actionner une machine.

La relation entre le travail mécanique et la chaleur produite — et inversement — a été découverte en 1842 par deux physiciens, Meyer et Joule.

L'unité calorifique est la calorie; celle du travail mécanique est le kilogrammètre, qui représente le travail à effectuer pour élever un poids d'un kilogramme à un mètre de hauteur. Si ce travail s'effectue en une seconde, l'unité devient le kilogrammètre-seconde.

Dans la pratique, on a admis, comme unité de puissance mécanique usuelle, le cheval-vapeur, ou plus simplement le cheval, qui équivaut à 75 kilogrammètres par seconde. L'industrie électrique a fait employer comme unité de puissance le *kilowatt* : un cheval-vapeur équivaut à 736 watts.

Supposons un ouvrier tournant, sous un outil, une meule enfermée dans une cuve contenant un mètre cube d'eau. Le frottement des deux corps au sein du liquide dégagera de la chaleur. A un moment donné, la chaleur ainsi produite aura élevé la température de l'eau d'un degré. Le travail mécanique aura donc produit 1000 grandes calories. Avec un dynamomètre, on peut mesurer la quantité de travail fournie par l'ouvrier; on trouvera 425 kilogrammètres par calorie. C'est là l'équivalent mécanique de la chaleur.



CHAPITRE II

LE FROID DANS LA NATURE

Le froid au début de l'ère quaternaire. || La neige. || Les glaciers. || Les glaces polaires. || La température de l'atmosphère. || La grêle. || Les hivers rigoureux. || Action du froid sur les organismes vivants. || Le froid en médecine. || Effets physiologiques du froid sur l'homme.

LE FROID AU DÉBUT DE L'ÈRE QUATERNAIRE.
L'ère quaternaire, ou ère moderne, de la formation de la terre a été divisée en deux périodes par les géologues : la période *pléistocène*, qui est la plus ancienne, et la période *holocène*, à laquelle nous appartenons.

A la fin de l'ère précédente, l'ère tertiaire, la terre s'était assez refroidie pour que les montagnes, plus élevées que celles de notre époque, se couvrissent de glaciers. Peu à peu, ces glaciers descendirent vers les plaines et, au début de la période pléistocène, ils avaient pris une importance considérable.

La faune qui couvrait les régions tempérées avait d'abord appartenu à la *faune chaude*, caractérisée par la présence de l'hippopotame ; elle disparut ensuite pour faire place à une *faune froide*, avec le mammouth, dont la toison longue et épaisse précise nettement la rigueur du climat. Le renne vécut en France à cette époque.

Par l'étude des roches transportées par les glaciers, on a reconnu que le phénomène glaciaire s'était renouvelé à trois ou quatre époques différentes séparées par des périodes dites *interglaciaires*. Des hypothèses astronomiques ont fait place

LE FROID DANS LA NATURE

à des certitudes tirées de la météorologie pour expliquer ces faits. M. de Lapparent a fait remarquer que ce ne sont pas les grands froids qui ont pu donner naissance aux glaciers, mais les condensations atmosphériques beaucoup plus intenses à ces époques que de nos jours, puisque les montagnes, non désagrégées par les phénomènes météorologiques, s'élevaient beaucoup plus haut dans l'atmosphère.

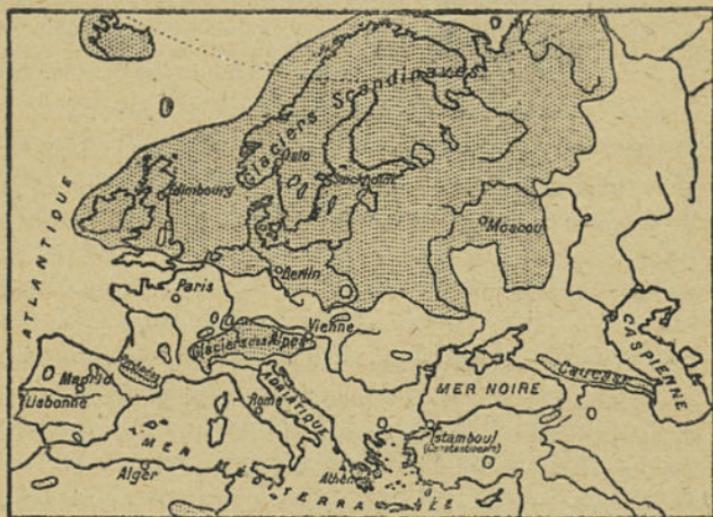


Fig. 4. — Limite extrême des glaciers sur le continent européen.

Une puissante évaporation due à l'action des rayons solaires provoquait une condensation équivalente de la vapeur d'eau dans les régions montagneuses où s'accumulaient les neiges créatrices des glaciers alors que la pluie inondait les plaines.

Ainsi s'explique le fait que, pendant la période pléistocène, les glaciers aient pris une importance considérable. Un immense manteau de glace recouvrait les trois quarts de la

LE FROID

Russie actuelle, la moitié de l'Allemagne, la Hollande, le Danemark, la presque totalité de la Grande Bretagne, l'Irlande, la Suède, la Norvège. Dans les Alpes, le glacier du Rhône ensevelissait une immense étendue de terres. Les Vosges, les Pyrénées, l'Himalaya et toutes les montagnes élevées d'Afrique et d'Amérique étaient le centre de glaciers séparés, d'allure analogue à nos glaciers actuels, mais beaucoup plus étendus.

Portés par cette formidable carapace, des blocs de rochers détachés des montagnes, atteignant parfois un volume de mille mètres cubes, venaient s'échouer à des centaines de kilomètres dans les plaines. Ces blocs ont été appelés erratiques, et c'est grâce à leur présence qu'une carte de la limite des glaciers a pu être établie (fig. 4).

Les calottes glaciaires des régions polaires représentent ce qui reste des périodes glaciaires. On assure même que l'épaisseur des glaces qui les recouvre n'est possible que par la persistance des formations originelles.

LA NEIGE. ◊ ◊ Sous l'action des rayons solaires, toutes les eaux superficielles, celles des fleuves, des lacs, des océans, particulièrement dans les régions tropicales, se vaporisent et s'élèvent dans l'atmosphère. Ces vapeurs nous apparaissent sous la forme de nuages qui ne sont qu'un amas de très fines gouttelettes d'eau. Lorsque, au cours de leur voyage au-dessus des continents, ces nuages rencontrent des régions atmosphériques où la température est à zéro degré, leurs gouttelettes se transforment en neige.

Alors que, dans les plaines, la neige fond rapidement parce que la température ne tarde pas à se relever, sauf dans les cas exceptionnels d'hivers longs et rigoureux, elles s'accumulent au contraire sur les montagnes. Les sommets élevés des Alpes, des Pyrénées, conservent même leur blanche parure

LE FROID DANS LA NATURE

pendant toute l'année parce que la température s'y maintient toujours au-dessous de zéro degré. Ce sont les neiges perpétuelles.

La courbe de hauteur des neiges perpétuelles n'est pas la même pour toutes les montagnes du globe. Elle est de 2 800 mètres en Suisse, de 3 500 à 4 500 mètres au Caucase, de 4 700 à 5 000 mètres sous les tropiques. Dans les régions polaires, elle se rencontre au niveau du sol, ce qui explique la persistance des calottes glaciaires terrestres au pôle Nord et au pôle Sud.

L'accumulation des neiges sur les sommets ne peut se poursuivre que jusqu'à une certaine limite. A un moment donné, quand l'amas est trop considérable, des paquets se détachent, dévalent les pentes en grossissant par suite de l'apport des neiges rencontrées et entraînant des quartiers de rochers. Ce sont les avalanches, si redoutables pour les villages établis dans les vallées proches.

Souvent, l'accumulation des neiges s'effectue en pleine montagne, entre des sommets, dans des cirques. Pendant la chute, chaque flocon se présente sous la forme de cristaux diversement assemblés, en étoile. Ce sont là des constructions extrêmement curieuses. Mais, sous l'action des rayons solaires, même aux hautes altitudes, un commencement de fusion s'opère; il ne reste alors, de la belle étoile cristalline, qu'un léger noyau que le vent chasse, comme une poussière, dans les cirques avoisinants toujours abrités. C'est là que l'accumulation se poursuit sans arrêt et c'est dans ces cirques que prennent naissance les glaciers.

Les noyaux, fortement tassés, s'agglomèrent, se soudent, et la masse prend de plus en plus de consistance, malgré les bulles d'air qu'elle a emprisonnées au cours de sa formation.

C'est le *névé*.

LE FROID

LES GLACIERS. ▯ ▯ Sous l'action de la pression exercée par les apports successifs de neige, les couches inférieures du névé se tassent de plus en plus et se transforment finalement en glace. Le cirque ne tarde pas à déborder et la masse, toujours sous l'action de la pression, se trouve sollicitée vers la plaine en suivant les pentes de la montagne. La descente n'est pas rapide; cependant, à un moment donné, le glacier aboutit à une altitude où la température est supérieure à zéro degré. La fusion commence et les torrents prennent naissance. C'est ainsi que l'appoint à peu près régulier fourni par les neiges au glacier retourne au bassin fluvial auquel il appartient, dans des conditions identiques à ce qui se passe en plaine, avec cette différence, toutefois, que la pluie, à peine tombée sur le sol, est reprise par la circulation générale, tandis que la neige effectue un stade de transformation qui dure parfois de longs siècles. Le glacier remplit donc les fonctions de régulateur hydrographique dans les régions montagneuses.

La vitesse de cheminement des glaciers n'est pas uniforme. Sur les rives, les glaces subissent un retard dû à leur frottement sur les rochers, tandis qu'au milieu du glacier la vitesse atteint son maximum. En 1788, les guides de Saussure avaient abandonné une échelle au pied de l'Aiguille Noire; on en retrouva les débris cinquante-sept ans plus tard, à quatre kilomètres et demi en aval. La vitesse superficielle des glaciers a fait l'objet de mesures précises, notamment en Suisse où il a été observé qu'elle peut varier de 2 centimètres à 1 m. 25 par vingt-quatre heures.

En dévalant une pente, la glace produit un effet de désagrégation des roches beaucoup plus intense que l'eau de pluie, qui n'a d'action que sur les menus fragments.

Les avalanches, l'action des gelées, détachent, des flancs des montagnes, des blocs qui tombent sur les glaciers, lesquels

LE FROID DANS LA NATURE

les déposent peu à peu le long de leurs rives. Ces dépôts constituent les *moraines*. Lorsque deux glaciers se rencontrent ils se fondent en un seul, mais les deux moraines riveraines qui se sont rencontrées persistent et les dépôts dont elles sont formées continuent à cheminer au milieu du nouveau glacier.

Au moment de la fonte, les moraines et les matériaux arrachés au lit du glacier se rassemblent en une autre moraine, dite frontale, constituée souvent par des blocs énormes qu'un torrent, quelque violent qu'il soit, serait incapable de déplacer. La présence de ces blocs indique la fin de la période de cheminement du glacier. C'est donc par la reconnaissance des moraines frontales qu'il a été possible de reconstituer la limite extrême des périodes glaciaires, les rochers arrachés aux montagnes ayant été véhiculés sur des sols d'une nature très différente. Il serait impossible d'expliquer autrement la présence de ces amas.

Les glaciers actuels ne descendent pas à une altitude invariable. L'apport plus ou moins abondant des neiges et la température modifient leur point d'arrêt. Il n'est pas rare de les voir pénétrer dans les terres de culture, qu'ils labourent impitoyablement. En raison de la lenteur de leur mouvement de progression on observe parfois un allongement des glaciers vers la plaine, par des années très chaudes et très sèches. L'afflux de glace est dû, non à l'apport en neige de l'hiver précédent, mais à celui de plusieurs hivers antérieurs.

Ne quittons pas cet important sujet des glaciers sans signaler un curieux — et dangereux — phénomène auquel ils donnent naissance. Nous voulons parler des *lacs glaciaires*.

Des crevasses se forment souvent dans les glaciers, principalement aux endroits où la pente devient plus accentuée. La cavité ainsi formée, si elle n'est pas trop importante, se remplit de neige qui, à la longue, forme soudure. Quelque-

LE FROID.

fois la crevasse s'élargit, puis se remplit des eaux de fusion, qui rongent peu à peu les murs de glace qui les emprisonnent. Au cours de l'hiver, l'eau de ce lac en formation se couvre de glace, puis de neige, et le lac disparaît fermé par un solide couvercle. Rien ne révèle sa présence à l'intérieur du glacier. Mais l'eau ne gèle pas; elle agrandit peu à peu son domaine au détriment de ses parois et, à un moment donné, la fragilité du mur et la pression aidant, la poche se vide d'un seul coup dans la vallée.

La catastrophe de Saint-Gervais (nuit du 11 au 12 juillet 1892) n'eut pas d'autre origine. Un lac intraglaciaire du glacier de Tête Rousse, situé à l'altitude de 3 130 mètres, se vida d'un seul coup dans la vallée de Saint-Gervais, engloutissant les hameaux de Bionnay, du Fayet et les Bains de Saint-Gervais. 200 000 mètres cubes d'eau avaient été libérés en une seule masse, entraînant dans leur chute un million de mètres cubes de boues et de rochers.

En 1901, on remarqua la formation d'une nouvelle crevasse dans le même glacier. Elle ne tarda pas à se remplir d'eau, rapidement gelée à sa surface. C'était un nouveau lac intraglaciaire. Les forestiers creusèrent alors une galerie et vidèrent cette nouvelle poche.

En Suisse, le glacier de la Tête Sèche (Valais) présente un phénomène analogue, mais sa formation est différente. Le glacier est un affluent de celui d'Otemma, dont il est séparé par une moraine. On s'était aperçu, pendant l'été, que le niveau des deux glaciers s'était abaissé, mais la moraine avait protégé les glaces qui lui servaient de lit. Les eaux superficielles s'accumulèrent derrière cette moraine en formant un lac qui atteignait 30 mètres de profondeur et contenait un million de mètres cubes d'eau. A la suite d'une débâcle, l'administration suisse, craignant l'ouverture d'une crevasse dans le barrage, fit une tranchée à travers la

LE FROID DANS LA NATURE

moraine pour vider lentement le lac et l'empêcher de se reformer. Ces lacs glaciaires sont toujours étroitement surveillés... quand on connaît leur existence.

LES GLACES POLAIRES. ∅ ∅ Plus on se rapproche des pôles, plus la hauteur de formation des glaciers diminue et, à une certaine latitude, la surface de la mer elle-même est gelée. Le Groenland disparaît sous la calotte glaciaire boréale.

Au pôle Nord, les glaciers du Groenland, du Nord de l'Amérique, de la Sibérie se déversent dans la mer sur un front qui atteint parfois une immense largeur. Le glacier de Humboldt, au Nord-Ouest du Groenland, a 111 kilomètres de front et 90 mètres de hauteur. L'extrémité de ces glaciers est soutenue pendant quelque temps par la mer elle-même sur laquelle elle avance en flottant. Mais bientôt elle se brise en blocs énormes qui deviennent des *icebergs* et partent à la dérive entraînés par les courants marins. C'est au printemps que ces phénomènes se produisent. Les icebergs provenant du Groenland descendent alors vers Terre-Neuve en coupant la route des lignes de navigation entre l'Europe et l'Amérique. Ce sont de dangereux obstacles pour les navires. On se souvient encore de la perte du *Titanic* dans les parages de Terre-Neuve, due au choc du paquebot contre un iceberg. Certains icebergs ont des hauteurs de 120 à 150 mètres au-dessus de l'eau. Si on admet le rapport du septième, la hauteur totale en serait de 1 000 mètres. En descendant vers le sud, les icebergs fondent lentement; il arrive alors un moment où l'équilibre est rompu entre la partie immergée et la partie aérienne; l'iceberg bascule en produisant des remous très dangereux pour les bateaux de pêche qui se trouvent à proximité et qui, surpris, ne peuvent les éviter. Arrivés au 41° degré de latitude nord, les icebergs rencontrent le Gulf

LE FROID

Stream, qui met fin à leur existence vagabonde par la fusion.

Les glaces de mer présentent un aspect très différent des icebergs. Elles se forment le long des côtes lorsque la température descend à $-2^{\circ},5$, et leur épaisseur, qui augmente avec le froid, dépasse rarement 5 à 6 mètres. Ce sont les banquises, qui constituent ce que l'on nomme des champs de glace.

Mais la surface de la banquise n'est pas unie comme celle d'un lac gelé. Il se produit, en effet, au cours de la congélation, des pressions telles que l'ensemble éclate avec un bruit formidable, se crevasse, provoquant le soulèvement d'énormes masses qui s'enchevêtrent, se superposent. Malheur aux navires pris dans ces glaces ! Tous les récits des expéditions polaires, récits illustrés par le cinématographe, nous ont donné un aperçu tragique de la situation des explorateurs dans ces régions.

LA TEMPÉRATURE DE L'ATMOSPHÈRE. ■ ■ ■
Chacun sait que, plus on s'élève dans l'atmosphère, plus la température s'abaisse. On pourrait croire le contraire, puisque, en s'élevant, on se rapproche du soleil. C'est que l'air atmosphérique, à une certaine hauteur, est beaucoup plus pur qu'au voisinage du sol. Il ne contient plus ni poussières, ni vapeur d'eau qui absorbent la chaleur solaire, la concentrent sur le sol, lequel, lui-même très échauffé, rayonne ses calories dans la basse atmosphère. De plus, comme les gaz atmosphériques sont fortement raréfiés à une certaine hauteur, les gaz chauds venant de la surface s'y détendent et, comme nous le verrons plus loin, se refroidissent.

On admet que, en moyenne, l'air atmosphérique se refroidit d'un degré par 150 mètres de hauteur. Un ballon-sonde, parti du sol sous une température de $+ 25^{\circ}$, a rencontré la température de zéro degré vers 4 500 mètres, $- 40^{\circ}$ à 10 000 mètres et $- 65^{\circ}$ à 12 000 mètres. A cette hauteur, on

LE FROID DANS LA NATURE

quitte la zone atmosphérique à laquelle les savants ont donné le nom de *Troposphère* pour pénétrer dans la *Stratosphère*. On constate alors, dans la zone mitoyenne, que la température cesse de descendre pour se maintenir à une valeur sensiblement égale entre 10 000 et 15 000 mètres. Puis elle décroît de nouveau, mais beaucoup moins rapidement que dans la Troposphère. Ainsi le ballon-sonde lancé à Pavie, qui est parvenu jusqu'à la hauteur formidable de 37 770 mètres, a révélé une température de -75° .

Observons également que la haute atmosphère n'est pas à une température uniforme, quelle que soit la latitude. Ainsi, dans l'Amérique du Nord, on a trouvé -80° à 15 000 mètres, -84° à 19 800 mètres et, dans l'Afrique orientale, $-90^{\circ},9$ à 16 500 mètres.

Ce sont là des minima reconnus; rien n'indique que des températures plus basses n'existent pas. M. A. Viger dans son remarquable ouvrage *l'Atmosphère* (Bibliothèque des Merveilles) estime que, dans la très haute atmosphère, à l'origine de la couche où règne l'hydrogène, le thermomètre doit descendre vers -100° . Plus haut, au fur et à mesure de la dilution des gaz extra-légers, la température doit progressivement descendre jusqu'au zéro absolu (-273°) qui serait celle des espaces intersidéraux.

LA GRÊLE. ¶ ¶ Nous avons parlé de la transformation de la neige en glace en passant par un état intermédiaire qui constitue le névé. Dans l'atmosphère, il se produit, sous la forme de grêle, un phénomène du même genre, sans que d'ailleurs on puisse lui attribuer une même formation. Il est vrai que les origines des phénomènes atmosphériques ne sont pas encore bien connues.

La grêle prend naissance, croit-on, dans les *cumulonimbus*, gros nuages sombres qui constituent de formi-

LE FROID

dables condensateurs d'électricité atmosphérique. Comme tous les nuages, ils sont constitués par des gouttelettes de pluie qui se maintiendraient sous cette forme liquide dans des régions où la température est au-dessous de 0° par la *surfusion*.

Supposons maintenant qu'une aiguille de glace, échappée d'un *cirrus*, vienne plonger dans ce brouillard extrêmement dense. Aussitôt, la gouttelette touchée se transformera en glace et entraînera *ipso facto* la congélation de toutes les gouttelettes du nuage.

C'est la chute brutale, rapide, dévastatrice, sur le sol, de globules solides qui augmentent sans cesse de diamètre par la condensation, puis par la congélation de la vapeur d'eau qu'ils rencontrent. Le grésil qui cingle la figure devient une bille de glace, une masse même dont les dimensions peuvent atteindre celle d'un œuf, d'une orange, voire même prendre la forme de blocs d'un poids considérable. Au cours de certains orages, des blocs pesant plus d'un kilogramme sont tombés sur le sol.

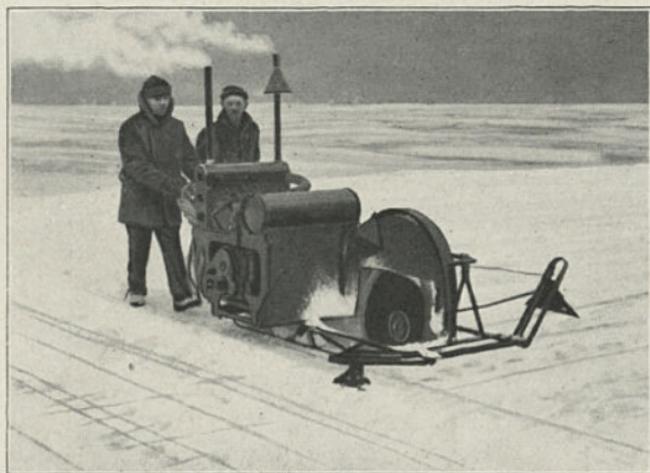
LES HIVERS RIGoureux. // // Il ne paraît pas qu'une loi météorologique impose à nos climats une règle quelconque à laquelle obéiraient les variations de température des hivers. Capricieusement, les hivers très froids alternent avec les hivers très doux.

Rappelons donc, sans plus, la chronologie des hivers rigoureux. En l'an 1011, le Bosphore fut complètement gelé, ainsi qu'une partie du Nil; en 1074, tous les fleuves européens furent gelés. L'hiver de 1234 gela la lagune de Venise; celui de 1323 couvrit de glace la Tamise, la mer du Nord et la Baltique; les hivers de 1344, 1369, 1399 furent les plus rigoureux de leur siècle. Au siècle suivant, ceux de 1434, 1492, 1493 ont laissé le souvenir d'une rigueur exceptionnelle; le

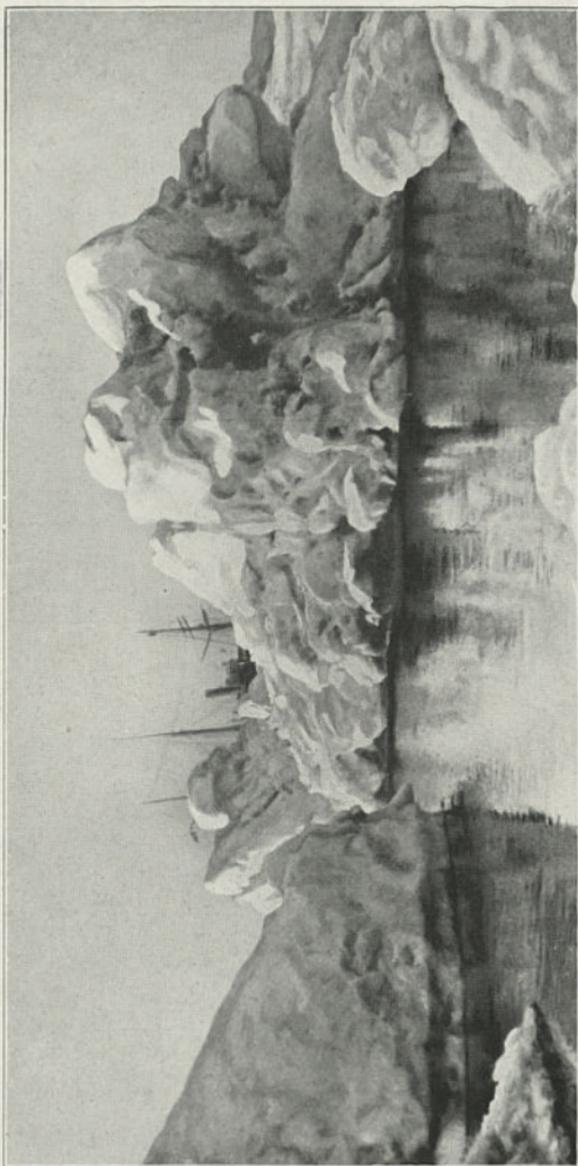


Cl. Wide World.

RÉCOLTE DE LA GLACE NATURELLE SUR LE LAC DE GREENWOOD
(ÉTAT DE NEW-YORK).



TRAINEAU ROTTIFA DÉCOUPANT LA GLACE SUR LE LAC DE GREENWOOD
(ÉTAT DE NEW YORK).



LE « MAUD » D'AMUNDSEN EST BLOQUÉ PAR LES GLACES AU COURS DE L'EXPÉDITION AU POLE SUD EN 1913.

LE FROID DANS LA NATURE

port de Gênes fut gelé en 1493. Citons ensuite ceux de 1503, 1507, 1594; ce dernier recouvrit de glace le port de Marseille.

Durant l'hiver historique de 1658, Gustave-Adolphe traversa à pied la mer Baltique sur la glace avec toute son armée. En 1683, la Seine, la Tamise et même la mer Adriatique furent gelées.

Des détails plus précis nous sont fournis par les chroniqueurs sur les hivers des siècles qui suivent. Le lundi 7 janvier 1709, dit l'un d'eux, commença une gelée qui fut la plus rude et la plus difficile à souffrir. Elle dura jusqu'au 3 ou 4 février. Comme la neige était très fine, le vent la chassa dans les bas-fonds et découvrit la campagne; les blés furent presque tous gelés et une famine horrible en fut la conséquence. Du 10 au 21 janvier, la température se maintint aux environs de -20° à Paris, avec des minima de -23° les 13 et 14 janvier.

En 1740, la Seine gela dans toute sa longueur. L'hiver de 1788-1789 peut être considéré comme le type de ce que l'on nomme familièrement un « long hiver » : 86 jours de gelée consécutifs avec un minimum de $-21^{\circ},8$ à Paris le 31 décembre. Celui de 1794-1795 fut également très long : 64 jours de gelée à Paris, avec un minimum de $-23^{\circ},5$. C'est au cours de cet hiver que la cavalerie de Pichegru s'empara de la flotte hollandaise, bloquée par les glaces dans le Zuiderzée.

Plusieurs hivers très rigoureux sont à signaler au XIX^e siècle : celui de 1829-1830 dura de novembre à février et la Seine fut gelée du 28 décembre au 26 janvier et du 5 au 10 février.

En 1871, les minima s'abaissèrent à -12° à Paris, -16° à Montpellier, -23° à Périgueux et, au mois de décembre de la même année, on enregistra $-23^{\circ},7$ à Paris. L'hiver de 1837-1838 avait été aussi très long, avec 77 jours de gelée

LE FROID

et une température minima de -19° . La Seine fut gelée du 17 janvier au 8 février. Celui de 1854-1855 fut également très rigoureux, ainsi que celui de 1859-1860, avec $-21^{\circ},7$ le 20 décembre 1859 et celui de 1879-80 particulièrement pénible au cours du mois de janvier.

L'hiver de 1928-1929 a été jusqu'ici le plus rigoureux du xx^e siècle. Les températures les plus basses observées dans la région parisienne furent de $-11^{\circ},6$ le 19 décembre et $-14^{\circ},8$ le 13 février. Dans le reste de la France, des températures de -20° et même -30° ont été observées suivant les régions, et dans le Nord de l'Europe le thermomètre est descendu au-dessous de -40° .

ACTION DU FROID SUR LES ORGANISMES VIVANTS.

▯ ▯ Les dates des grands hivers, hivers rigoureux et de longue durée, s'inscrivent sur le tronc des arbres. Au moment de la coupe, on peut remarquer, par l'examen des couches ligneuses concentriques annuelles, que les années froides n'ont pas permis à la couche correspondante de conserver sa vitalité. Elle apparaît désagrégée, mais l'arbre a continué à vivre et la couche suivante est normale.

Les arbres des régions chaudes résistent peu aux grands froids. Dans les régions tempérées, il arrive que le tronc éclate, avec un bruit formidable, sous l'action de la glace qui s'est formée à l'intérieur. L'hiver de 1879-1880 fit ainsi disparaître une grande quantité de tilleuls centenaires.

Par contre, des expériences de laboratoire ont démontré que les graines sèches résistent parfaitement aux grands froids. Un séjour de quarante minutes à une température de -40° n'a eu aucune action sur les qualités germinatives de grains de blé. Des grains d'orge, d'avoine ont été soumis pendant une demi-heure à une température de -57° et pendant vingt minutes à -110° sans inconvénient. D'autres

LE FROID DANS LA NATURE

grains d'orge n'ont perdu aucune qualité germinative après un séjour de six heures à la température de l'air liquide (-193°). P. Becquerel a démontré que des graines soumises pendant cent trente heures à une température de -185° ne résistent pas si leur teneur en eau est supérieure à 12 p. 100.

Les animaux des régions polaires résistent parfaitement aux températures les plus basses de ces régions. On a relevé des différences de 50 degrés entre la température de leur corps et celle de l'air ambiant. Mais le système pileux change de couleur. Pendant l'hiver, la fourrure devient blanche pour reprendre ensuite sa teinte naturelle pendant l'été. M. Monvoisin cite le cas d'un chat noir oublié dans une cale à la température de -6° pendant trente-deux jours et qui en sortit avec une fourrure toute blanche.

On sait que certains animaux à sang chaud passent l'hiver dans un état voisin de la mort. D'autres supportent même la congélation totale et reviennent ensuite à la vie.

Soumis à la température de l'eau bouillante, la plupart des micro-organismes sont détruits; mais ils résistent généralement à l'action des plus grands froids. C'est ainsi que les neiges des régions polaires sont souvent teintées par des êtres vivants appartenant au groupe des Algues.

En réalité, le froid ne détruit pas les cellules vivantes; il ne fait qu'arrêter le développement des micro-organismes qu'elles contiennent, développement qui se réveille dès que la température redevient normale. C'est d'ailleurs sur ce fait qu'est basée la conservation des denrées alimentaires par le froid.

Ainsi, le bacille typhique conserve sa vitalité après un séjour de six mois à la température de l'air liquide; celui de la peste résiste pendant plusieurs mois à -30° ; celui du charbon a résisté pendant quinze jours à une température de -15° , mais il a été détruit au bout de douze jours à -24° .

LE FROID

On voit que tous les bacilles ne sont pas invulnérables au froid. Celui du choléra, par exemple, ne résiste que quelques heures à -10° et celui de la diphtérie pendant six semaines. Certains même, comme le méningocoque, sont rapidement détruits à 0° .

Dans la plupart des cas, les spores de moisissures, les levures cessent toute manifestation active dès que la température s'abaisse, mais elles reprennent leur vitalité peu après leur retour à une température normale. Pour les détruire, il faut les soumettre pendant un temps variable pour chacune d'elles à une très basse température.

L'action du froid sur les animaux vivants est d'ailleurs extrêmement curieuse. Des expériences effectuées par Raoul Pictet, Charles Richet, eurent, à l'époque où ils les firent connaître, un grand retentissement. Des poissons vivants, congelés à -15° , ont retrouvé la vie après décongélation lente. On utilise parfois ce procédé pour effectuer leur transport. Une chauve-souris, soumise à une température de -4° , est devenue dure comme du bois et s'est remise à voler après sa mort... apparente. Des chenilles, ayant supporté, pendant une semaine, une température de -42° , n'ont perdu, après décongélation, aucune de leurs facultés vitales. Les grenouilles sont dans le même cas. Des expériences analogues, effectuées sur certaines graines, n'ont pas nui à leurs qualités germinatives. Ces faits ne sont pas encore expliqués.

LE FROID EN MÉDECINE. *o o* Le chlorure d'éthyle pulvérisé et projeté sur l'épiderme produit un froid momentané qui suffit pour rendre insensible la place atteinte sur laquelle doit s'effectuer une légère opération. On peut même remplacer le chlorure d'éthyle par une simple application de glace pendant quelques minutes. Le froid produit également

LE FROID DANS LA NATURE

un effet astringent que l'on peut mettre à profit dans les cas d'hémorragie. Ainsi, une hémorragie pulmonaire peut être combattue en faisant avaler des morceaux de glace au malade; cette glace refroidissant le sang et les nerfs au cours de son passage dans l'œsophage et l'estomac, les vaisseaux du poumon se contractent. La clef que l'on place dans le dos des personnes atteintes de saignement de nez agit également par le froid.

La frigothérapie est une forme d'application du froid sur tout le corps dans certaines maladies; on la pratique par des enveloppements froids. Quelquefois, une vessie de glace est déposée sur la région du cœur, avec interposition de flanelle.

Dans les cas de surexcitation nerveuse, la glace est employée comme sédatif. Les convulsions, la méningite sont traitées par des applications de vessies de glace sur le front.

EFFETS PHYSIOLOGIQUES DU FROID SUR L'HOMME. // // Nous nous protégeons contre le froid par le chauffage des appartements et par le port de vêtements chauds.

Le froid diminue la vitalité et, par conséquent, la résistance de l'organisme aux maladies infectieuses. Il est donc nécessaire, par les grands froids, d'absorber des aliments hydrocarbonés et des graisses. Les exercices physiques sont également recommandés.

Une nourriture insuffisante, la fatigue, l'alcoolisme, prédisposent l'organisme au « coup de froid », qui se manifeste par des maux de tête, de l'oppression, de l'engourdissement dans les membres, une paresse musculaire qui provoque une difficulté de la parole. Peu à peu, les forces s'épuisent et l'affaissement se produit. Le sommeil gagne le malade, et s'il ne peut réagir, c'est la mort certaine.

CHAPITRE III

LA SCIENCE DU FROID

L'histoire chronologique de la liquéfaction des gaz. || L'air liquide.

LA science du froid n'est pas sortie, tout armée, du cerveau d'un Jupiter moderne. Un grand nombre de savants ont collaboré à sa venue au monde et à sa mise au point; il reste même encore un vaste champ à explorer par les chercheurs futurs.

Elle est née des recherches effectuées par les physiciens pour obtenir la liquéfaction des gaz, recherches dont l'origine remonte à la conception de Lavoisier sur les trois états des corps : liquide, solide, gazeux, accompagnée de cette divination que, par le froid, les gaz peuvent être amenés à l'état liquide.

C'est précisément la démonstration de cette théorie qui a conduit à la recherche des plus grands froids pour obtenir la confirmation du principe émis par Lavoisier.

L'HISTOIRE CHRONOLOGIQUE DE LA LIQUÉFAC-
TION DES GAZ. // // Cette histoire est celle des connais-
sances physiques que nous avons résumées dans notre pre-
mier chapitre.

Dès la fin du XVIII^e siècle, Monge liquéfia l'acide sulfu-
reux en le faisant passer dans un tube en U plongé dans un
mélange de glace et de sel. La réussite de cette expérience
si simple s'explique par ce fait que la force élastique du gaz
est incapable de s'opposer à la pression atmosphérique, puis-
qu'elle n'est que de neuf dixièmes d'atmosphère.

LA SCIENCE DU FROID

Guyton de Morveau réussit, par le même procédé, à liquéfier le gaz ammoniac; mais, comme la tension de vapeur de ce gaz ne se réduit à une atmosphère qu'à $-33^{\circ},5$, il fallut, au savant, utiliser un mélange réfrigérant autre que la glace et le sel; il employa un mélange de glace et de chlorure de calcium, qui permet d'atteindre une température de -50° .

Si un gaz peut être liquéfié à la pression atmosphérique en le refroidissant de manière à amener la valeur de sa tension à une atmosphère, le contraire doit être également exact, c'est-à-dire que si on augmente sa pression, on peut diminuer la tension de sa vapeur saturée jusqu'à ce que la liquéfaction ait lieu à la température ordinaire, à la condition, bien entendu, d'éliminer la chaleur de compression.

Vers 1792, Van Marum, pour vérifier l'exactitude de la loi de Mariotte sur le gaz ammoniac (1), avait introduit dans une éprouvette graduée une certaine quantité de ce gaz dont le volume pouvait être limité par du mercure.

Tout à coup, pendant que l'expérience se déroulait conformément au principe, le savant vit monter le mercure et le gaz devenir liquide. C'est que, à la température ordinaire (15°), la tension de saturation du gaz ammoniac n'est que de 7,2 atmosphères.

Quarante ans plus tard, Faraday, alors préparateur d'Humphrey Davy, désirant étudier l'action de la chaleur sur l'hydrate de chlore, introduisit dans l'une des branches d'un tube courbé à angle droit quelques cristaux de ce composé, puis ferma l'autre branche à la lampe. Après avoir chauffé ces cristaux, il les vit fondre, assista ensuite au dégagement des vapeurs et vit apparaître dans l'autre branche des gouttelettes liquides de chlore. Ce phénomène de liqué-

(1) Loi de Mariotte : Le volume occupé par une même masse gazeuse à température constante est en raison inverse de la pression qu'elle supporte.

LE FROID

faction était dû à la compression obtenue par la production ininterrompue du gaz qui atteignait rapidement la tension de saturation dans la branche non chauffée.

Faraday réussit ensuite, par ce procédé, la liquéfaction de plusieurs gaz : l'hydrogène sulfuré, à la température de 10° , sous une pression de 17 atmosphères; l'acide sulfureux à $7^{\circ},5$, sous 3 atmosphères; le protoxyde d'azote, sous 50 atmosphères; le cyanogène, sous 3,7 atmosphères; le gaz carbonique, sous 36 atmosphères. L'appareil de Faraday fut modifié par Thilorier pour liquéfier le gaz carbonique en grandes quantités.

Deux méthodes très différentes permettent donc de liquéfier les gaz. Leur condensation en constitue une troisième. Il est facile de comprendre, tout au moins d'admettre *a priori*, que si la pression vient en aide à la température, la solution cherchée pourra être obtenue à des pressions moins élevées et à des températures moins basses. Mais, si on opère avec des pressions très élevées et à des températures très basses, il sera possible de traiter jusqu'à leur liquéfaction des gaz plus rebelles que les précédents.

A l'époque de Faraday, un grand nombre de gaz avaient résisté à toutes les manœuvres pour les amener à l'état liquide. Le savant imagina, pour les réduire, un appareil dans lequel il faisait intervenir des pressions de 50 atmosphères et des températures de -110° . Successivement furent liquéfiés et même solidifiés, pour la plupart par cette méthode, les gaz acide chlorhydrique, bromhydrique, le fluorure de silicium, l'acide sulfhydrique, le protoxyde d'azote, etc. Mais l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le méthane et l'oxyde de carbone résistèrent à toutes les tentatives.

En présence d'un tel défi de la part de quelques gaz, d'autres physiciens entrèrent en lice : Colladon, avec des pressions de 400 atmosphères; Aimé, qui fit subir 220 atmo-

LA SCIENCE DU FROID

sphères à l'hydrogène et à l'oxygène, sans le moindre succès d'ailleurs; Berthelot, qui parvint à produire des pressions de 720 atmosphères; Natterer, qui atteignit le chiffre prodigieux de 2 800 atmosphères. Mais les gaz résistent ! Ils sont cinq que l'on décide de baptiser « gaz permanents ».

Belle imprudence ! s'écrie Georges Claude, que la Science — qui n'aime pas les défis — ne va pas tarder à relever de la façon que l'on sait.

De ces cinq gaz, deux, le méthane et l'oxyde de carbone, sont des gaz composés. Moissan y ajoute le fluor. L'hélium, découvert dans le soleil, vient ensuite allonger la liste qui se serait encore enrichie, si on les avait connus à l'époque, des autres gaz rares de l'atmosphère : le néon, l'argon, le krypton, le xénon.

Les échecs successifs que nous venons d'enregistrer étaient dus à ce fait que les expérimentateurs avaient beaucoup plus compté sur la pression que sur le froid. C'est-à-dire qu'ils avaient mésestimé la température critique, qui est le degré de température au-dessus duquel il est impossible de liquéfier un gaz, quelle que soit la pression qu'il supporte.

A la suite de travaux entrepris par Andrews, on n'avait pas tardé à reconnaître que certains gaz sont caractérisés par une température critique supérieure à la température normale; c'est pourquoi ils avaient pu être liquéfiés sous la seule action de la pression.

Ainsi s'explique la légende des gaz permanents, dont les températures critiques seront données au chapitre V.

L'influence de la température critique sur la liquéfaction des gaz est telle que de très faibles pressions suffisent pour obtenir les résultats que n'avaient pu apporter des pressions de plusieurs centaines, voire même de plusieurs milliers d'atmosphères. L'azote, amené à sa température critique, n'exige que 33 atmosphères pour être liquéfié; l'hydrogène,

LE FROID

20 atmosphères; l'oxygène, 50 atmosphères; l'hélium, moins de 3 atmosphères : 2,75 exactement. Donc, il n'y a pas de gaz permanents.

Cependant, la Science a besoin de paradoxes. Elle a conservé à ces gaz le nom qui leur avait été attribué à tort — faute d'une expression exacte — pour désigner ceux dont la température critique descend au-dessous de 100° centésimaux.

Ces connaissances acquises, il devenait possible de s'attaquer, avec quelque chance de succès, à ces gaz « résistants ». Deux savants, l'un français, M. Louis Cailletet, l'autre suisse, M. Raoul Pictet, aboutirent presque en même temps à une timide liquéfaction de l'oxygène. L'un et l'autre se hâtèrent cependant d'en informer l'Académie des Sciences, bien que le premier eût assisté seulement à la formation d'un brouillard et le second à celle de gouttelettes liquides très fugitives.

C'est seulement en 1883, c'est-à-dire six ans après les précédentes expériences, que deux savants polonais, M. Olszewski et Wroblewski, parvinrent à produire la liquéfaction complète de l'oxygène à $-129^{\circ},6$, sous une pression de 27 atmosphères. Mais le liquide s'évaporait presque aussitôt. Deux ans après, Wroblewski obtint sa conservation dans des récipients soustraits à la pénétration de la chaleur ambiante. L'azote, l'oxygène, l'oxyde de carbone, le méthane, se détachèrent ainsi, à peu près à la même époque, de la série des gaz dits permanents, dont les derniers représentants, l'hydrogène et l'hélium seuls, se retranchaient dans leur forteresse qui est leur basse température critique.

Ajoutons que l'azote et l'oxyde de carbone liquides, évaporés dans le vide, passent par l'état solide vers -210° . Nous allons maintenant étudier les divers procédés employés pour réaliser la liquéfaction industrielle de l'air.

LA SCIENCE DU FROID

L'AIR LIQUIDE. La compression d'un gaz à sa température critique de vaporisation a permis sa liquéfaction; mais le procédé relève du domaine du laboratoire, réduisant la production liquide à de très faibles quantités.

Or, les physiciens avaient reconnu depuis longtemps que la détente d'un gaz comprimé est une source de froid. En 1857, à l'époque des expériences de Faraday, M. Siemens avait déjà imaginé un appareil appelé « échangeur de température », basé sur la détente des gaz avec travail extérieur. En voici le principe.

L'air comprimé arrive par le tuyau A à l'appareil de détente C, qui est un simple moteur à air comprimé, se refroidit en se détendant dans le cylindre à l'arrière du piston

et s'échappe par le tube B qui enveloppe le premier. L'air détendu, passant dans le tube B, se réchauffe au contact du tube A en enlevant des calories à l'air comprimé qui par-

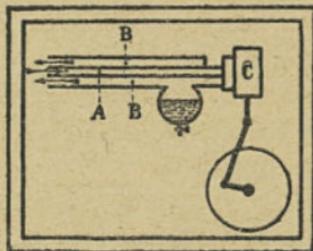


Fig. 5.— *Appareil Siemens.*

court ce dernier (fig. 5). Comme la machine fonctionne d'une manière continue, l'air comprimé arrive toujours à la machine un peu plus froid que celui qui l'a précédé, de sorte que, la température s'abaissant progressivement, on doit aboutir, théoriquement, à la liquéfaction de tous les gaz, même les plus rebelles.

Nous disons « théoriquement » parce que, dans la pratique, l'opération est arrêtée assez rapidement pour plusieurs causes, dont la principale réside dans la congélation des matières lubrifiantes sans lesquelles aucun moteur ne peut fonctionner.

M. Solvay, répétant ces expériences, fut arrêté par la con-

LE FROID

gélation à la température de -92° . C'est ainsi que, jusqu'en 1895, la détente fut considérée par tous les physiciens comme une merveilleuse théorie, sans plus.

Cette année-là, Lindé en Allemagne, Hampson en Angleterre, eurent l'heureuse idée de se souvenir d'une vieille expérience de Joule et Thomson, au cours de laquelle ces savants détendaient de l'air comprimé à travers un bouchon poreux faisant fonction de robinet de détente. Avec un gaz parfait (1), aucun refroidissement ne doit se produire; mais comme les gaz, l'air en particulier, ne bénéficient que rarement de cette qualité, la détente s'accompagne toujours d'un faible abaissement de température.

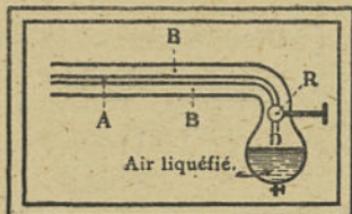


Fig. 6. — *Appareil Hampson.*

Hampson construisit alors l'appareil que représente notre figure (fig. 6). Un compresseur envoie de l'air, à la pression de 200 atmosphères, par un long tube de cuivre A, au robinet de détente R qui le laisse échapper dans la chambre D, où sa pression tombe à la pression atmosphérique. Il se refroidit alors d'une quantité assez faible (50 degrés environ) et, en circulant dans le tube B en sens inverse de l'air, comprimé et à une vitesse ralentie, la température de détente s'abaisse très vite.

Dans les appareils de laboratoire, on atteint ainsi -193° en dix minutes sous la pression atmosphérique. Une partie de l'air détendu se liquéfie dans le réservoir D. Mais le rendement de cet appareil est beaucoup trop faible pour envisager son emploi industriel.

(1) Un gaz, ou une vapeur, est d'autant plus parfait qu'il s'éloigne de la saturation; il obéit ainsi de mieux en mieux à la loi de Mariotte.

LA SCIENCE DU FROID

Il est resté un admirable appareil de démonstration.

Celui du Dr Carl Linde se présente dans des conditions tout à fait différentes. Nous verrons d'ailleurs plus loin que les procédés Linde ont été appliqués à la production du froid industriel.

En principe, le professeur allemand, qui, lui aussi, comprime l'air à 200 atmosphères, le détend à 50 atmosphères seulement au lieu de l'amener, comme Hampson, à la pression atmosphérique. Étant donnée l'importance de l'appareil, nous devons en expliquer le fonctionnement.

Il comporte deux compresseurs actionnés par la même machine. Celui de droite, à cylindre de grand diamètre,

comprime à 40 atmosphères l'air qu'il aspire au dehors et le refoule dans le cylindre de petit diamètre qui le porte à 200 atmosphères. Après passage dans une bouteille où il abandonne l'humidité qu'il contenait, il traverse un réfrigérant et se rend à la partie supérieure de l'installation par un tube qui occupe ensuite le centre d'un ensemble de trois tubes concentriques en serpentins. Parvenu à la base de ce serpentin, un robinet lui permet de se détendre jusqu'à 40 atmosphères en se refroidissant. On voit que l'air détendu

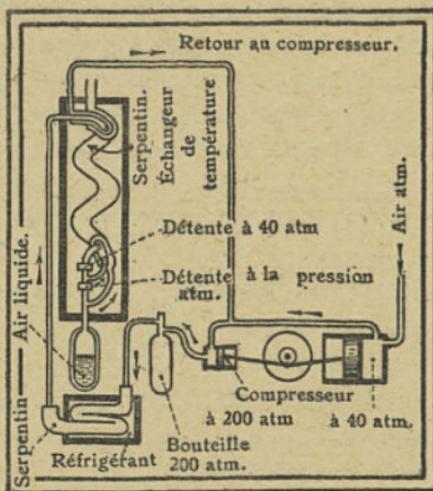


Fig. 7. — *Machine de Linde, type laboratoire.*

LE FROID

retourne au compresseur par le deuxième tube concentrique et en refroidissant le tube central ainsi que l'air à 200 atmosphères qu'il contient (fig. 7).

La température s'abaisse ainsi jusqu'à -140° et l'air se liquéfie. Le liquide, qui est alors à la pression atmosphérique, tombe dans un récipient; mais en passant de 40 à 1 atmosphère, il subit une violente évaporation qui amène sa température à $-193^{\circ},5$. C'est celle de l'ébullition de l'air à la pression atmosphérique. Les gaz issus de cette évaporation sont encore recueillis dans le tube extérieur, où ils contribuent au refroidissement de l'ensemble, avant de s'échapper au dehors.

Les serpentins et les robinets de détente sont enfermés dans une enveloppe calorifugée et l'air commence à se liquéfier après une demi-heure de marche de l'installation.

Cet appareil donna naissance à une première machine qui figura à l'Exposition universelle de 1900 et fut acquise par M. d'Arsonval. Remarquons que Linde fait intervenir un réfrigérant qui était représenté, dans la première machine, par un mélange et, dans la seconde, par une machine à ammoniaque.

On voit que Linde s'éloigne du principe posé par Siemens, c'est-à-dire de la détente avec travail extérieur, et c'est par une admirable ingéniosité qu'il est parvenu à réaliser des machines industrielles qui sont, avec celles de Georges Claude, et celles de Leblanc dont nous parlons plus loin, les seules ayant reçu des applications industrielles mondiales.

Georges Claude prend son point d'appui sur le procédé Siemens basé sur la détente avec travail extérieur. Siemens avait été arrêté uniquement par la lubrification. Le savant français eut l'idée géniale de remplacer les lubrifiants ordinaires, qui se congèlent à -90° , par de l'éther de pétrole, l'essence ordinaire des automobiles, qui résiste aux très

LA SCIENCE DU FROID

basses températures et même prend un état sirupeux qui le rapproche de celui de l'huile ordinaire. A partir d'une certaine température, l'air liquide fourni par la machine suffit d'ailleurs à la lubrification.

Mais il ne tarda pas à s'apercevoir que la machine absorbe, pour sa lubrification, une quantité excessive d'air liquide. C'était là un gros inconvénient au point de vue industriel. Il fut également amené à reconnaître que, orsqu'une machine de détente — un piston dans un cylindre — atteint des températures extrêmes, la consommation de l'air comprimé augmente dans une énorme proportion, tandis que le travail fourni par cette même machine diminue constamment.

Si, au cours des opérations, une quantité d'air non liquéfié (qui est cependant à la température de -190°) retourne à l'échangeur de température, il se produit un refroidissement si énergique que le but atteint dépasse les prévisions et nuit au bon fonctionnement de la machine. C'est que, plus la température d'un gaz est basse, plus le travail d'expansion diminue, puisqu'il devient nul au zéro absolu. Par conséquent, plus l'air comprimé est refroidi, moins la production en air liquide est abondante.

C'est alors que Georges Claude, après trois années d'études, résolut de tenter la liquéfaction sous pression qui permet à la machine de travailler à une température plus élevée.

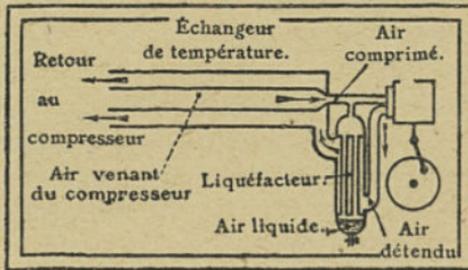


Fig. 8. — *Liquéfaction sous pression.*
Procédé Georges Claude.

LE FROID

Notre schéma (fig. 8) montre que l'air comprimé, après sa détente, pénètre non dans l'échangeur de température, mais dans un organe qui a été appelé liquéfacteur, où il se liquéfie partiellement, non plus à $-193^{\circ},5$ mais vers -130° seulement, en raison de la pression qu'il supporte. Dans ces conditions, les échanges de températures s'effectuent à la température de -100° seulement, et il n'y a plus lieu de

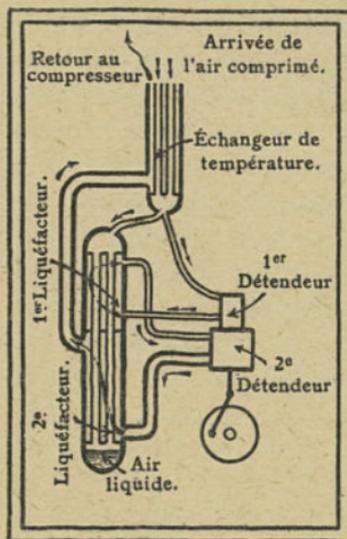


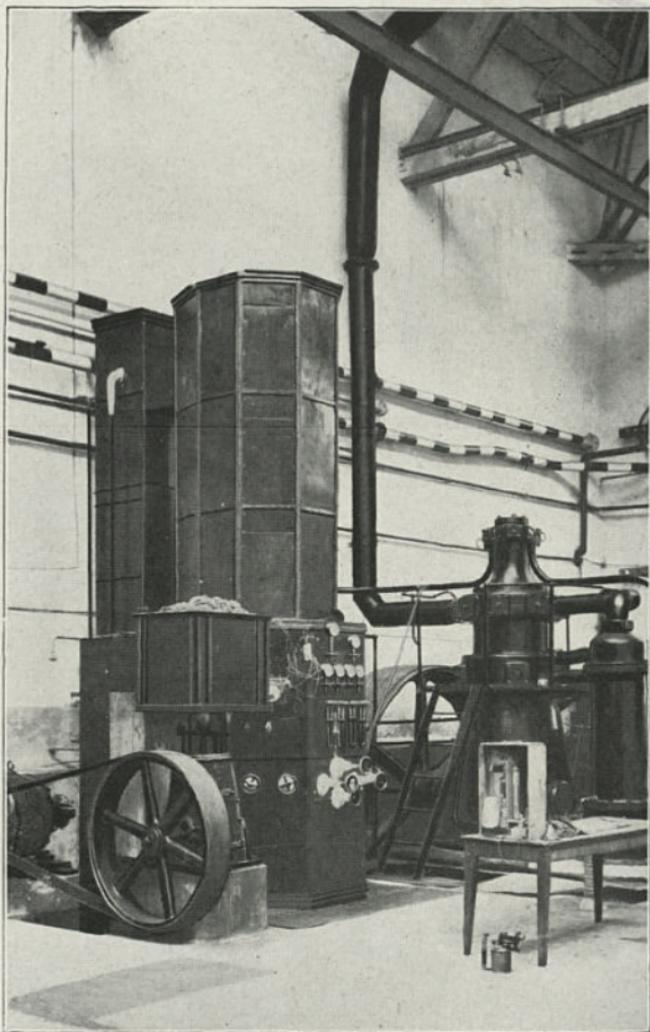
Fig. 9. — *Machine compound Georges Claude.*

redouter les effets que nous avons signalés des très basses températures.

La production de l'air liquide devient alors continue et le robinet doit rester constamment ouvert. Sans cette dernière précaution, la présence d'une certaine quantité d'air liquide dans le liquéfacteur abaisserait la température de l'air se rendant à l'échangeur, et par conséquent celle de l'air comprimé se rendant dans la machine de détente. Ce serait retomber dans l'inconvénient que l'on a voulu éviter. On règle donc

la production de l'air liquide en ouvrant plus ou moins le robinet de sortie.

Nullé machine n'est jamais parfaite, et celle que nous venons de décrire ne fonctionne pas encore régulièrement. Si, au début de l'opération, on réalise la régularité de la détente, le froid augmente, malgré tout, peu à peu et tend à se rapprocher de plus en plus du zéro absolu. C'est le retour aux

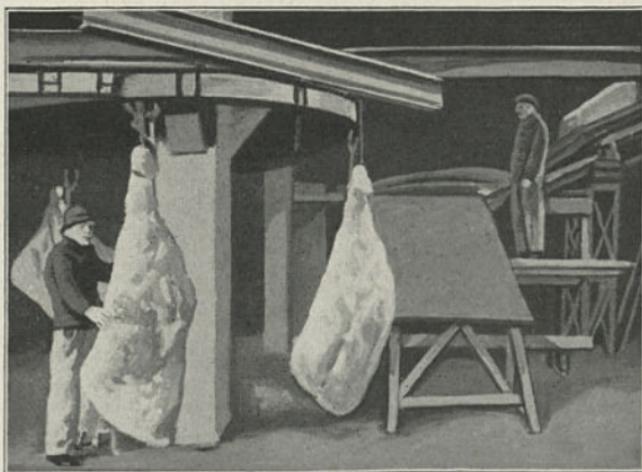


Cl. Hachette.

APPAREIL DE LIQUÉFACTION DE L'AIR.



INSTALLATION DE SORBETIÈRES DANS UN BAR DE LONDRES.



LA MANUTENTION DES VIANDES CONGELÉES DANS UN ENTREPÔT FRIGORIFIQUE S'EFFECTUE PAR DES MONORAILS AÉRIENS.

LA SCIENCE DU FROID

nconvénients du système de détente à la pression atmosphérique.

Pour parer à ce nouvel et dernier inconvénient, il a suffi d'arrêter la détente au moment où elle fournit une température nettement inférieure à la température critique, à -160° par exemple, pour procéder à une détente supplémentaire dans un deuxième liquéfacteur. C'est le système à deux liquéfactions fractionnées, appelé aussi *compound* (fig. 9).

Ce principe, appliqué industriellement à l'usine que la Société de l'air liquide possède à Liège, dès 1908, a cependant reçu peu d'applications. C'est que l'industrie de l'air liquide est surtout une industrie productrice d'oxygène et d'azote, et il a paru préférable d'adopter l'oxygène pour alimenter le liquéfacteur. Actuellement, les appareils fonctionnent suivant ce procédé que nous étudions plus loin.



CHAPITRE IV

LES GAZ ATMOSPHÉRIQUES

La conservation de l'air liquide. || Les propriétés physiques de l'air liquide. || L'air liquide et le charbon. || Les applications de l'air liquide. || La séparation des éléments de l'air. Production de l'oxygène pur. || Principe du retour en arrière. || L'oxygène liquide. || L'extraction des gaz rares de l'atmosphère. || Le krypton et le xénon. || Les applications industrielles de l'oxygène. || Appareils de sauvetage. || Les applications industrielles de l'azote.

L'AIR liquide est aussi fluide et presque aussi incolore que l'eau (en réalité, il est légèrement bleu). Versé dans un vase quelconque, il ne cherche nullement, ainsi qu'on pourrait le croire, à reprendre d'un seul coup son état gazeux. C'est que, suivant en cela la loi commune à tous les liquides, il conserve sa température d'ébullition à — 193°₅ à la pression atmosphérique tant qu'il reste dans le vase.

On peut le faire évaporer plus rapidement en lui fournissant de la chaleur, mais il n'est pas nécessaire, pour cela, de le placer sur un foyer. Il suffit de le mettre sur un morceau de glace. Il existe une telle différence de température entre les deux corps que ce dernier produit sur lui l'effet d'un brasier.

D'ailleurs, si on jette dans le vase qui le contient un morceau de glace ou de craie, l'effet sera le même jusqu'à ce qu'il ait absorbé toute la chaleur contenue dans l'un ou l'autre de ces corps. Si on l'abandonne à lui-même, il s'évapore rapidement parce que l'air extérieur le réchauffe. On voit alors apparaître un brouillard, qui n'est pas un brouillard d'air liquide, mais qui résulte seulement de la conden-

LES GAZ ATMOSPHÉRIQUES

sation de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique, contenus dans l'air extérieur, au contact des vapeurs invisibles que dégage l'air liquide.

LA CONSERVATION DE L'AIR LIQUIDE. Ces curieuses expériences ne sauraient suffire à motiver la production de l'air liquide, dont l'utilisation industrielle exige la conservation aussi longtemps que possible.

Pour conserver l'air liquide, il faut empêcher la chaleur extérieure de pénétrer jusqu'à lui. En entourant le vase d'un excellent calorifuge, on retarde quelque peu l'évaporation; mais, au bout de vingt-quatre heures, il ne resterait cependant rien d'une bonbonne contenant 20 litres. Le procédé est donc insuffisant.

Rappelons que la chaleur se transmet par conductibilité à travers les corps solides et par convection dans les milieux gazeux. Dans ce dernier cas, les molécules de l'air qui entourent un récipient chaud s'échauffent à son contact, en lui empruntant de la chaleur, et s'élèvent dans l'atmosphère pour laisser la place à de nouvelles molécules qui se comportent de même. Si le récipient est plus froid que l'air extérieur, le phénomène inverse se produit : les molécules apporteront leur chaleur propre au récipient, descendront vers le sol pour permettre à leurs voisins de se refroidir à leur tour. Le vase se réchauffe alors par convection et transmet, par conductibilité, sa chaleur au liquide qu'il contient.

Mais la chaleur se transmet encore par rayonnement — cas du soleil réchauffant la terre — en traversant le vide produit entre deux enveloppes aussi bien que celui qui existe dans les espaces interplanétaires.

Reprenant les travaux de Dulong et Petit, sur lesquels M. d'Arsonval s'était appuyé pour construire des récipients à double enveloppe en verre avec vide intérieur, M. Dewar

LE FROID

eut l'idée d'argenter les surfaces internes de ces doubles parois, les surfaces en argent poli étant les plus rebelles au rayonnement que l'on connaît.

Les récipients construits sur ce principe ont une capacité de plusieurs litres. Ils comportent une enveloppe extérieure à laquelle on donne une épaisseur suffisante pour lui permettre de résister à des chocs accidentels et une seconde, intérieure, extrêmement mince (3 dixièmes de millimètre !) rapprochée de la première de quelques millimètres. On conçoit que la fabrication de ces vases soit très délicate, d'autant plus qu'après avoir fait le vide dans l'espace libre, il faut encore souder les bords du goulot. Aussi ces vases sont-ils fort coûteux.

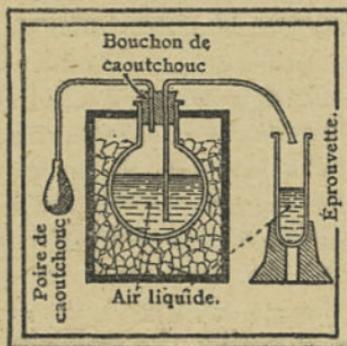


Fig. 10. — *Le transvasement de l'air liquide.*

Malgré sa fragilité, l'enveloppe intérieure supporte l'intégralité de la pression atmosphérique. On peut même transvaser le liquide sans prendre plus de précautions que s'il s'agissait de verser l'eau d'une carafe. Neuf fois sur dix, dit Georges Claude, l'opération réussit; mais le début de la dixième est signalé par un craquement sinistre, immédiatement suivi du givrage extérieur de tout le ballon. D'autres fois, la rupture provoque une explosion de l'enveloppe intérieure, qui est réduite en miettes, comme une lampe à incandescence, par la rentrée de l'air extérieur dans le vide.

Comme la soudure seule est fragile, on lui évite le contact de l'air liquide en utilisant un appareil de transvasement extrêmement simple, mais dont le maniement demande

LES GAZ ATMOSPHÉRIQUES

encore certaines précautions (fig. 10). Ainsi, le tube de verre qui plonge dans le vase Dewar ne doit pas toucher le fond, sans quoi il y a rupture immédiate. Son introduction s'effectue même très lentement, car, dès qu'il entre en contact avec l'air liquide, il se produit une ébullition violente due à ce fait que le verre cède sa chaleur à l'air. Une certaine quantité de liquide sort aussitôt par le tube et tombe dans l'éprouvette, qui est également à double paroi.

C'est seulement avec les vases Dewar que l'on est parvenu à conserver l'air liquide pendant plusieurs jours et même pendant une semaine ou deux. Il ne faut pas songer, en l'état actuel de la Science, à une conservation de plus longue durée, car, le vide n'étant jamais parfait dans la double enveloppe, les quelques molécules d'air qui subsistent passent rapidement de la paroi chaude extérieure à la paroi froide intérieure pour porter à celle-ci les calories qu'elles recueillent sur la première. De plus, l'efficacité de l'argenteure n'est pas absolue au point de vue calorifique. Aussi le réchauffement, quelque lent qu'il soit, n'en subsiste pas moins.

Dans les laboratoires, on peut obtenir un vide parfait en utilisant l'hydrogène liquide ($-252^{\circ},73$) qui constitue une sorte de pompe aspirante pour l'air qu'il congèle immédiatement. Mais l'hydrogène liquide est un produit trop rare encore pour recevoir des applications industrielles étendus.

Les récipients dont nous venons de parler sont toujours ouverts à l'air libre; il se produit une évaporation permanente résultant du contact de l'air atmosphérique avec l'air liquide, et surtout des apports de chaleur extérieure. On sait que, tant qu'il y aura une goutte d'air dans le vase, la température en restera constante : $-193^{\circ},5$, qui est sa température d'évaporation. Ne pourrait-on éviter cette évaporation en fermant le récipient ?

LE FROID

Il y a là une impossibilité matérielle, car un peu de chaleur extérieure atteindra toujours le liquide. Une évaporation se produira donc toujours et les vapeurs s'accumuleront sur la surface de l'air. Or, nous avons expliqué que, la température critique de l'air liquide étant de -140° , il ne peut plus se maintenir en cet état dès qu'il atteint cette température. La masse enfermée dans le récipient se volatiliserait aussitôt d'un seul coup ! Comme sa densité est 800 fois plus élevée que celle de l'air gazeux, une pression de 800 kilogrammes par centimètre carré fera éclater aussitôt le vase.

LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE L'AIR LIQUIDE.

Par suite de la présence de l'oxygène dans l'air liquide, la coloration en est légèrement bleue, mais il se présente, en général, sous un aspect opalescent que lui communiquent les cristaux d'acide carbonique et d'eau tenus en suspension. On peut le filtrer dans un filtre ordinaire pour le débarrasser de ces impuretés.

D'autre part, l'air étant un composé d'oxygène et d'azote, sa température d'ébullition se modifie légèrement pendant l'évaporation. C'est l'azote qui disparaît le premier, de sorte que le liquide restant est bientôt constitué par de l'oxygène pur, qui bout à $-182^{\circ},95$.

Observons également que, la densité de l'azote liquide étant de 0,880 et celle de l'oxygène liquide de 1,120, sous la pression atmosphérique, l'air liquide augmente de densité au fur et à mesure qu'il s'évapore. Si on verse de l'air liquide dans un vase rempli d'eau, il se produit d'abord une effervescence accompagnée de fumées épaisses; l'air liquide reste à la surface au début de l'opération, puis on le voit descendre peu à peu, sous la forme de globules, jusqu'au fond du vase; ce qui prouve bien que sa densité s'est modifiée par suite de l'évaporation de l'azote.

LES GAZ ATMOSPHÉRIQUES

Dans cette expérience, l'eau contenue dans le verre ne s'est pas transformée en glace, comme on pourrait le croire. Cela prouve que l'air liquide, malgré ses — 190°, emmagasine moins de froid que l'eau transformée en glace. Phénomène qui pourrait sembler étrange : un kilogramme d'air liquide absorbe seulement 50 calories, tandis qu'un kilogramme de glace en absorbe 79. L'air liquide est donc un agent réfrigérant beaucoup moins énergique que la glace. D'ailleurs un moteur de 1 cheval fonctionnant pendant une heure fournit seulement 100 frigories sous la forme d'air liquide, tandis qu'il en donne 2 000 sous la forme de glace. Aussi ne verrons-nous probablement jamais figurer l'air liquide dans les industries frigorifiques.

Certaines expériences effectuées avec l'air liquide impressionnent vivement ceux qui en sont les témoins. On peut, par exemple, plonger rapidement son doigt dans de l'air liquide sans ressentir aucun effet. Voici mieux encore. Si on y enfonce un tube de caoutchouc, il se produit un brouillard constitué par des parcelles d'air liquide dont une partie s'échappe par le tube. Eh bien, on peut diriger le jet dans la bouche sans le moindre danger. Ces deux expériences reposent sur le phénomène de la caléfaction; en raison de la grande différence de température qui existe entre le liquide et l'épiderme, il se forme, sur la surface de celui-ci, une légère couche d'air vaporisé qui empêche le contact. L'expérience ne peut être poursuivie, d'ailleurs, que pendant un temps très court, sous peine de brûlure.

En raison de la présence de l'oxygène dans l'air liquide, celui-ci possède des propriétés magnétiques assez accentuées. Si de l'air liquide est placé entre les pôles d'un électro-aimant, il y reste attaché, suspendu comme un pont, et ne tombe que si on coupe le courant. Un tube plein d'air liquide suspendu par un fil en face d'un électro-aimant vient s'y

LE FROID

appliquer comme le ferait une armature de fer doux dès que le courant parcourt la bobine.

Georges Claude, qui a vulgarisé la technique de l'air liquide d'une manière particulièrement attrayante, à la fois par la plume et par la parole, a montré, à l'aide d'expériences frappantes, les propriétés de l'air liquide sur les différents corps usuels. Un tube de caoutchouc perd ses propriétés élastiques et se brise comme un tube de verre. Un thermomètre à alcool ou à mercure subit le même effet, instantanément. Une sphère métallique sortie de l'air liquide et plongée dans la flamme d'un bec Bunsen, se couvre aussitôt de givre. Des grains de raisin deviennent durs comme des billes de verre. Un bifteck peut briser l'assiette sur laquelle on l'a posé.

Par une anomalie singulière, le cuir conserve toute sa souplesse; c'est pourquoi il peut être utilisé pour constituer les pistons des machines de détente.

Les métaux acquièrent des propriétés inverses de celles de la plupart des corps organiques. Un ressort fait avec un fil de plomb devient élastique comme s'il était en acier; par contre, la tôle devient cassante. D'une façon générale, la résistance à l'allongement des métaux est fortement augmentée après immersion dans l'air liquide, mais leur fragilité est très accrue.

La plupart des liquides prennent l'état solide à cette température de -190° . Cependant, l'éther de pétrole résiste; c'est pourquoi il a pu être utilisé comme lubrifiant dans les machines productrices d'air liquide. M. d'Arsonval, procédant à la distillation du pétrole par des refroidissements successifs, est parvenu à isoler des liquides susceptibles d'entrer dans la confection de thermomètres pour très basses températures.

L'AIR LIQUIDE ET LE CHARBON. *■ ■* Association

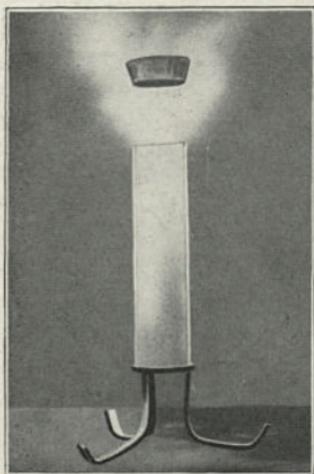


Cl. Hachette.

UN TRANSVASEMENT DE L'OXY-
GÈNE LIQUIDE.



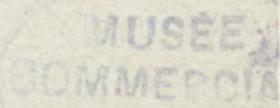
UN JET D'AIR LIQUIDE DE COURTE
DURÉE EST INOFFENSIF.



EXPANSION VIOLENTE DE
L'AIR LIQUIDE EN VASE CLOS.
*L'évaporation rapide provoque
la projection du bouchon.*



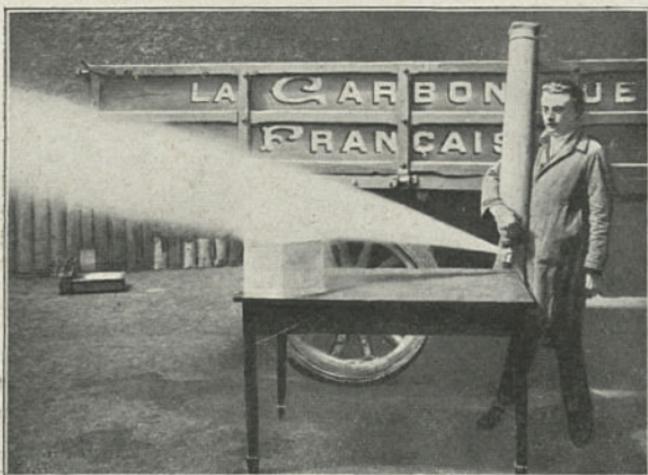
EXPÉRIENCE DE CALÉFACTION.
*On verse de l'air liquide dans
un verre qui se brise au bout
d'un certain temps.*





Cl. Touly.

TUBES A GAZ CARBONIQUE SOUS PRESSION ; BLOCS DE GLACE CARBONIQUE ET LEURS CARTONS D'EMBALLAGE.



Cl. Touly

NEIGE CARBONIQUE.

La détente du gaz carbonique comprimé dans un tube produit un brouillard qui se condense en neige carbonique.

LES GAZ ATMOSPHÉRIQUES

bien inattendue, n'est-il pas vrai, mais si pleine d'intérêt que nous lui réservons une place à part dans l'énumération des propriétés de l'air liquide.

Les propriétés absorbantes du charbon de bois pour les gaz sont bien connues. Or, sous l'action du froid qui lui est fourni par l'air liquide, ces propriétés sont peut-être centuplées ; de sorte que, par son intermédiaire, il est possible de réaliser le vide absolu. C'est à Dewar que l'on doit encore cette découverte ; il a reconnu que le charbon de noix de coco est celui qui donne les meilleurs résultats. Au cours d'expériences suivies, Georges Claude est parvenu à faire absorber 600 centimètres cubes d'air à 15 grammes de charbon ; cet air se dégage dès qu'on fait revenir le charbon à la température ambiante.

Cette précieuse propriété a été appliquée à la confection de récipients métalliques (laiton poli) avec double enveloppe et charbon. La perte en air liquide, dans ces vases, n'est plus que de 0,7 à 0,3 p. 100 par heure, suivant la capacité.

Dewar avait indiqué, en même temps, que plus les gaz sont facilement liquéfiables, mieux ils sont absorbés. Partant de ce fait, l'illustre savant est parvenu à séparer les gaz de l'atmosphère et à isoler le néon et l'hélium. Ce dernier n'était connu, jusqu'alors, que par les travaux de Ramsay qui l'avait découvert dans le soleil.

Le pouvoir absorbant du charbon aux basses températures est également mis en pratique dans la préparation des tubes au néon, dont tout le monde connaît la belle lumière orangée. Après avoir fait le vide à l'aide d'une pompe spéciale pour libérer le tube des impuretés dues au passage d'un énergique courant électrique, on y introduit du néon, la masse de charbon étant enfermée dans une ampoule solidaire du tube et plongée dans une éprouvette contenant de l'air liquide.

LE FROID

Tous les gaz résiduels sont absorbés et le néon seul reste dans le tube.

Nous verrons plus loin que Georges Claude a industrialisé le procédé Dewar pour la séparation des gaz de l'atmosphère.

LES APPLICATIONS DE L'AIR LIQUIDE. ¶ ¶ On commence à tirer parti de l'air

liquide dans les laboratoires; mais les chimistes ne sont pas encore suffisamment avertis des services qu'il peut leur rendre. On réalise déjà couramment, par son intermédiaire, la condensation de l'émanation du radium, la dessiccation des sérums. Dans l'industrie, on peut recourir au froid produit par l'air liquide pour réaliser un frettage énergique lorsque les pièces à fretter ne peuvent supporter la dilatation par la chaleur. Quant à son emploi comme moteur, il n'y faut pas songer pour le moment, écrit Georges Claude, car on

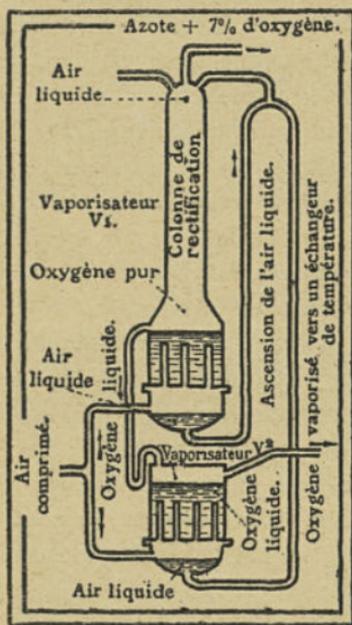


Fig. 11. — Appareil Linde pour la production de l'oxygène pur.

ne peut obtenir, pendant la détente, qu'une énergie d'un cinquième de cheval par kilogramme d'air liquide.

LA SÉPARATION DES ÉLÉMENTS DE L'AIR. PRODUCTION DE L'OXYGÈNE PUR. ¶ ¶ C'est à Linde que

LES GAZ ATMOSPHÉRIQUES

revient le grand honneur d'avoir, le premier, obtenu industriellement de l'oxygène pur. Ses installations fournissent de 10 à 500 mètres cubes d'oxygène pur à l'heure. Nous allons expliquer sommairement comment fonctionnent les appareils (fig. 11), en laissant de côté la phase de mise en route.

Un vaporiseur V_1 contient de l'oxygène liquide. Il est vaporisé par la liquéfaction totale de l'air comprimé qui pénètre dans le faisceau tubulaire du vaporiseur. Les vapeurs s'élèvent donc dans la colonne de rectification, où elles rencontrent, cheminant en sens contraire, l'air liquide chassé à la partie supérieure de cette même colonne par la pression de l'air comprimé qui s'exerce en permanence sur sa surface. Le contact provoque la condensation des vapeurs d'oxygène ascensionnelles augmentées de l'oxygène contenu normalement dans l'air liquide tombant en pluie.

Le produit de cette condensation (oxygène liquide) tombe dans le même vaporiseur et le liquide s'échappe par un tube qui le conduit à un autre vaporiseur V_2 , semblable au précédent.

Là se produit une rectification. Comme précédemment, une nouvelle vaporisation de l'oxygène s'effectue sous l'influence de la liquéfaction de l'air comprimé à la base de ce vaporiseur.

L'oxygène pur, vaporisé, s'échappe par une tubulure qui le dirige vers un échangeur de température et de là dans les appareils d'utilisation.

On remarque que l'air liquide obtenu dans le vaporiseur V_2 est également refoulé, comme celui de V_1 , à la partie supérieure de la colonne de rectification, où il abandonne, lui aussi, une partie de son oxygène.

Quant à l'azote, dont le point de liquéfaction est inférieur à celui de l'oxygène, il se dégage le premier de l'air

LE FROID

liquide et s'échappe à la partie supérieure de la colonne de rectification, en entraînant 7 p. 100 d'oxygène gazeux. Ces 7 p. 100 représentent la perte théorique pendant l'opération, puisque l'air contient 21 p. 100 d'oxygène.

On voit que l'appareil fournit en même temps de l'azote, facile à obtenir, lui aussi, à l'état pur, pour la raison que nous venons d'indiquer.

PRINCIPE DU « RETOUR EN ARRIÈRE ». Les procédés Georges Claudé en matière d'extraction de l'oxygène reposent sur un principe qu'il a désigné sous le nom de « retour en arrière ». Voici en quoi il consiste.

L'air comprimé et refroidi dans un échangeur de température arrive par un tuyau à la base du faisceau des tubes refroidis par de l'air liquide. Les premières gouttes liquides qui tombent dans le réservoir ne sont pas de l'air à 21 p. 100 d'oxygène; en raison de la différence des points de liquéfaction qui existe entre les deux gaz, il se liquéfie immédiatement de l'air titrant 47 p. 100 d'oxygène. L'air comprimé qui s'élève dans les tubes se trouve ainsi appauvri au fur et à mesure de sa montée et de sa liquéfaction, qui sont progressives. Il perd ainsi peu à peu son oxygène, si bien qu'au moment où il atteint la calotte supérieure du faisceau il ne contient plus que de l'azote pur.

Ce phénomène se conçoit aisément si on envisage le chemin parcouru par une masse unique, un volume précis, d'air comprimé. Dans l'appareil l'entrée de l'air est permanente: le phénomène doit donc être permanent. Il se produit alors un fait capital aisément compréhensible. L'air pénétrant dans l'appareil et s'élevant dans le faisceau rencontre immédiatement une pluie d'air liquide trop froid pour lui, qui contient encore ses 79 p. 100 d'azote. Une partie de l'oxygène ne peut supporter une telle température sans se condenser

LES GAZ ATMOSPHÉRIQUES

sous cette douche; il se transforme en liquide, il libère une partie de l'azote qui s'était lui-même liquéfié et qui remonte avec l'air comprimé vers la calotte du faisceau. On peut donc considérer qu'en s'élevant progressivement dans le faisceau, l'air comprimé abandonne peu à peu l'oxygène qu'il contenait sous l'action de la pluie liquide, tandis que le liquide formé, circulant à contre-courant, abandonne peu à peu la vapeur de l'azote qu'il contenait lui-même. Il en résulte une production de liquide riche en oxygène et d'azote pur.

C'est là le principe du *retour en arrière* (fig. 12).

Il devient facile de comprendre le fonctionnement de l'appareil de distillation qui, basé sur ce principe, représente un sensible progrès sur le précédent en ce sens qu'il fournit immédiatement l'oxygène et l'azote purs. Nous allons encore

prier nos lecteurs de suivre attentivement le dessin schématique qui accompagne notre texte (fig. 13).

L'air comprimé et refroidi par son passage à travers un échangeur de température arrive dans un vaporiseur semblable au précédent, surmonté comme lui d'un faisceau tubulaire entouré d'oxygène liquide. Il se liquéfie et tombe à la base du récipient. Mais cette liquéfaction n'est pas complète: l'azote reste à l'état gazeux quand il atteint la cloche qui coiffe le faisceau. Le liquide obtenu dans le collecteur est donc, d'ores et déjà, très riche en oxygène.

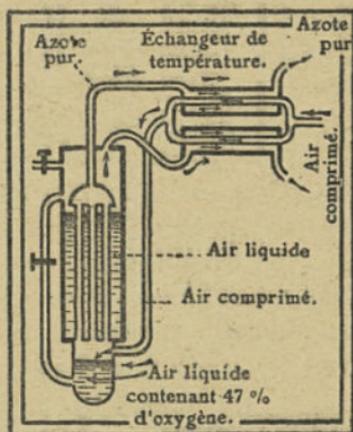


Fig. 12. — Le principe du *retour en arrière*.

LE FROID

Quant à l'azote, il se liquéfie seulement en parcourant un deuxième faisceau entourant le premier et tombe ensuite dans un collecteur spécial.

En raison de la pression qui règne sur la surface des

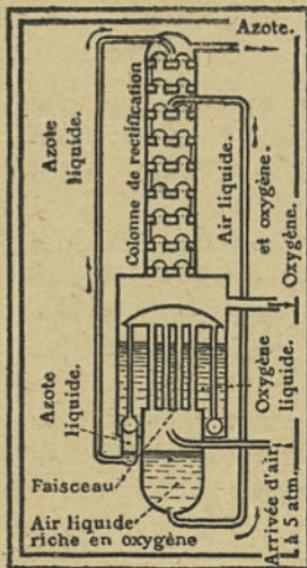


Fig. 13. — Appareil à oxygène pur de G. Claude.

liquides, tous deux peuvent s'élever jusqu'à la partie supérieure de la colonne de rectification. Mais celui riche en oxygène s'échappe à peu près à mi-hauteur de la colonne; il tombe, comme nous l'avons vu précédemment, dans le réservoir à oxygène, en condensant les vapeurs qui s'y produisent par l'action de la liquéfaction de l'air dans le faisceau.

L'azote provenant du liquide riche et l'azote liquide achèvent de se distiller dans la colonne et le gaz pur sort à la partie supérieure, alors que l'oxygène seul s'est condensé pour tomber dans le récipient. Les vapeurs

qui s'échappent de ce dernier sont donc de l'azote pur qui peut être envoyé aux appareils d'utilisation.

L'appareil que nous venons de décrire a été modifié depuis par Georges Claude lui-même et par les savants étrangers qui l'utilisent. Le rendement, pour des appareils traitant de 500 à 1 000 mètres cubes d'air à l'heure, approche d'un mètre cube d'oxygène pur gazeux par cheval-heure effectif.

D'autres méthodes, souvent très différentes des précé-

LES GAZ ATMOSPHÉRIQUES

dentes, ont été imaginées, soit pour produire l'air liquide, soit pour obtenir la séparation de l'air en ses deux éléments essentiels. Citons, sans nous y arrêter, les travaux de Raoul Pictet, Lévy et Helbronner, qui furent contemporains des précédents, et qui ont fait, eux aussi, l'objet d'exploitations industrielles.

L'OXYGÈNE LIQUIDE. ¶ ¶ Les appareils dont nous venons de parler produisent de l'azote et de l'oxygène purs, mais à l'état gazeux. L'industrie a besoin actuellement de ces mêmes gaz à l'état liquide.

La liquéfaction de l'oxygène peut être obtenue très simplement, puisque ce gaz se liquéfie avant l'azote — à une température moins basse. Il suffit donc, en principe, de recueillir l'azote à l'état gazeux pour obtenir de l'oxygène liquide pur. Divers appareils donnent un tel résultat : Le Rouge, Messer Industriegas-Gesellschaft. Leur rendement pourrait être amélioré, car ils ne tirent pas de l'air atmosphérique refroidi tout l'oxygène qu'il contient; l'abondance de la matière première autorise, d'ailleurs, une telle méthode. Il serait cependant préférable d'opérer une extraction totale afin d'améliorer le rendement économique. Nous ne croyons pas devoir donner la description de ces appareils : ce que nous avons dit précédemment de la liquéfaction de ces gaz nous paraît suffisant pour satisfaire la curiosité technique de nos lecteurs.

L'EXTRACTION DES GAZ RARES DE L'ATMOSPHÈRE.
¶ ¶ L'hélium et le néon ont pu être extraits de l'air liquide par distillation, procédé qui a déjà permis à Ramsay de découvrir leur présence dans l'air. Georges Claude a employé la condensation de l'air gazeux : après élimination de l'oxygène et de l'azote, le résidu contient une proportion notable

LE FROID

de ces gaz. Il a suffi d'envoyer ce résidu dans un serpentín refroidi par l'azote liquide pour obtenir les deux gaz à l'état pur. On les traite ensuite au charbon pour les séparer.

Il a été reconnu qu'un million de mètres cubes d'air contiennent 15 mètres cubes de néon et 5 mètres cubes d'hélium. Quant à l'hydrogène, il n'existerait dans l'air atmosphérique que dans une proportion infinitésimale.

Ces chiffres ne s'appliquent qu'à l'analyse de l'air puisé à quelques mètres de hauteur dans l'atmosphère; il est probable qu'à 100 kilomètres et plus les proportions sont très différentes. C'est ainsi qu'à cette altitude flotte une épaisse couche d'hydrogène maintenue au-dessus de l'atmosphère terrestre par sa grande légèreté.

Il est plus difficile d'extraire l'argon, dont le point d'ébullition est intermédiaire entre celui de l'oxygène et de l'azote et très rapproché de celui de ce dernier. On le retrouve toujours dans ces deux gaz liquéfiés. Pendant la guerre, Linde parvint à isoler l'argon de ses deux voisins par un traitement approprié, et c'est seulement un an après que Georges Claude et Le Rouge aboutirent au même résultat, avec un procédé différent appliqué ensuite en Angleterre et aux Etats-Unis. Rappelons que l'argon est utilisé dans les ampoules des lampes électriques à incandescence, dites demi-watt.

LE KRYPTON ET LE XÉNON. Ces deux gaz ont été extraits en 1928 par M. Georges Claude et ses collaborateurs, MM. Ribaud, victime des essais, Le Rouge, Gomonet, Létang et M^{lle} Tranchat, grâce aussi, ajoute l'illustre savant, « aux enseignements que j'ai trouvés dans les travaux de M. Lepape ».

Les travaux ont été guidés par cette idée que les deux gaz devaient être extraits, non pas d'air traité spécialement à cet

LES GAZ ATMOSPHÉRIQUES

effet, mais comme de simples sous-produits des appareils industriels à oxygène ou à azote, sans rien changer à leur fonctionnement.

L'appareil à oxygène employé est semblable à celui que nous avons décrit. Le krypton et le xénon subsistent sous des teneurs très faibles dans le bain d'oxygène auquel on fait subir une rectification supplémentaire dans un vaporiseur. L'oxygène arrive par la tubulure R; il subit une série de vaporisations successives et des rectifications, pendant sa descente, sur de nombreux plateaux P au contact d'un faisceau tubulaire alimenté par de l'air comprimé qui se liquéfie dans le faisceau (fig. 14).

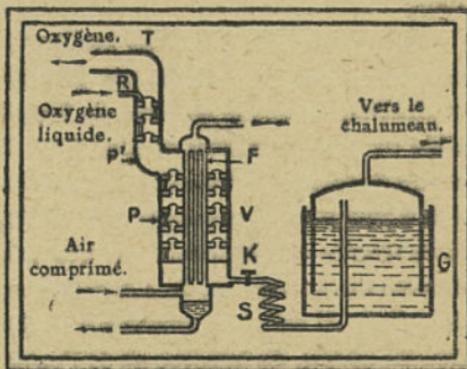


Fig. 14. — Extraction du xénon et du krypton, procédé Georges Claude.

Les gaz formés traversent le li-

quide de tous les plateaux; l'oxygène gazeux sort du vaporiseur par le tube T et le liquide qui se dépose à la base du vaporiseur atteint une concentration importante de xénon et de krypton.

On dirige ce liquide dans un serpentin S, où il s'évapore; le gaz pénètre alors dans un gazomètre régulateur G, d'où il sort pour alimenter un chalumeau brûlant dans une atmosphère d'hydrogène à l'intérieur d'une chambre métallique munie d'une fenêtre en pyrex pour contrôler la combustion. Le gaz résiduel ne contient plus, après la combustion, que le vingtième du débit total d'oxygène, de sorte que la teneur

LE FROID

en xénon et en krypton se trouve fortement relevée.

Il ne reste plus qu'à faire passer ce gaz résiduel dans un tube de pyrex contenant de la silice absorbante et placé dans un vase Dewar refroidi par de l'oxygène liquide. Les gaz sont alors dégagés par le réchauffement de la silice et recueillis par ordre de densité. On obtient ainsi en moyenne 10 à 11 litres de krypton et 0,18 à 1 litre de xénon par jour, représentant de 40 à 50 p. 100 de la quantité contenue dans l'air.

Avec de grands appareils traitant à l'heure 3 000 mètres cubes d'air, on obtiendrait par jour plusieurs litres de xénon et plusieurs dizaines de litres de krypton. Il n'est pas impossible de prévoir mieux encore pour l'avenir, car les coefficients de solubilité dans l'eau du krypton et du xénon sont de 4 à 6 fois plus élevés que ceux de l'oxygène et de l'azote. Il en résulte que la teneur de ces deux gaz dans les gaz dissous dans l'eau est de 4 à 6 fois supérieure à la teneur dans l'air. Il est donc possible d'envisager, pour la production du xénon, du krypton et de l'oxygène, le traitement des gaz dissous dans l'eau au lieu de celui de l'air atmosphérique. Ces gaz seront fournis en immenses quantités par les installations d'extraction d'énergie de la mer par le procédé Claude-Boucherot dont nous parlerons dans notre chapitre sur les applications industrielles du froid.

LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'OXYGÈNE. $\varnothing \varnothing$ Ce gaz, en raison de la température de combustion élevée qu'il apporte au gaz d'éclairage, à l'acétylène ou au gaz de pétrole, est utilisé dans les chalumeaux pour réaliser la soudure autogène des métaux et la coupure des tôles.

Si on verse de l'oxygène liquide sur du charbon de bois et qu'on approche une allumette, le mélange brûle en fusant; mais, si on place ce mélange dans un vase clos et qu'on l'en-

LES GAZ ATMOSPHÉRIQUES

flamme avec une amorce de fulminate, il se produit une violente explosion. Il est donc possible de fabriquer des explosifs à l'oxygène liquide.

En plaçant du noir de fumée dans un sachet de toile trempé ensuite dans de l'oxygène liquide, on obtient un explosif donnant plus de 2 000 calories par kilogramme, tandis que la dynamite en donne seulement 1 600 et la poudre noire 600. Si on ajoute de la naphthaline, on obtient de meilleurs résultats encore. Mais ces cartouches présentent un inconvénient. C'est que l'immersion du produit solide dans le liquide ne peut se faire qu'au moment de l'emploi, quinze minutes à peine pour les cartouches de 35 millimètres de diamètre et cinq ou six minutes pour les petites.

On les utilise cependant dans les mines métalliques. Toutes les mines de Lorraine les emploient, réalisant une économie de 12 à 60 p. 100 par tonne de minerai abattu, et l'extraction journalière est passée, par mineur, de 6 tonnes avec la poudre brune à 8 tonnes avec l'oxygène. Des machines produisant chacune 80 litres d'oxygène liquide à l'heure ont été installées à proximité des exploitations pour répondre à tous les besoins. Ces cartouches sont constituées par du noir de fumée et de la naphthaline auxquels on ajoute de la sciure ou de la farine de bois.

Par l'ozonisation de l'oxygène, on peut également concevoir la fabrication d'explosifs violents.

APPAREILS DE SAUVETAGE. // // Un réservoir métallique à double enveloppe calorifugée contient 1 l. 5 d'oxygène liquide immobilisé dans de l'amiante (fig. 15).

L'oxygène se vaporise et pénètre dans un deuxième réservoir à paroi intérieure souple (caoutchouc) de 4 à 5 litres de capacité. Les deux récipients sont placés l'un à côté de l'autre, sur le dos du porteur, et un tube souple réunit le

LE FROID

deuxième au masque de figure, qui est également pourvu d'une soupape rejetant au dehors les gaz expirés.

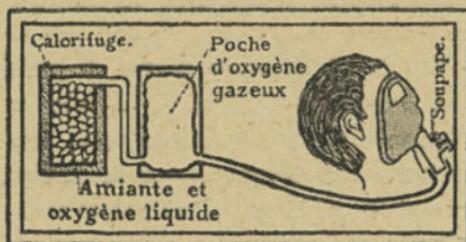


Fig. 15.— *Appareil de sauvetage à l'oxygène liquide de Georges Claude.*

Un ouvrier a besoin de 120 litres d'oxygène à l'heure; or, la provision liquide de 1 l. 5 en fournit 1 200 litres,

soit une quantité suffisante pour dix heures de travail.

Dans certains appareils, l'oxygène est simplement comprimé; comme la provision est peu importante, on régénère l'air expiré par absorption de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique. Le régénérateur complique l'installation, qui ne peut fournir que 300 litres d'oxygène pour un poids total de 15 kilogrammes, tandis que le précédent, dû à G. Claude, pèse seulement de 7 à 8 kilogrammes.

C'est également à l'oxygène liquide qu'ont recours les aviateurs lorsqu'ils se disposent à atteindre des altitudes élevées.

LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'AZOTE.

On connaît le rôle important que joue l'azote dans la fabrication des engrais. Actuellement, la fixation de l'azote est résolue industriellement. On chauffe du carbure de calcium dans un courant d'azote très pur et on obtient la cyanamide, poudre noire qui contient 15 à 20 p. 100 d'azote et 60 p. 100 de chaux. C'est un engrais équivalent au sulfate de soude et au nitrate d'ammoniaque.

La production de l'azote et celle de l'hydrogène ont également permis la synthèse de l'ammoniaque, réalisée par les

LES GAZ ATMOSPHÉRIQUES

procédés Haber en Allemagne et par ceux, plus simples et plus hardis, de Georges Claude en France. Les deux gaz, comprimés à 1 000 atmosphères, puis soumis à l'action d'un catalyseur, à une température de 550° à 600°, donnent de l'ammoniaque sous pression, liquéfiable par retour à la température ordinaire.

Pour obtenir l'hydrogène à bon marché, Georges Claude l'extrait du gaz à l'eau, qui est un mélange, à volumes sensiblement égaux, d'hydrogène et d'oxyde de carbone, ou, mieux encore, des gaz de fours à coke. Comme les gaz autres que l'hydrogène se liquéfient à une température moins basse que ce dernier, il est facile d'opérer la séparation.

A l'usine de Montereau, qui est une station d'études, un de ces appareils traitant du gaz à l'eau fournit 12 000 mètres cubes d'hydrogène par jour, qui permettent de produire, pendant le même temps, 5 tonnes d'ammoniaque. L'oxyde de carbone, sous-produit de la fabrication, est utilisé pour actionner les moteurs de 300 chevaux qui fournissent la force motrice nécessaire à la compression des deux gaz associés.

Cette première étape de la fabrication de l'ammoniaque a donné naissance à l'industrie du sulfate d'ammoniaque, réalisée maintenant dans plusieurs cokeries (fabrication du coke métallurgique) dont les gaz, naguère perdus, contiennent 50 p. 100 d'hydrogène. Des installations importantes existent dans les principaux centres miniers français et étrangers : Béthune, Aniche, Saint-Etienne, Decazeville, Liège, Vado-Liguri (Italie), La Felguera (Espagne), Rauxel (Allemagne), Knurów (Pologne), Ignatz (Tchéco-Slovaquie), Belle (Etats-Unis) et Hikoshima (Japon).

Les appareils actuels correspondent à une production journalière de 20 tonnes de sulfate d'ammoniaque.

On voit par là combien les applications indirectes du froid sont susceptibles de se développer.

CHAPITRE V

LES TRES BASSES TEMPÉRATURES

Kammerlingh Onnes. || La liquéfaction de l'hydrogène. || La liquéfaction de l'hélium. || Les propriétés des corps aux très basses températures.

KAMMERLINGH ONNES. ¶ ¶ Nous avons réservé à un chapitre spécial l'étude des très basses températures, parce que ce domaine est l'un des plus importants, le plus important peut-être, de toute la physique.

L'homme des très basses températures s'appelle Kammerlingh Onnes. C'était un savant hollandais, directeur-fondateur du laboratoire cryogène de l'Université de Leyde, que les travaux de Pictet à Genève et de Cailletet à Paris avaient conquis tout jeune encore à la Science du froid.

Il fut le premier à pressentir les effets des très basses températures sur les propriétés physiques de la matière et il consacra sa vie entière à la recherche de moyens propres à se rapprocher le plus possible du zéro absolu et à en étudier les effets.

Ce fut lui qui força le dernier des gaz dits permanents, l'hélium, à prendre l'état liquide et qui parvint à le solidifier en lui imposant la formidable température de $-272^{\circ},1$, se rapprochant ainsi de moins d'un degré du zéro absolu.

Ce fut encore lui qui, pour les besoins de ses expériences, conçut les cryostats, vases dans lesquels les gaz liquéfiés peuvent être conservés en quantités suffisantes et pendant plusieurs heures sans perdre plus d'un centième de degré de leur température.

LES TRÈS BASSES TEMPÉRATURES

Sous sa direction, le laboratoire de Leyde devint un office international où les savants appartenant à toutes les nations étaient admis pour effectuer leurs expériences. Paul Becquerel en a été l'hôte.

Kammerlingh Onnes s'inspirait de la méthode imaginée par Pictet, au début de ses expériences, méthode dite en cascade, pour parvenir à des températures de plus en plus basses. Elle dérive de celle de Faraday. On comprime le gaz dans un récipient refroidi, où il se liquéfie. Le liquide est ensuite amené à l'ébullition en réalisant un vide partiel sur sa surface; sa température s'abaisse en vertu de ce principe que l'ébullition d'un liquide non réchauffé par un foyer extérieur perd de la chaleur.

Si, dans ce liquide en ébullition, on introduit un tube contenant un gaz plus difficilement liquéfiable que le premier, ce gaz se liquéfie à son tour et sa température de liquéfaction peut également être abaissée par une évaporation rapide, comme dans le premier cas, sous l'action d'une pression inférieure à la pression atmosphérique.

On peut donc agir, d'après ce procédé, sur une échelle de gaz de plus en plus résistants à la liquéfaction, dont le dernier échelon est représenté par l'hélium.

La liste des gaz utilisés à Leyde, accompagnés de leurs constantes physiques, est donnée dans le tableau de la page suivante.

Ainsi, d'échelon en échelon, on aboutit à la liquéfaction de l'air qui n'est plus, ici, qu'un stade, une étape, dans la marche vers le zéro absolu. L'air liquide, produit à raison de 14 litres à l'heure, a tout de même été la base sur laquelle sont assises les expériences de Leyde. Ceci n'empêche pas, d'ailleurs, le laboratoire de produire les gaz aux constantes physiques inférieures qui sont nécessaires aux expériences nécessitant des froids compris entre -24° et $-218^{\circ},4$ point

LE FROID

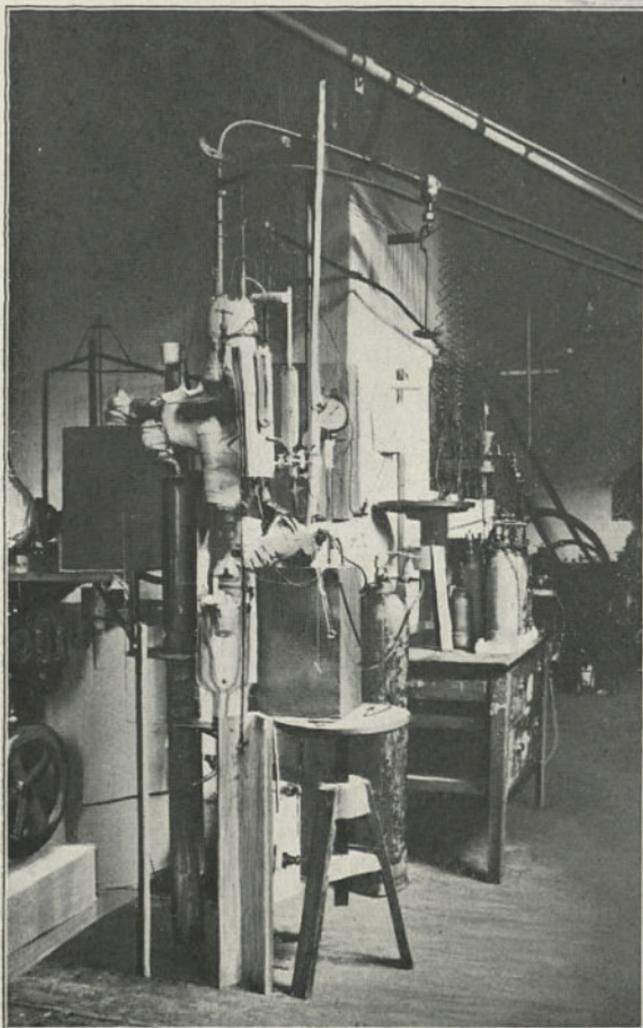
Gaz.	Point d'ébullition.	Point de congélation.	Température critique.
Chlorure de méthyle	— 24 ^o ,09	— 102 ^o ,09	+ 143 ^o
Protoxyde d'azote	— 89 ^o ,8	— 102 ^o ,03	+ 36 ^o ,50
Ethylène	— 103 ^o ,72	— 169 ^o	+ 9 ^o ,50
Méthane.....	— 161 ^o ,37	— 183 ^o ,15	— 82 ^o ,85
Oxygène	— 182 ^o ,95	— 218 ^o ,4	— 118 ^o ,82
Azote.....	— 193 ^o ,78	— 209 ^o ,86	— 147 ^o ,13
Néon.....	— 245 ^o ,92	— 248 ^o ,67	— 228 ^o ,71
Hydrogène	— 252 ^o ,73	— 259 ^o ,14	— 239 ^o ,91
Hélium.....	— 268 ^o ,83	— 272 ^o ,1	— 267 ^o ,84

Les constantes des gaz utilisés au laboratoire du froid de M^r Kammerlingh Onnes à Leyde.

de congélation de l'oxygène. Ajoutons que la puissance mécanique nécessaire pour produire un litre d'air liquide à l'heure est de 1,64 CV.

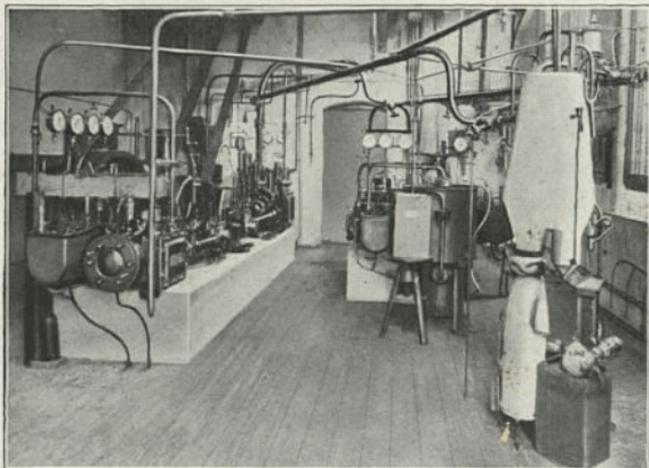
Dans la pratique, il est inutile de réaliser une cascade comprenant les neuf gaz envisagés. M. Kammerlingh Onnes utilisait seulement le chlorure de méthyle, l'éthylène, l'air liquide qui lui a permis de liquéfier l'hydrogène, ce dernier étant utilisé pour liquéfier l'hélium. Ces liquéfactions ne doivent pas être considérées comme des buts; ce sont simplement des moyens employés pour se procurer des liquides à des températures très basses utiles pour les expériences de laboratoire.

Nous engageons vivement nos lecteurs à suivre attentivement les dessins schématiques que nous avons établis pour faciliter la compréhension de la marche des gaz dans les appareils liquéfacteurs. Nous touchons ici au dernier terme des connaissances acquises dans la production du froid, étape quasi ultime, qui devient elle-même le point de départ



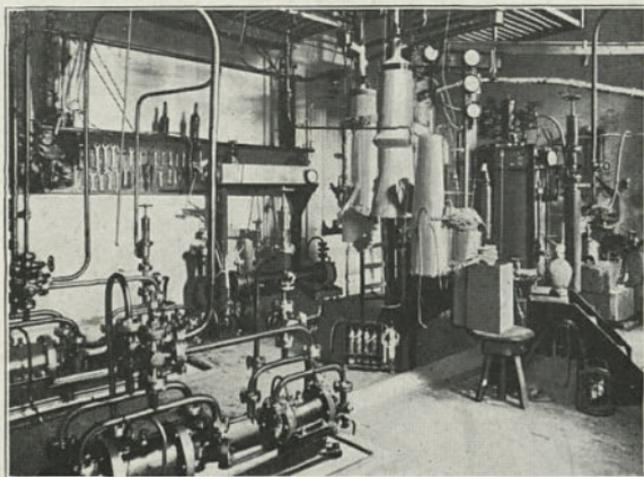
LABORATOIRE DE LEYDE.

Appareil avec lequel l'hélium fut liquéfié pour la première fois.



LABORATOIRE DE LEYDE.

Appareils utilisés pour la liquéfaction de l'hydrogène.



LABORATOIRE DE LEYDE.

Ensemble des appareils de liquéfaction du chlorure de méthyle.

LES TRÈS BASSES TEMPÉRATURES

d'expériences aux résultats étonnants, aux conséquences fantastiques.

LA LIQUÉFACTION DE L'HYDROGÈNE. L'appareil (fig. 16) fonctionne comme celui de Linde pour la production de l'air liquide, sans travail extérieur.

Dans le liquéfacteur de gauche, maintenu à une pression inférieure à la pression atmosphérique (2 millimètres) par une pompe à vide, coule de l'air liquide provenant d'un vase Dewar et qui bout aussitôt, avec, par conséquent, abaissement de température.

L'hydrogène, comprimé à 150 à 200 atmosphères, pénètre en même temps dans les deux liquéfacteurs; mais on remarque que les deux serpentins

ne tardent pas à se réunir. Le gaz parcourt alors le seul liquéfacteur de droite pour pénétrer ensuite dans celui de gauche et venir au contact de l'air liquide en ébullition. Il retourne enfin dans le liquéfacteur de droite, où il se détend dans une valve spéciale. Sa pression d'une part, la basse température qu'il a acquise dans l'air liquide d'autre part, enfin sa détente à l'air libre permettent d'atteindre les $-252,73$ nécessaires à sa liquéfaction.

Le fonctionnement de l'appareil est très régulier et une

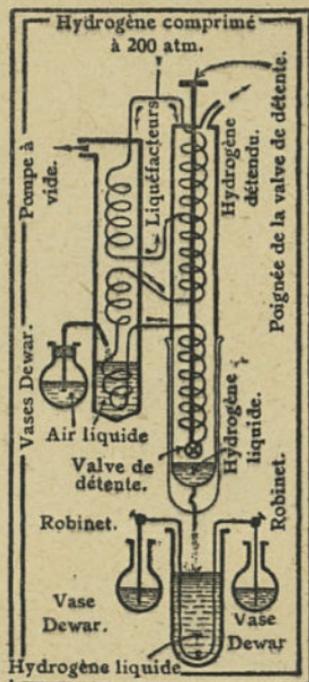


Fig. 16. — La liquéfaction de l'hydrogène au laboratoire du froid à Leyde.

LE FROID

deux heures après la mise en marche, on voit apparaître les premières gouttes d'hydrogène liquide. A partir de ce moment, la production augmente, car ces gouttes se vaporisent partiellement, avec production de froid, et les vapeurs baignent les serpentins du liquéfacteur de droite pour

contribuer au refroidissement du gaz qui les parcourt. La liquéfaction se régularise et bientôt atteint sa production normale, qui est de 13 litres d'hydrogène liquide à l'heure.

On le transvase, pour le transport, dans des vases Dewar.

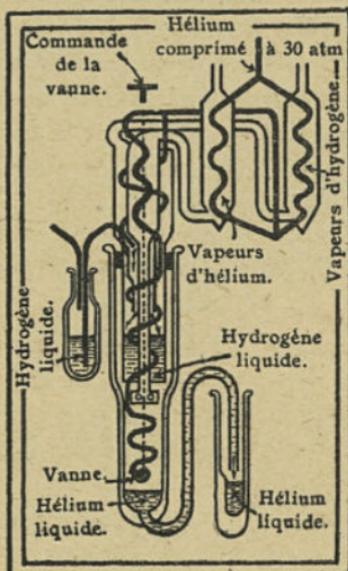


Fig. 17. — La liquéfaction de l'hélium au laboratoire du froid à Leyde.

LA LIQUÉFACTION DE L'HÉLIUM.

Le principe de la liquéfaction de l'hélium est le même que celui adopté pour la liquéfaction de l'hydrogène et, d'ailleurs, des autres gaz moins résistants. Mais l'air liquide est remplacé par

l'hydrogène liquide dans le premier liquéfacteur renfermé, ici, à l'intérieur du deuxième.

L'hélium, comprimé à 30 atmosphères, pénètre dans deux serpentins qui se réunissent ensuite pour se séparer à l'entrée du liquéfacteur et parcourir un premier stade au sein des vapeurs d'hydrogène.

Leur réunion s'effectue de nouveau, avant de plonger dans l'hydrogène liquide d'où le serpentin sort pour se termi-

LES TRÈS BASSES TEMPÉRATURES

ner par la vanne de détente à la base de l'appareil (fig. 17).

Sous l'action de la détente et du froid, le gaz se liquéfie et tombe au fond de l'appareil.

Ici encore, les vapeurs de l'hydrogène en ébullition sont utilisées pour opérer un premier refroidissement de l'hélium comprimé, et les vapeurs d'hélium liquide, après avoir entouré le réservoir d'hydrogène liquide, s'échappent à la base d'un gros tube traversant l'hydrogène liquide en le refroidissant, ainsi que les serpentins. C'est ainsi que, en 1908, Kammerlingh Onnes est parvenu à obtenir la température extrême de $-272^{\circ},1$, se rapprochant de moins de 1 degré du zéro absolu, limite inaccessible du froid.

LES PROPRIÉTÉS DES CORPS AUX TRÈS BASSES TEMPÉRATURES. ¶ ¶ C'est en vue de l'étude de ces propriétés que le savant a été conduit à réaliser des températures de plus en plus basses par la liquéfaction de l'hydrogène et de l'hélium.

L'une de ces propriétés dont il a poussé l'étude le plus loin possible est la conductibilité électrique.

On savait déjà depuis longtemps, à l'époque où Kammerlingh Onnes commença ses essais, que la résistance électrique des métaux n'est pas constante; elle diminue de 1 250 environ par abaissement d'un degré de température. Ainsi, dans l'air liquide, la résistance d'un fil de cuivre est 5 fois moindre qu'à la température ordinaire. Dans l'hydrogène, surtout dans l'hélium, elle diminue dans une proportion beaucoup plus considérable.

Résumons ici quelques-unes des expériences du savant hollandais.

Un filament de mercure pur (la pureté des métaux soumis aux essais doit être aussi grande que possible, car les substances étrangères faussent les résultats), enfermé dans

LE FROID

un tube capillaire, est plongé dans de l'hélium. On remarque, à l'aide d'appareils très précis, que sa résistance décroît régulièrement jusqu'à ce qu'il subisse la température de $4^{\circ},2$ absolus (comptés à partir du zéro absolu). Ensuite, elle tombe brusquement jusqu'à atteindre une valeur pratiquement nulle.

Comme conséquence de ce fait, la conductibilité du fil devient infiniment grande. Un fil dans cet état constitue un *supra-conducteur*.

Différents métaux ont été soumis à cette température voisine du zéro absolu.

M. Onnes a observé que la supra-conductibilité se manifeste à des températures variables, selon la nature des métaux. Ainsi elle apparaît à $6^{\circ},9$ absolus avec le plomb et le radium G, à $3^{\circ},8$ avec l'étain, à $2^{\circ},3$ avec le thallium.

Dans ces conditions, le passage du courant dans un fil métallique ne produit plus aucune élévation de température et l'expérimentateur a pu faire passer un courant de 1 200 ampères dans un fil de 1 millimètre carré de section sans constater d'échauffement.

S'il était possible de construire une ligne de transport d'énergie électrique en état de supra-conductibilité entre Paris et Pékin, par exemple, il ne se produirait aucune perte sur cette ligne et la totalité du courant envoyé parviendrait intégralement à sa destination, même si le fil n'avait qu'une fraction de millimètre de diamètre.

Cette conséquence originale et toute théorique de la supra-conductibilité est encore dépassée par les résultats de l'expérience suivante.

Une bobine constituée par 1 000 tours d'un fil de plomb de un soixante-dixième de millimètre carré de section a été refroidie à $1^{\circ},8$ absolu.

LES TRÈS BASSES TEMPÉRATURES

Placée sous l'influence d'un puissant champ électrique, puis soustraite à l'action de ce champ, elle a conservé, pendant toute la durée de son immersion dans l'hélium liquide, un courant d'induction de 0,5 ampère.

Un tel phénomène demandait une explication.

Le savant hollandais n'a pas hésité à trouver là la confirmation de l'une des plus audacieuses idées d'Ampère. Celui-ci admettait l'existence de faibles courants à l'intérieur des molécules des corps magnétiques, courants qui restent stationnaires parce qu'ils ne rencontrent pas de résistance. Mais, si on approche un champ magnétique, ils s'orientent tous dans le même sens.

La résistance d'un conducteur proviendrait donc des espaces intermoléculaires. Dès que les molécules sont portées au zéro absolu, elles se contractent, se rapprochent, en annulant les espaces qui les séparaient. La résistance n'existe plus. Et Kammerlingh Onnes a donné le nom de *courants d'Ampère* à ces courants persistants qui, loin de constituer une anomalie, confirment nettement la théorie émise cinquante ans plus tôt par l'illustre savant français.

Quant aux propriétés magnétiques des métaux, un fait domine toutes les expériences effectuées aux très basses températures, c'est l'existence du *magnéton*, que l'on pourrait considérer comme l'unité fondamentale du magnétisme (en réalité, le magnéton est le *moment* magnétique). Aux basses températures, les alliages d'acier et de nickel deviennent magnétiques et quelques-uns d'entre eux conservent même indéfiniment cette propriété.

Les contractions moléculaires, que l'on trouve à la base des phénomènes observés sur les corps soumis à des températures très basses, donnent encore naissance à d'autres phénomènes très curieux. Ainsi, certains corps subissent des changements de coloration. La fleur de soufre, le vermillon,

LE FROID

deviennent blancs. Des corps, phosphorescents, perdent cette qualité, tandis que d'autres l'acquièrent. La phosphorescence du sulfure de zinc est beaucoup plus intense dans l'air liquide qu'à la température ordinaire. Les gaz solidifiés deviennent également phosphorescents.

Au cours d'une expérience, Végard a constaté, dans l'azote solide, la présence d'une raie verte observée dans les aurores boréales; il en a conclu que ces phénomènes atmosphériques pouvaient être dus à la présence de cristaux d'azote dans la très haute atmosphère.

Au point de vue chimique, les basses températures ralentissent peu à peu la vitesse des réactions et finissent par les annuler. A -125° , l'acide sulfurique congelé ne se combine pas à la soude caustique. Le potassium, qui « brûle dans l'eau » (c'est l'hydrogène libéré qui s'enflamme), demeure inerte dans l'air liquide. Mais si on réalise la « concentration » beaucoup plus complète du comburant oxygène en lui donnant, par le froid, la forme liquide, les réactions se trouvent considérablement favorisées. Ainsi, une allumette brûle avec plus d'éclat dans l'oxygène liquide que dans l'oxygène gazeux. Si on plonge dans l'oxygène liquide un charbon de lampe à arc dont l'extrémité a été portée au rouge, la lumière devient éblouissante et la chaleur dégagée est telle que l'on peut se brûler la main en l'approchant de l'éprouvette. Le charbon de bois pulvérisé, l'alcool, le pétrole, le coton, plongés dans l'oxygène liquide et enflammés à l'aide d'une capsule de fulminate, explosent avec une très grande violence.

Ces phénomènes s'expliquent par le fait que l'oxygène gazeux pur est quatre fois plus actif que l'air. Comme l'oxygène liquide représente 800 fois son volume d'oxygène gazeux, il est par conséquent $800 \times 4 = 3\ 200$ fois plus actif que l'air.

CHAPITRE VI

COMMENT L'INDUSTRIE PRODUIT LE FROID

Les fluides frigorigènes. || Les machines à compression. || Le condenseur. || L'évaporateur. || Les machines frigorigènes à absorption. || Les machines à vapeur d'eau. || Les machines à air. || Les machines endothermiques. || Le rendement des machines frigorigènes. || Les frigorigères. || La détente directe. || Comment on conserve le froid dans les chambres froides. || Nouveaux isolants.

LES FLUIDES FRIGORIGÈNES. *o o* Les machines frigorigènes peuvent utiliser, pour leur fonctionnement, des fluides choisis parmi ceux qui passent le plus facilement de l'état liquide à l'état gazeux et *vice versa*, c'est-à-dire les plus instables.

Ce sont : le gaz carbonique (anhydride carbonique), le gaz ammoniac (ammoniaque anhydre), le gaz sulfureux (anhydride sulfureux) et le chlorure de méthyle. Les uns et les autres ont leurs qualités et leurs inconvénients.

On reproche à l'acide carbonique, qui est une combinaison de carbone et d'oxygène, d'être un asphyxiant sournois, puisqu'il ne révèle sa présence ni par une odeur quelconque, ni par la moindre coloration. Comme il est plus lourd que l'air (densité 1,5), il s'accumule sur le sol, surtout dans les aies des navires où il serait employé imprudemment comme frigorigène, et peut être l'auteur d'accidents. On évite cet inconvénient en assurant une large aération des locaux. Lorsque l'acide carbonique est pur, il est sans action sur les métaux.

Si nous nous souvenons que les températures de liquéfac-

LE FROID

tion d'un gaz varient avec les pressions qu'il supporte, nous devons ajouter, pour justifier l'utilisation de l'acide carbonique dans les machines frigorifiques, qu'il se liquéfie à -78° à la pression atmosphérique, à zéro degré sous une pression de 37 kilogrammes par centimètre carré, à $+15^{\circ}$ sous une pression de 52 kilogrammes et à $+29^{\circ}$ sous une pression de 72 kilogrammes. Au-dessus de 31° centésimaux, il ne se liquéfie plus, quelle que soit la pression. Il est facile, dans ces conditions, de le liquéfier et de le rappeler à l'état gazeux pour lui faire subir le cycle des transformations au cours desquelles il absorbera de la chaleur, autrement dit, il fournira du froid.

Le gaz ammoniac est une combinaison d'azote et d'hydrogène. Comme il est toujours légèrement impur, il attaque le cuivre. Il convient donc de construire les appareils en fer. Il présente également l'inconvénient de se dissoudre dans les huiles de graissage en formant une mousse qui, entraînée dans les canalisations, nuit au bon fonctionnement de la machine. Aucun danger d'explosion n'est à craindre, car la décomposition ne se produit qu'à haute température et la quantité d'air susceptible de rentrer dans les canalisations est toujours insuffisante. Quant aux pertes du gaz qui peuvent vicier l'atmosphère, elles sont sans danger, parce que sa présence est décelée aussitôt par une odeur très caractéristique. Cette odeur est perceptible dès que la proportion du gaz dans l'air atteint un dix-millième. L'inflammation des muqueuses ne peut être à craindre qu'à partir de 0,03 p. 100. L'ammoniacque devient liquide à -34° à la pression atmosphérique et, à $+25^{\circ}$, il n'exige qu'une pression de 12 kilogrammes.

Le gaz sulfureux est un gaz suffocant; il provoque la toux et, comme le précédent, décèle ainsi immédiatement sa présence dans l'air. C'est encore un fluide facilement liqué-

PRODUCTION INDUSTRIELLE DU FROID

fiable, puisqu'il passe à l'état liquide à -10° sous la pression atmosphérique et, sous une pression de 4 kilogrammes, à $+25^{\circ}$.

Enfin, le chlorure de méthyle (acide chlorhydrique et alcool méthylique ou esprit de bois) possède une odeur d'éther. Egalement très docile, il se liquéfie à -23° à la pression atmosphérique et à $+20^{\circ}$ sous 5 atmosphères seulement. La glycérine doit être utilisée comme lubrifiant.

On n'emploie pas l'un ou l'autre de ces fluides sans raisons apparentes et les constructeurs établissent une sorte de balance entre les qualités et les défauts de chacun d'eux, en tenant compte de leur puissance frigorifique. Nous aurons l'occasion de préciser, au cours des chapitres suivants, les meilleures conditions d'utilisation.

Posons maintenant les principes de fonctionnement des machines frigorifiques qui sont à compression, à absorption, à évaporation d'eau par le vide, à détente ou à réaction endothermique.

LES MACHINES A COMPRESSION. Ce sont les plus répandues, parce qu'elles présentent une grande sécurité, exigent un faible entretien et sont d'une conduite facile. Leur fonctionnement est basé sur les deux phénomènes d'évaporation et de liquéfaction d'un des fluides précédents régulièrement assurés par l'intermédiaire d'un compresseur.

Si, dans un réservoir auquel on peut donner la forme d'un serpentín, on enferme un liquide comme l'ammoniaque, par exemple, et que, à l'aide d'une pompe, on produise une dépression dans le serpentín, le liquide s'évaporerá rapidement. Or, cette évaporation brusque ne peut s'effectuer qu'avec un emprunt de chaleur à l'air ambiant qui entoure le réservoir. Cet air va donc se refroidir, en entraînant le refroidissement de la pièce dans laquelle il se trouve. Cette pièce

LE FROID

devient une chambre froide et le serpentín constitue l'évaporateur de l'installation.

Une installation frigorifique ne peut être aussi simplement conçue, car elle doit réaliser non seulement l'évaporation du liquide, mais aussi assurer le retour des vapeurs à l'état liquide, si l'on ne veut pas être obligé constamment de renouveler la provision. Une telle solution serait, en effet, si peu économique que l'industrie du froid rentrerait dans la catégorie des industries de grand luxe.

Pour faciliter le retour à l'état liquide, un compresseur est nécessaire; or, celui-ci exige, pour fonctionner, le concours d'un moteur, soit à essence, soit, le plus généralement, électrique. D'autre part, le rendement serait encore très mauvais si l'on se contentait de refroidir l'atmosphère ambiante en lui empruntant des calories pour assurer l'évaporation et si la condensation s'effectuait à l'air libre. C'est pourquoi les installations frigorifiques, même celles destinées aux usages domestiques, se présentent dans des conditions que nous ne qualifierons pas d'extrêmement compliquées, mais qui nécessitent cependant l'intervention d'organes et de liquides accessoires indispensables à la production économique du froid.

En principe, le compresseur, à double effet, a pour fonction d'assurer une circulation ininterrompue du fluide refroidisseur en facilitant ses changements d'état successifs. Le serpentín de l'évaporateur plonge entièrement dans un réservoir contenant un liquide incongelable, que l'on nomme la *saumure* et qui peut être une dissolution de chlorure de sodium (sel marin), de calcium ou de potassium. Ce liquide, constamment maintenu à une basse température par l'évaporation du fluide vital, est envoyé dans une canalisation qui se développe dans la chambre froide.

Cette dernière peut être aussi bien une succession de salles qu'une salle unique ou même qu'une simple armoire frigo-

PRODUCTION INDUSTRIELLE DU FROID

rifique; tout dépend de l'importance de l'installation. On y resserre les denrées à conserver par le froid.

Enfin, comme la compression du gaz actif s'accompagne toujours d'un dégagement de chaleur, il est encore obligatoire de se débarrasser des calories engendrées pour assurer la condensation.

Notre dessin schématique (fig. 18) résume l'ensemble de toutes ces conditions.

Le compresseur est à double effet.

Quand le piston

descend, il ouvre la soupape S_2 , qui aspire les gaz venant du serpentín évaporateur; la soupape S_1 s'ouvre également pour refouler dans le condenseur les gaz admis précédemment sous l'autre face du piston. En effet, dès que le piston remonte, les soupapes S et S_1 se ferment tandis que les soupapes S_2 et S_3 s'ouvrent; l'aspiration s'effectue alors par S et le refoulement par S_3 .

De la marche du compresseur dépend le bon fonctionnement de l'installation. Il doit être construit avec des matériaux non attaquables par les gaz qui le traversent, exempt de fuites qui se produiraient entre la tige du piston et l'enveloppe du compresseur si l'on n'avait soin de fermer hermétiquement le passage aux gaz comprimés à l'aide de presse-étoupes.

Leur construction dépend, d'ailleurs, du fluide utilisé. Dans le système Linde, à anhydride carbonique, les compresseurs

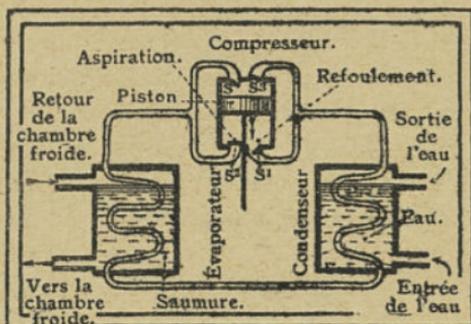


Fig. 18. — Principe des installations à compression.

LE FROID

sont à deux étages. Ils comportent deux cylindres de diamètres différents parcourus par deux pistons fixés sur la même tige (fig. 19). L'aspiration à l'évaporateur est assurée

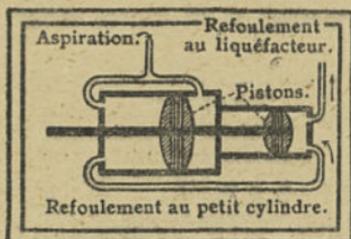


Fig. 19. — Compresseur à deux cylindres.

par le cylindre de grand diamètre qui refoule les gaz dans celui de petit diamètre, lequel les porte à leur tension normale pour les refouler dans le condenseur. Certains compresseurs sont à double enveloppe avec circulation d'eau de refroidissement, ceux à anhydride

sulfureux, par exemple. On utilise également des compresseurs rotatifs (fig. 20), mais ils ne conviennent qu'aux fluides se liquéfiant sous une faible pression comme le chlorure de méthyle et le chlorure d'éthyle. L'un d'eux est représenté schématiquement ci-dessous. Voici comment il fonctionne.

Dans un cylindre fixe (stator) auquel aboutissent les tuyauteries d'aspiration et de refoulement, se meut un autre cylindre, désaxé par rapport au premier; c'est le rotor, qui porte des aubes susceptibles de rentrer et de sortir, par des dispositifs divers, dans des glissières.

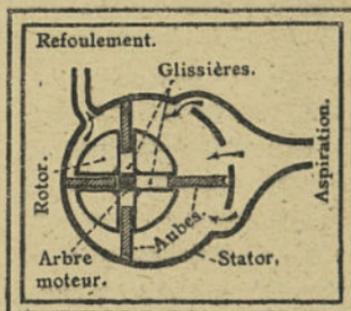


Fig. 20. — Compresseur rotatif.

tourne, les aubes frottent contre la paroi interne du stator et constituent des chambres d'aspiration et de refoulement. Les premières ont un volume très supérieur à celui des se-

PRODUCTION INDUSTRIELLE DU FROID

condes; mais chaque compartiment est à capacité variable. On comprend que le taux de la compression soit proportionnel aux volumes respectifs des chambres.

LE CONDENSEUR. *∅ ∅* Le condenseur représenté schématiquement dans notre dessin de principe appartient au type dit à immersion parce qu'il est entièrement immergé dans la cuve qui le renferme. On réalise le principe du contre-courant en obligeant l'eau qui sert de réfrigérant à circuler de bas en haut, alors que le fluide circule de haut en bas dans le serpentin.

Souvent le condenseur, qui est aussi appelé liquéfacteur, comporte plusieurs serpentins aboutissant tous à une tubulure unique de sortie.

Enfin, pour que chaque serpentin soit placé dans les mêmes conditions thermiques que ses voisins, on agite constamment l'eau qui les baigne en faisant tourner une hélice dans sa masse.

Le condenseur à immersion est un grand consommateur d'eau; c'est là un reproche qui lui est souvent adressé; de plus, cette eau doit être exempte de corps étrangers qui contrarieraient les échanges thermiques.

Aussi le remplace-t-on fréquemment par des condenseurs à tubes concentriques (fig. 21). C'est un autre genre de serpentin dans lequel la cuve de circulation d'eau est remplacée par un second tube de gros diamètre enveloppant le premier. Les vapeurs du fluide circulent dans le tube intérieur et l'eau, dans le tube extérieur, toujours à contre-courant.

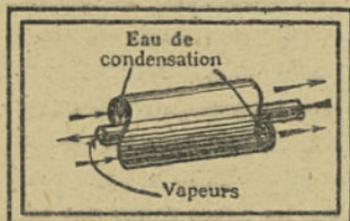


Fig. 21. — Tubes concentriques d'un condenseur.

LE FROID

Enfin, certains constructeurs, estimant que le nettoyage de ces tubes est difficile, ont adopté le condenseur à ruissellement (fig. 22). Il est encore constitué par un réseau de tubes disposés horizontalement et recevant les vapeurs à

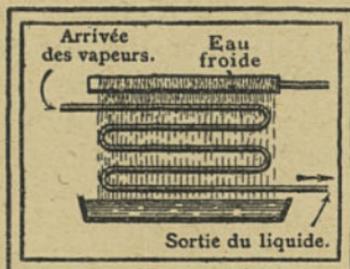


Fig. 22. — Condenseur à ruissellement.

condenser ; mais l'eau froide est amenée dans un distributeur situé au-dessus du réseau tubulaire et comportant autant de gouttières qu'il y a de rangées horizontales de tubes ; chaque gouttière déverse son trop-plein sur la rangée placée immédiatement sous elle.

L'eau s'empare des calories et s'évapore partiellement, de sorte que le refroidissement est parfaitement assuré. On installe toujours ces condenseurs — quand on le peut — dans des endroits élevés, sur la toiture des constructions où ils sont exposés à un courant d'air qui favorise l'évaporation.

En Amérique, on utilise un autre genre de condenseur appelé liquéfacteur-récipient. C'est un appareil à immersion, mais les vapeurs à liquéfier pénètrent directement dans la cuve, hermétiquement close, tandis que l'eau de refroidissement circule dans les serpentins. Comme la vitesse du fluide est faible dans le récipient, son contact est mieux assuré avec les tubes froids des serpentins.

L'ÉVAPORATEUR. Ici encore, nous retrouvons une cuve à serpentins, à peu près semblable à celle du condenseur à immersion. Mais le serpentin est relié par la base au condenseur qui lui envoie le fluide liquéfié. La chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide, évaporation favorisée

PRODUCTION INDUSTRIELLE DU FROID

par la dépression due à l'aspiration du compresseur, est extraite du liquide qui entoure le ou les tubes: la saumure. Celle-ci se maintient, pendant que la machine fonctionne, à la température voulue.

L'échange des températures a lieu par convection, les molécules de la saumure se refroidissant au contact du tube et tombant ensuite vers le fond du réservoir. On favorise l'opération en agitant le liquide avec un appareil à palettes.

C'est à partir de l'évaporateur, avons-nous dit au début de ce chapitre, que le froid est introduit dans les chambres froides par des canalisations dans lesquelles circule la saumure. Comme les frigories produites doivent être conservées avec un minimum de déperdition, on entoure le réfrigérant et les canalisations de substances calorifuges, dont la plus répandue est le liège aggloméré. On façonne des coquilles semi-cylindriques dont on enveloppe les tuyauteries et que l'on maintient avec une bande de toile antiseptique. Nous aurons plus loin l'occasion de préciser cette question du calorifugeage.

LES MACHINES FRIGORIFIQUES A ABSORPTION.

▮ ▮ Ces machines sont également dites à *affinité* parce qu'elles sont basées sur la tendance que possèdent certains corps à se combiner, en particulier sur l'affinité de certains liquides pour certains gaz suivant la température. Les deux corps mis en présence dans la construction de ces machines frigorifiques sont l'eau et le gaz ammoniac. L'eau dissout d'autant plus de ce gaz que sa température est plus basse. Ainsi, à la pression atmosphérique, à 50°, elle dissout 380 grammes d'ammoniaque, tandis qu'elle en dissout 900 grammes à zéro degré. Plus la pression s'élève, plus la solution saturée peut contenir de gaz.

La dissolution du gaz dans l'eau s'accompagne toujours

LE FROID

d'une forte production de chaleur, tandis que le dégagement s'effectue avec absorption de chaleur, phénomènes semblables à ceux que l'on observe pendant la compression d'un gaz et pendant son évaporation. C'est pourquoi certains constructeurs ont été tentés par l'affinité; mais ces machines ne se construisent plus guère en France. Nous en parlons cependant, parce qu'elles tendent à nous revenir sous la forme d'appareils ménagers.

Voici comment elles se comportent :

Une solution saturée est introduite dans un appareil appelé *bouilleur* chauffé en permanence par une circulation de vapeur. Le gaz ammoniac se dégage, accompagné d'un peu de vapeur d'eau, et, sous l'action de la pression intérieure, se rend dans un condenseur où il se liquéfie. Le liquide qui s'échappe contient très peu d'eau.

Un régulateur permet de l'envoyer dans l'*évaporateur-réfrigérant*, où il reprend l'état gazeux en absorbant de la chaleur prise à la saumure. Celle-ci se refroidit.

Le gaz se rend ensuite à un autre appareil, appelé *absorbeur*, où il trouve une solution (eau et gaz) venant du bouilleur et qui contient peu de gaz

ammoniac. Cette solution appauvrie s'enrichit par l'apport de gaz et fait retour au bouilleur par l'intermédiaire d'une pompe. Le cycle est terminé (fig. 23).

On remarque que la solution contenue dans l'absorbeur

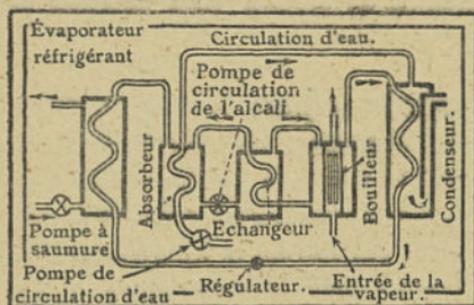
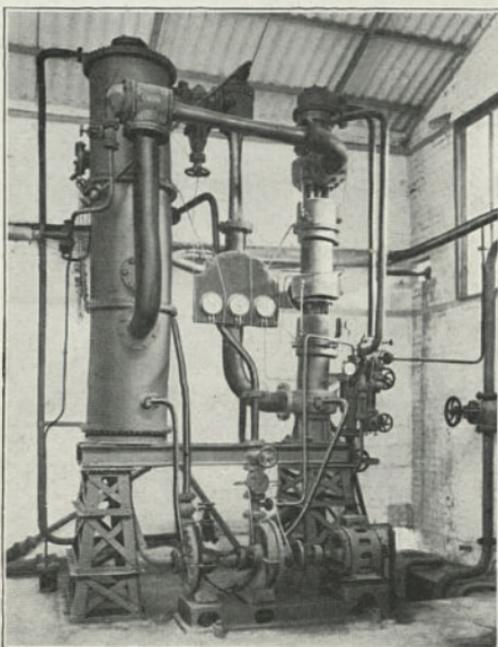
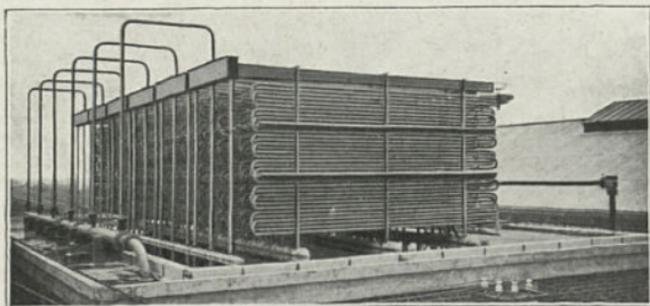


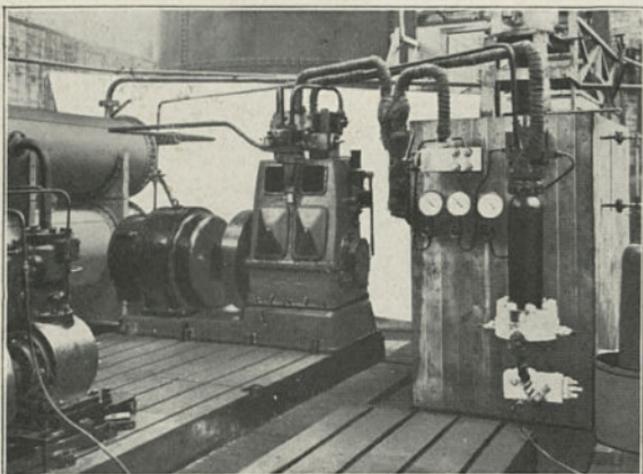
Fig. 23. — Principe d'une machine à absorption.



MACHINE FRIGORIFIQUE A VAPEUR D'EAU S. C. A. M. FOLLAIN
DE 100 000 FRIGORIES-HEURE

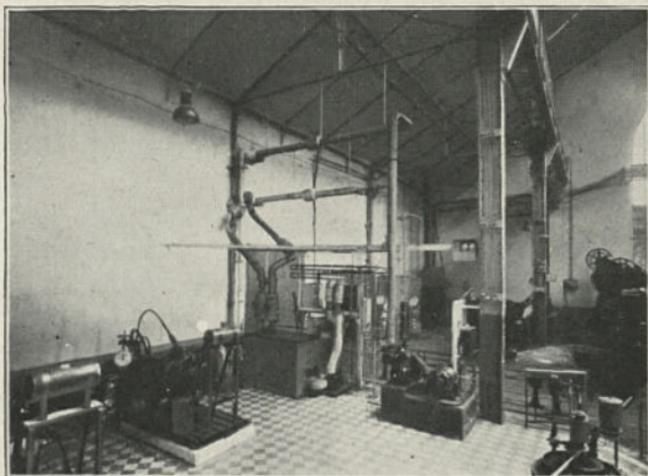


CONDENSEUR A RUISSELLEMENT.
(Ateliers et Chantiers maritimes.)



ESSAI DES COMPRESSEURS.

(Ateliers et Chantiers maritimes du Sud-Ouest, à Bordeaux.)



Cl. Hachette.

ÉCOLE DES ARTS ET MÉTIERS.

Usine Fixary.

PRODUCTION INDUSTRIELLE DU FROID

est rafraîchie par une circulation d'eau afin de la mettre dans les conditions les plus favorables pour réaliser l'absorption du gaz. C'est encore dans le but de préparer ce refroidissement que l'on fait passer la solution appauvrie provenant du bouilleur dans un *échangeur de température* où elle abandonne une partie de ses calories à la solution enrichie qui commence ainsi à se réchauffer avant de pénétrer dans le bouilleur.

On construit beaucoup de ces machines aux États-Unis. Avantageuses en ce sens qu'elles suppriment le compresseur, leur rendement est cependant inférieur à celui des machines à compression, parce que, étant plus importantes, elles accusent de plus grandes pertes de calories par les parois des appareils et par les tuyauteries et que la sortie du gaz ammoniac s'accompagne toujours de vapeur d'eau que l'on retrouve dans le liquide ammoniac.

En pratique, ces machines ne sont réellement avantageuses que si l'on dispose d'une chaudière à vapeur affectée à d'autres usages.

LES MACHINES A VAPEUR D'EAU. *▯ ▯* La machine à vapeur d'eau dérive de celle imaginée, en 1867, par Edouard Carré pour l'usage domestique. Nous en parlerons plus loin, après avoir simplement rappelé qu'elle est basée sur l'évaporation de l'eau contenue dans une carafe, les vapeurs étant absorbées par de l'acide sulfurique. Mais il est difficile et onéreux de déshydrater l'acide; c'est pourquoi ces machines ne peuvent être utilisées que pour la production d'une faible quantité de froid, frapper une carafe, par exemple.

Un ingénieur français, M. Maurice Leblanc, est parvenu, à la suite de retentissants travaux sur la condensation, à réaliser une machine frigorifique à vapeur, modifiée récemment par M. R. Follain, ingénieur en chef à la

LE FROID

Société de condensation et d'applications mécaniques.

C'est une machine à éjecteurs, mais l'évaporation et la condensation s'y effectuent en cascade, c'est-à-dire en étages dont le nombre varie avec les conditions d'utilisation.

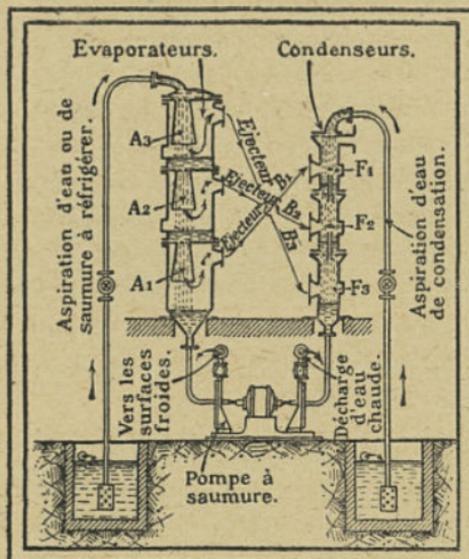


Fig. 24. — Dessin schématique de la machine frigorifique à vapeur d'eau Scam-Follain. A₁, A₂, A₃, évaporateurs ; F₁, F₂, F₃, condenseurs à mélange. Les évaporateurs et les condenseurs sont reliés deux à deux par les éjecteurs B₁, B₂, B₃.

Ces trois condenseurs sont également superposés et parcourus en série par l'eau de condensation. L'évaporateur le plus chaud (supérieur) est réuni par son éjecteur au condenseur le plus chaud (inférieur), l'évaporateur le plus froid (inférieur), au condenseur le plus froid (supérieur), et ceux à température moyenne également reliés entre eux.

Dans cette machine, la valeur des vides va en diminuant

Notre dessin (fig. 24) schématise la construction d'une machine à trois étages. Chacun des évaporateurs est desservi par un éjecteur spécial. L'eau, ou la saumure à refroidir, traverse successivement les trois évaporateurs et s'écoule par gravité d'un étage à l'autre. On voit qu'à chacun des éjecteurs est associé un condenseur spécial dans lequel il débou-

PRODUCTION INDUSTRIELLE DU FROID

du condenseur supérieur au condenseur inférieur ; néanmoins, l'eau s'écoule par gravité de l'un dans l'autre, grâce à la pression de la colonne d'eau qui se rassemble au fond de chacun des condenseurs.

Les frigories sont donc produites par échelons dans trois machines en série dont les appareils de compression (diffuseurs) fonctionnent, néanmoins, en parallèle. S'il s'agit, par exemple, de refroidir 20 mètres cubes d'eau par heure de 15° à 0°, soit de produire 300 000 frigories-heure, le liquide sera refroidi de 15° à 10° dans le premier évaporateur, de 10° à 5° dans le deuxième et de 5° à 0° dans le troisième.

Il en résulte ce fait que le rapport de compression de chacun de ces éjecteurs a pu être réduit à environ la moitié de ce qu'il devrait être avec un éjecteur unique. La quantité de vapeur exigée se trouve ainsi notablement réduite et, de ce fait, l'eau de condensation nécessaire également moins abondante.

LES MACHINES A AIR. ¶ ¶ Ce furent les premières machines frigorifiques. Elles sont basées sur le principe de la compression de l'air et sur sa détente, qui a été mis en pratique pour la production de l'air liquide. Un réfrigérant intermédiaire refroidit l'air aussitôt après la compression, avant son entrée dans le détendeur où il se refroidit pour pénétrer ensuite dans les chambres froides.

LES MACHINES ENDOTHERMIQUES. ¶ ¶ Ce sont toujours de petits appareils basés sur le mélange de deux corps constituant un mélange réfrigérant. Elles ne sont employées que dans les petits appareils domestiques, à cause de leur faible rendement. Nous les étudions plus loin.

LE RENDEMENT DES MACHINES FRIGORIFIQUES.
¶ ¶ Quand on veut évaluer le rendement d'une installation

LE FROID

frigorifique, on mesure la quantité de glace qu'elle peut produire par cheval et par heure. Il est d'environ 25 kilogrammes dans les installations fonctionnant entre les températures de -15° à l'évaporateur et $+25^{\circ}$ au liquéfacteur. Si la température baisse à l'évaporateur, le rendement diminue. Ainsi, une installation fonctionnant aux températures de -30° à l'évaporateur, et de $+25^{\circ}$ au liquéfacteur ne donne plus que 11 kilogrammes de glace par cheval-heure. C'est que, lorsque la température est très basse à l'évaporateur, la fin de la compression s'accompagne d'une grande élévation de température qui nécessite un important afflux d'eau au condenseur, ce qui diminue le rendement.

Pour réduire l'accroissement de température à la compression, on a recours au système dit à *compression étagée*. Dans une machine à deux étages, par exemple, c'est-à-dire à deux corps cylindriques, le premier cylindre, appelé cylindre à *basse pression*, aspire le gaz de l'évaporateur et le refoule à 3,5 atmosphères dans un réservoir refroidi par une circulation d'eau où il se met à la température de 60° . Le deuxième cylindre, à *haute pression*, aspire dans ce réservoir et comprime à 10 atmosphères pour envoyer le gaz dans le condenseur où il arrive à la température de 96° . Or, un cylindre unique refoulant d'un seul coup à 10 atmosphères eût porté le gaz à 178° .

Ce système est appliqué dans les grosses installations où la compression peut être réalisée en quatre ou cinq étages dans des compresseurs centrifuges constitués, comme les turbines à vapeur, par des roues à aubes, mais qui tournent dans des chambres séparées.

Le gaz, venant de l'évaporateur, pénètre dans la première roue du compresseur par l'axe de rotation; comme cette roue tourne à une grande vitesse (ces compresseurs sont actionnés par des turbines, delà le nom de turbo-compresseurs), le

PRODUCTION INDUSTRIELLE DU FROID

gaz est projeté à la périphérie de la roue par la force centrifuge et là il acquiert une certaine pression et une certaine température; on réduit cette dernière en faisant passer le gaz dans un refroidisseur. De là, il est repris par la deuxième roue du compresseur qui le comprime un peu plus, puis par une troisième, une quatrième, etc. En fin de compte, on obtient de très grandes puissances frigorifiques. Ainsi, un turbo-compresseur à six roues, actionné par une turbine à vapeur de 300 chevaux, peut produire 6 400 kilogrammes de glace à l'heure.

LES FRIGORIFÈRES. Il ne suffit pas d'envoyer du froid dans une chambre pour obtenir une conservation parfaite des denrées; il faut encore que l'atmosphère soit épurée et qu'elle contienne un degré d'humidité déterminé par la nature de ces

denrées. Les frigorifères interviennent pour réaliser ces conditions. Ils sont secs ou humides.

Les premiers sont réalisés par la circulation de la saumure ou par celle de l'agent frigorifique même contenu dans la machine.

Dans les seconds, l'air vient se refroidir au contact même de la saumure tombant en pluie; ce sont les frigorifères à ruissellement (fig. 25). On peut également faire tourner des disques plongeant à moitié dans un bain de

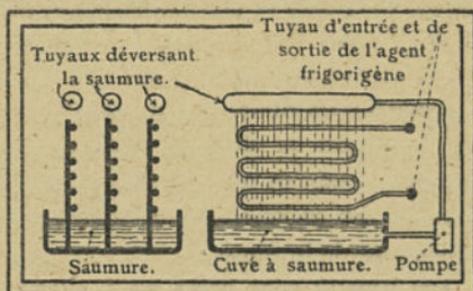


Fig. 25. — *Frigorifère à ruissellement.* L'agent frigorifique se détend dans les tuyaux, refroidit la saumure et l'air qui traverse cette saumure.

LE FROID

saumure, l'autre partie étant parcourue par un courant d'air envoyé par un ventilateur. Ces frigorifères sont dits à disques (fig. 26).

Quand on visite un établissement frigorifique, on remarque que tous les tuyaux sont recouverts d'une couche de

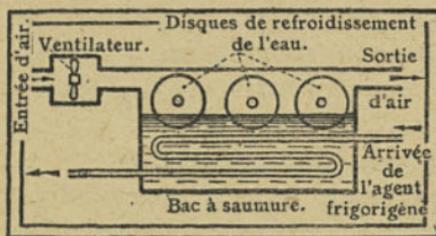


Fig. 26. — Frigorifère à disques.

givre provenant de l'humidité contenue dans l'air ambiant. Ce givre a pour effet de diminuer le pouvoir réfrigérant de l'installation; il convient donc de l'enlever. Si la tempéra-

ture du local ne doit pas être inférieure à 0° , le *dégivrage* s'effectue simplement par l'arrêt momentané de la machine. Mais, si cette température doit être maintenue au-dessous de 0° , on doit enlever la glace à la main ou envoyer dans les tuyauteries un fluide chaud. Dans tous les cas, on recueillera les fragments de glace au moment de leur chute, sans leur laisser le temps de toucher le sol. Certaines installations comportent des gouttières sous les tuyaux, pour évacuer l'eau provenant de la fonte.

Les tuyaux sont lisses ou à ailettes. Les premiers sont en fer étamé extérieurement pour éviter l'oxydation. Ils sont assemblés par l'intermédiaire de brides et de coudes en fonte pour constituer les batteries. Les tubes à ailettes sont en fonte, également réunis par des coudes, mais beaucoup moins faciles à dégivrer.

LA DÉTENTE DIRECTE. Si l'on fait circuler le fluide même dans les tuyauteries (système dit à détente directe), il est nécessaire d'employer des tubes en acier étiré,

PRODUCTION INDUSTRIELLE DU FROID

capables de résister à une forte pression. Mais la détente directe est avantageuse en ce sens que l'abaissement de température se manifeste dès la mise en route de la machine; de plus, elle évite la confection de la saumure et l'obligation d'installer un bac et des pompes de circulation. Le rendement est également amélioré, puisque le froid produit est utilisé directement dans les canalisations au lieu de servir à refroidir un fluide intermédiaire. Enfin on obtient une température plus basse dans les batteries.

Tous ces avantages, qui paraissent militer fortement en faveur de la détente directe, ne sont cependant pas parvenus à imposer le système dans les installations frigorifiques. C'est que si une fuite se produit dans les canalisations, le gaz envahit immédiatement les chambres froides et, si l'on opère avec le gaz ammoniac, les denrées peuvent être abîmées; il en est ainsi avec le gaz sulfureux. Seul, l'acide carbonique échappe à cette critique.

On reproche également à la détente directe de ne pas constituer un volant de froid, c'est-à-dire que l'action réfrigérante cesse dès que la machine s'arrête et la température des chambres remonte aussitôt. Enfin, la longueur de tuyauterie des batteries est limitée à 150 mètres, alors qu'elle peut atteindre 200 mètres pour une circulation de saumure actionnée par une pompe.

Le système n'est employé que dans les petites installations fonctionnant à l'acide carbonique et seulement dans des cas particuliers pour la réfrigération à cœur des denrées, qui s'effectue alors très énergiquement.

Dans une chambre close, le refroidissement s'effectue par convection, c'est-à-dire que, la tuyauterie étant généralement suspendue au plafond, l'air froid tombe sur les denrées suspendues au-dessous, se réchauffe à leur contact et remonte pour se refroidir à nouveau.

LE FROID

Le plus souvent, les chambres sont desservies par des canaux dans lesquels l'air, après avoir été refroidi par son passage sur un frigorifère, est envoyé par un ventilateur qui l'aspire par une autre canalisation pour le renvoyer de nouveau dans les chambres après son refroidissement. Ces canaux d'aspiration et de refoulement sont toujours construits en bois imprégné d'une solution de sulfate de fer et laqué extérieurement; on évite ainsi les condensations qui se produiraient sur le métal.

COMMENT ON CONSERVE LE FROID DANS LES CHAMBRES FROIDES. — Une chambre, chauffée à une température normale, conserve la chaleur pendant plusieurs heures, mais une chambre refroidie se réchauffe très vite. C'est que les plafonds, les murs, les produits à conserver, les fermentations que subissent certaines denrées,

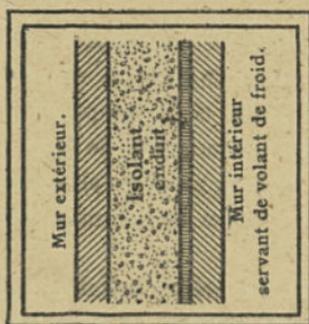


Fig. 27. — Isolement extérieur des chambres froides.

l'air extérieur introduit pour renouveler l'atmosphère, l'éclairage, la présence du personnel, sont autant de causes qui contribuent à relever la température d'une chambre froide.

Certaines de ces causes ne peuvent être évitées; mais le réchauffement par les murs est énergiquement combattu par des matières isolantes (fig. 27). Il ne suffit pas, d'ailleurs, que ces matières soient mauvaises conductrices de la chaleur. On exige d'elles des qualités que nous résumons d'après M. Banet-Rivet : être imputrescibles et non seulement exemptes de mauvaises odeurs, mais encore capables d'ab-

PRODUCTION INDUSTRIELLE DU FROID

sorber celles qui sont susceptibles de se dégager des chambres frigorifiques; ne pas être hygroscopiques; pouvoir se sécher facilement; ne pas attirer les rongeurs, ni offrir aux microbes un terrain de culture; être incombustibles; ne pas attaquer le bois, le fer ou la maçonnerie; conserver toutes leurs propriétés avec le temps; être très résistantes à la flexion et à l'écrasement.

Toutes ces qualités sont bien difficiles à incorporer dans la substance. Cependant, on est parvenu à constituer d'excellents isolants avec le liège employé de diverses manières. Sous la forme de briques, constituées par un mortier de liège granulé et d'un ciment, modelé en briques ou en plaques, il est l'isolant le plus généralement employé, avec le liège comprimé, dont la composition est à peu près la même que celle du liège en briques, mais soumis à une plus forte pression.

NOUVEAUX ISOLANTS. On préconise actuellement, de divers côtés, l'emploi comme isolants de corps qui auraient comme principale propriété d'être imputrescibles. Un brevet allemand, pris récemment, signale qu'un excellent isolant peut être constitué par de minces feuilles d'aluminium séparées par des espaces emprisonnant de l'air. Les feuilles ont au maximum 5 centièmes de millimètre d'épaisseur et les couches d'air de 1 à 2 centimètres; des supports placés de distance en distance maintiennent l'écartement nécessaire entre les feuilles, qui peuvent être appliquées sur des surfaces planes ou enroulées sur les tuyaux à calorifuger. L'humidité de l'air se condense sur les feuilles et l'eau s'écoule par la base.

Un autre isolant, le « Fosalsil », est fabriqué avec de la terre de diatomées; on lui donne la forme de briques ou de panneaux qui possèdent une faible conductibilité thermique,

LE FROID

une résistance mécanique élevée, et sont à peu près incombustibles.

Le *béton cellulaire*, inventé au Danemark par l'ingénieur Erik Christian Bayer, constitue également un isolant de tout premier ordre. Les blocs, de formes et de dimensions appropriées aux surfaces à recouvrir, comportent un grand nombre de cellules qui leur donnent une grande légèreté. Le produit est utilisé dans les installations de chauffage central à Copenhague. On a observé qu'il ne se laisse pas pénétrer par l'eau, malgré sa porosité. Ce phénomène est dû à ce fait que les pores constituent des cellules indépendantes les unes des autres. Il est constitué par une mousse tenace mélangée avec du ciment; son poids varie, suivant la fabrication, de 300 kilogrammes à 1 200 kilogrammes au mètre cube. Il peut donc flotter sur l'eau sans absorber de liquide et résiste à la gelée.

Signalons encore le « Celotex », produit américain constitué par de la fibre de canne à sucre agglomérée en panneaux, et la laine de verre, dont le fil a un millième de millimètre de diamètre, déjà employée en Allemagne autour des tuyauteries de vapeur. Des essais ont été pratiqués sur des wagons avec une épaisseur de 60 millimètres et sur des cales de navires frigorifiques; les résultats ne sont pas encore connus.



CHAPITRE VII

LA GLACE ARTIFICIELLE

La fabrication de la glace. || Le rendement d'une machine à glace. || Les glaciers. || La fabrication de la glace à domicile. || Les usages de la glace. || Les crèmes glacées.

LES machines décrites au chapitre précédent permettent de refroidir des locaux où sont entassées les substances à maintenir dans une atmosphère sèche et froide. Elles peuvent également être employées à produire de la glace, sans subir de modifications, mais en supprimant les chambres froides.

Dans ce cas, l'évaporation s'effectue dans des cuves plus ou moins vastes, remplies de saumure constamment agitée, et dans lesquelles plongent des mouleaux à glace, formes en fonte pleines d'eau qui se congèlent après un certain temps d'immersion.

La glace est un accumulateur de froid que l'on peut transporter au loin, débiter en tranches aussi petites qu'on le désire pour des usages infinis. Elle est devenue un produit de toute première nécessité, puisqu'elle permet le transport et la conservation des denrées alimentaires périssables, le rafraîchissement des boissons pendant l'été; elle vient en aide à la médecine dans le traitement de certaines affections et à la chirurgie en lui permettant de pratiquer des opérations qu'il serait impossible de tenter sans elle.

La glace est produite en pains qui pèsent 12 kg. 5, 25 kilogrammes, 40 kilogrammes et quelquefois même 50 kilogrammes. Aux États-Unis, on produit la glace en énormes blocs dont le poids atteint jusqu'à 3 tonnes 5.

LE FROID

LA FABRICATION DE LA GLACE. Le bac qui contient la saumure refroidie par l'évaporateur est généralement fait en tôle galvanisée recouverte extérieurement d'un isolant en liège. Les serpentins, disposés en plusieurs rangées longitudinales dans le fond, sont séparés du bac à mouleaux, qui occupe la partie supérieure, par une cloison perforée qui remonte verticalement vers l'une des extrémités du bac. Dans le petit espace libre ainsi ménagé tournent constamment des hélices qui agitent le liquide. Sans cette précaution,

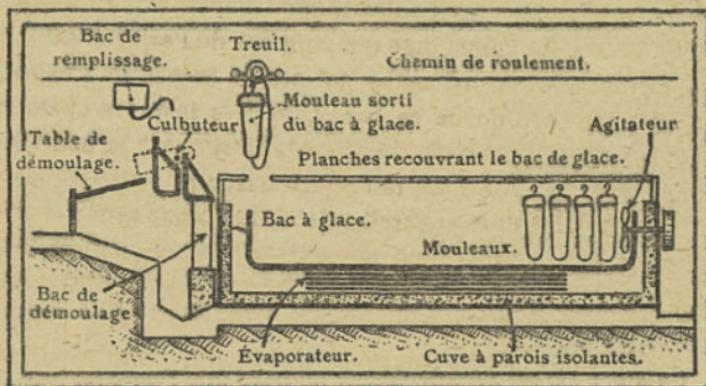


Fig. 28. — *Fabrication de la glace alimentaire. Schéma.*

la saumure froide resterait au fond du bac et les mouleaux ne seraient entourés que d'une saumure réchauffée. Certains constructeurs disposent les serpentins sur l'un des côtés du bac et les mouleaux près de l'autre face; mais l'agitation du liquide est toujours assurée par des hélices (fig. 28).

Les mouleaux sont des récipients en tôle galvanisée ou plombée pour réduire leur usure par le contact prolongé avec le bain salé. On leur donne la forme d'une pyramide tronquée pour faciliter le démoulage. Ils sont assemblés par

LA GLACE ARTIFICIELLE

huit ou dix, dans le sens de la longueur, sur des châssis métalliques qui les soutiennent dans le bac, permettent de les sortir à l'aide d'un treuil porté par un pont roulant qui les conduit sur la table de démoulage et de les ramener dans le bac après qu'ils ont été remplis d'eau.

Le temps nécessaire à la congélation dépend du volume des mouleaux. Un pain de 12kg.5 est congelé en huit heures; un pain de 40 kilogrammes en quarante heures, avec une température de -5° à -10° .

Le treuil amène les mouleaux sortis du bac de congélation dans un bac de démoulage qui contient de l'eau portée à la température de $+25^{\circ}$ ou $+30^{\circ}$ par un serpentín à vapeur placé dans le fond de ce bac. Quelques instants après la plongée dans l'eau tiède, la glace fond sur tout le pourtour des mouleaux, que l'on fait alors basculer sur une table oblique à l'aide d'un appareil spécial. Les blocs se détachent, glissent sur la table, d'où ils sont acheminés par chariots soit sur la réserve que l'on constitue pendant l'hiver, soit sur les voitures de livraison.

Les mouleaux retournent ensuite au bac remplisseur, où ils reçoivent la quantité d'eau nécessaire, et enfin au réfrigérant.

La glace obtenue par le procédé est opaque, parce qu'elle tient en suspension des sels qui, normalement dissous dans l'eau, apparaissent pendant la congélation; suivant leur nature, ils colorent la glace, qui devient opale, quelquefois même couleur de rouille. De plus, les gaz, également dissous dans l'eau, se dégagent et restent emprisonnés lorsque la congélation est rapide.

Le consommateur préfère la glace transparente, bien que la glace opaque puisse être aussi hygiénique et qu'elle refroidisse plus vite les substances soumises à son action, en raison de sa fonte plus rapide. C'est là, d'ailleurs, un autre

LE FROID

reproche injustifié que l'on fait à la glace opaque et contre lequel il est presque inutile de réagir.

On obtient une belle glace transparente en ramenant la température de congélation entre -2° et -3° ; c'est la congélation lente qui favorise l'expulsion des bulles d'air.

Certaines fabriques de glace activent cette expulsion par l'agitation de l'eau dans les mouleaux. Ce procédé n'est efficace que pendant la première période de la congélation, l'agitateur risquant d'être emprisonné dans la glace. On le retire à temps; mais, comme l'eau redevient calme, il reste, dans le pain, un noyau opaque. Pour rendre le bloc entièrement transparent, il faut retirer l'eau du noyau et la remplacer par de l'eau pure.

L'emploi de l'eau distillée constitue assurément la meilleure solution pour obtenir de la glace transparente, puisqu'elle ne contient plus de gaz; mais le procédé est d'un prix de revient coûteux, en raison de la distillation préalable.

On peut, il est vrai, utiliser la vapeur d'échappement condensée d'une machine. Ce procédé est courant en Amérique; mais cette vapeur entraîne toujours un peu d'huile de graissage, qui nécessite l'intervention d'un séparateur d'huile, d'écumeurs, de rebouilleurs et de filtres. La complication est extrême.

La société Linde procède autrement: elle emploie la vapeur d'échappement au chauffage d'une chaudière dans laquelle des pompes à air réduisent la pression à une demi-atmosphère environ. La vapeur d'eau ainsi obtenue est condensée sous pression réduite et va directement aux mouleaux. Le procédé est encore peu économique.

D'autre part, — nous insistons pour bien faire ressortir les difficultés que l'on éprouve pour produire de la glace transparente, — l'obligation où se trouvent les industries de constituer des réserves d'eau pure les entraîne à la construc-

LA GLACE ARTIFICIELLE

tion de bacs en tôle galvanisée dans lesquels la surface de l'eau est soustraite à l'action de l'air extérieur par un flotteur en bois. De plus, le remplissage des mouleaux s'effectue par la base afin d'éviter l'entraînement d'air qui se produirait infailliblement si le remplissage s'effectuait par le haut. La surface de l'eau, dans le mouleau, est donc seule en contact avec l'atmosphère, et quelques bulles d'air seulement demeurent apparentes à la partie supérieure du pain de glace.

LE RENDEMENT D'UNE MACHINE A GLACE. ▯ ▯

Plus une machine est puissante, meilleur est son rendement; c'est pourquoi la production de la glace dans un petit appareil est beaucoup plus coûteuse que dans les usines. On estime qu'un kilogramme de glace coûte à produire industriellement près de 130 calories, alors qu'il en accumule seulement 80. Cette différence provient du maintien de la saumure à -5° , surtout de la température initiale de l'eau, qui peut être à $+10^{\circ}$ ou $+15^{\circ}$. Le rendement est estimé à environ 20 kilogrammes de glace par kilogramme de charbon.

LES GLACIÈRES. ▯ ▯ On conserve encore la glace naturelle, extraite des rivières, des lacs, des étangs pendant l'hiver, dans des glacières le plus souvent aménagées dans le sol. Les parois en sont maçonnées, et la glace repose sur une grille qui laisse passer l'eau de fusion. Cette eau est recueillie dans un puisard, d'où on l'extrait de temps en temps. La maçonnerie est surmontée d'un toit en charpente recouvert d'une forte épaisseur de chaume, et ensuite de gazon. La glace se conserve parfaitement pendant l'été.

Toutes les fabriques de glace possèdent également des glacières, où elles entassent les blocs afin de constituer des réserves où l'on puise pendant l'été, lorsque la production

LE FROID

devient insuffisante pour assurer les besoins de la consommation.

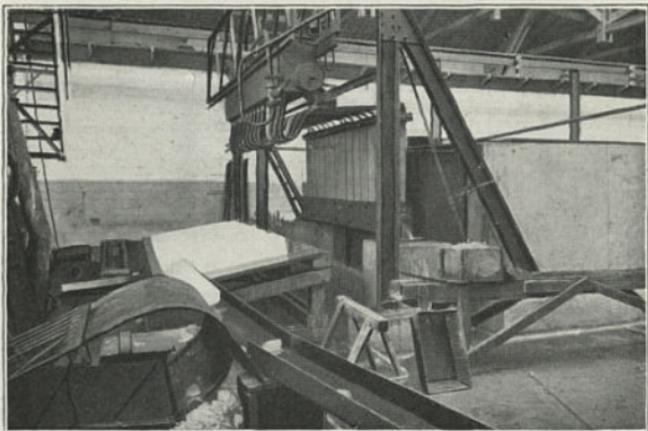
Installées dans des caves, ventilées pour empêcher le dépôt de moisissures sur la glace, refroidies par une circulation de saumure afin que la température y soit constamment inférieure à celle des blocs, qui est de -5° , elles sont desservies par des monte-charges utilisés pour la descente des blocs et leur sortie. Les pains y sont séparés les uns des autres par des faisceaux de bois qui les empêchent de se souder entre eux.

Sur les grandes distances, les expéditions se font par camions automobiles. Pour les livraisons urbaines, on utilise encore, même à Paris, des voitures à traction animale dont la carrosserie est entièrement construite en bois avec un toit en carton bitumé et une porte hermétiquement fermée, à l'arrière. Les pains sont débités par les livreurs sur le plancher même de la voiture au pic ou à la scie; les morceaux placés dans une hotte (bachot) sont livrés aux consommateurs.

LA FABRICATION DE LA GLACE A DOMICILE. *o o*

Dans les villes où existent des usines à glace, il est plus économique d'acheter le produit pour rafraîchir les boissons que de le fabriquer soi-même. Malheureusement, les petites localités ne bénéficient pas de cet avantage et les personnes qui désirent avoir de la glace, surtout pour confectionner des sorbets, doivent se procurer des appareils spéciaux.

Les plus simples sont les sorbetières, dans lesquelles on utilise un mélange réfrigérant qui peut être constitué par de l'acide chlorhydrique et du sulfate de soude, ou, mieux, par un mélange d'azotate d'ammoniaque et d'eau. On place de petits mouleaux tubulaires remplis d'eau à congeler dans le mélange et, au bout de quelque dix minutes, la glace est



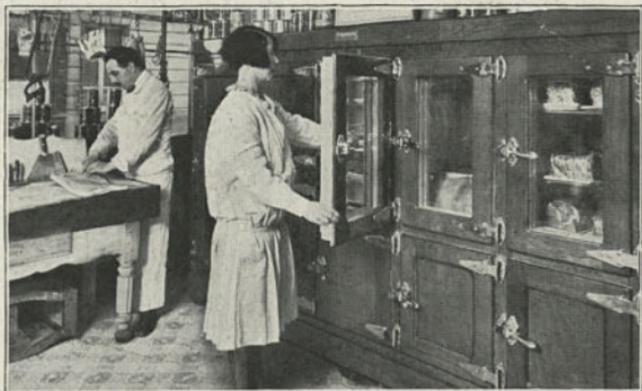
APPAREILS DE DÉMOULAGE DES PAINS DE GLACE.



EMMAGASINAGE DES BLOCS DE GLACE DANS UNE GLACIÈRE.



ARMOIRE FRIGORIFIQUE.



ARMOIRES FRIGIDAIRES DANS UN MAGASIN D'ALIMENTATION.

LA GLACE ARTIFICIELLE

prête. Le procédé peut être également utilisé pour obtenir des carafes frappées.

Voici quels sont les mélanges utilisables, avec la proportion des constituants.

1^o Eau, 1 partie; azotate d'ammoniaque, 1 partie. Température obtenue : — 16^o.

2^o Eau, 1 partie; azotate d'ammoniaque, 1 partie; carbonate de soude, 1 partie.

3^o Eau, 10 parties; azotate d'ammoniaque, 6 parties; chlorhydrate d'ammoniaque, 6 parties; sulfate de soude cristallisé, 4 parties et demie.

4^o Eau, 16 parties; azotate d'ammoniaque, 5 parties azotate de potasse, 5 parties.

En hiver on peut préparer simplement un mélange de glace pilée et de sel marin. C'est d'ailleurs ce mélange qui est employé par les glaciers dans la fabrication des crèmes glacées et sorbets. La température obtenue est de — 15^o à — 18^o. Si on remplace le sel par du chlorure de calcium (2 de glace et 3 de chlorure de calcium), on obtient une température de — 51^o.

Il existe des appareils, assez nombreux, destinés à la préparation des glaces par les mélanges réfrigérants; il en est d'autres, plus importants, dont le fonctionnement est basé sur les phénomènes physiques de l'évaporation ou de l'affinité. La plupart produisent à la fois du froid sec et de la glace; nous les étudierons dans le chapitre réservé aux petites machines frigorifiques.

LES USAGES DE LA GLACE. *o o* La glace est le réfrigérant le plus commun et le moins cher que l'on puisse trouver pour la conservation de la plupart des denrées alimentaires et pour le rafraîchissement des boissons. La plus grande partie de la glace fabriquée va directement aux gla-

LE FROID

cières privées, dans les boucheries principalement, où elle maintient à une température de 4° à 5° au-dessus de zéro, et avec la quantité d'humidité qui convient, l'atmosphère des glacières. Ce sont des meubles dont les parois garnies de liège empêchent la chaleur d'y pénétrer. La glace est entassée à la partie supérieure, et sa lente transformation en eau apporte le froid nécessaire à l'intérieur. Souvent même on se contente de placer la glace dans une caisse dans un coin d'une chambre sans fenêtre, qui devient ainsi une chambre froide.

Tous les restaurants et cafés utilisent des glacières semblables pour le rafraîchissement des boissons.

LA CRÈME GLACÉE « ICE CREAM ». ∞ ∞ L'industrie des crèmes glacées est essentiellement américaine; depuis une quinzaine d'années, elle a pris un développement prodigieux que l'on attribue au climat, particulièrement chaud en été, qui invite à la consommation de l'*ice cream*.

Cette vogue tient à ce que la crème glacée est considérée comme un aliment dont les caractéristiques constitutives sont imposées par chaque gouvernement aux industriels groupés sous le « Stars and Stripes ». C'est pourquoi l'*ice cream* diffère de la glace française par sa composition, sa confection et son goût.

En 1911, les manufactures des États-Unis ont fabriqué 139 millions de gallons (le gallon vaut 4 l. 543) d'*ice cream*, 168 millions en 1914, 231 millions en 1918 et environ 325 millions en 1927. On voit que la consommation et la fabrication des crèmes glacées prennent de l'extension de l'autre côté de l'Atlantique.

En Angleterre, la courbe de progression dépasse fortement la précédente, toutes proportions gardées; la consommation est passée, en effet, de 2 millions de gallons en 1915 à 30 millions en 1927.

LA GLACE ARTIFICIELLE

Pour ce qui concerne la France, il est impossible d'établir une statistique, même approximative, car, sauf à Paris, il n'existe nulle part de grandes manufactures; l'industrie est exercée par une foule de petits fabricants, dont la production ne relève d'aucun contrôle ni d'aucun groupement organisé.

Aux États-Unis, l'*ice cream* étant considérée comme un aliment non seulement à l'usage des personnes bien portantes, mais destiné également aux malades et aux enfants, les pouvoirs publics se sont immiscés dans la fabrication, et chaque gouvernement a édicté des normes que les manufactures doivent respecter.

Ces règles concernent la teneur des crèmes en matières solides grasses et en gélatine. Le beurre entre dans cette confection en proportion de 8 à 15 p. 100, tandis que celle de la gélatine est de 0,5 à 1 p. 100. Les manufacturiers sont donc tenus de contrôler chacune de leurs opérations au laboratoire, afin de les corriger, s'il y a lieu, en tenant compte des résultats de l'analyse.

Ce contrôle est d'ailleurs compliqué, parce que les manufactures s'imposent à elles-mêmes des formules qui leur permettent d'obtenir des produits toujours comparables à eux-mêmes et qui intéressent le pourcentage des matières solides non grasses (caséine, albumine, sels naturels minéraux) et celui de la totalité des matières solides.

Voici comment sont préparés les *ice cream* américaines.

Les matières premières : crème, lait frais, lait condensé, poudre de lait, beurre, etc., sont mélangées, après analyse, dans un bac en tôle étamée ou émaillée, muni d'un agitateur et pourvu d'un système de chauffage. Le brassage régulier sous une température déterminée transforme toutes ces matières en un produit fluide. Il est alors procédé à la pas-

LE FROID

teurisation dans une chaudière en métal émaillé, exactement comme dans les laiteries.

Ainsi préparée, la crème est ensuite refroidie par le passage sur un réfrigérant et mise en cuve de garde. Cette cuve est munie d'un serpentín rotatif dans lequel circule de la saumure froide et pourvu de palettes; on règle ainsi la température du milieu afin que la maturation s'effectue normalement.

Ce n'est pas encore l'*ice cream*, ce n'est que la matière première.

Le dernier stade de la fabrication se poursuit sous l'action du froid. Après un malaxage énergique, au cours duquel s'incorporent de petites bulles d'air, la crème se présente sous l'aspect d'une émulsion qui possède une légèreté et un veulouté que l'on ne rencontre pas dans les crèmes françaises. Différents parfums : chocolat, café, vanille, des fruits préparés, sont encore ajoutés pendant le malaxage. L'appareil utilisé est un cylindre, généralement horizontal, muni d'un agitateur et pourvu d'une double enveloppe dans laquelle circule un courant de saumure froide.

L'*ice cream* peut être aussitôt livrée à la consommation sans être moulée. Le plus souvent, on la verse dans des moules rectangulaires que l'on enferme dans des chambres froides spéciales où la température est descendue à 25° au-dessous de zéro.

Les glaces connues en France sous le nom d'*Esquimaux* sont fabriquées de la même manière. La crème versée dans le moule rectangulaire, puis congelée, est débitée à la machine en petits parallépipèdes trempés ensuite dans du chocolat ou du moka. Nous avons visité cette fabrication, qui est presque entièrement automatique; une seule des cinq machines que comporte l'usine peut produire 5 000 *Esquimaux* par jour. La même firme confectionne également des

LA GLACE ARTIFICIELLE

crèmes glacées sous la forme de « bricks » (petites briques), de tranches napolitaines, et des glaces françaises sous toute présentation.

Quelques autres maisons parisiennes se sont également spécialisées dans la confection des crèmes et entremets glacés, mais le matériel est souvent archaïque et le refroidissement obtenu par un simple mélange de glace et de sel. Ce procédé est certainement plus coûteux que ceux qui font intervenir la saumure. C'est d'ailleurs celui que l'on emploie avec les sorbetières familiales, qui possèdent au moins cet avantage de permettre la confection des glaces à domicile.

Quant au transport de ces produits glacés, il ne peut se faire qu'à l'abri de la chaleur, dans des seaux où ils sont entourés de glace.



CHAPITRE VIII

LES PETITES INSTALLATIONS FRIGORIFIQUES

Les machines à absorption. || Les machines endothermiques. || Les machines à compression. || Les armoires frigorifiques. || Les installations commerciales.

LA conservation des denrées alimentaires par le froid peut être assurée, pour certaines d'entre elles, par la glace, qui constitue un accumulateur de frigidités facile à transporter.

Mais il n'est possible de se procurer de la glace que dans les villes où existent des fabriques, ou simplement des glaciers alimentés pendant l'hiver par les étangs et les cours d'eau, dans les régions où les hivers sont rigoureux.

D'autre part, le refroidissement que l'on peut obtenir par la glace est assez limité. Le maximum de froid à en attendre est suffisant pour rafraîchir les liquides, mais trop faible et surtout trop humide pour procurer l'atmosphère sèche que réclament certaines denrées. L'air d'une glacière, ainsi refroidi, ne peut être abaissé au-dessous de $+ 12^{\circ}$.

Pour les commerçants ou les particuliers à qui le froid par la glace est celui qui convient le mieux : refroidissement des liquides, conservation du poisson, il est intéressant de fabriquer la glace eux-mêmes s'ils ne peuvent s'en procurer dans de bonnes conditions ou s'ils en consomment d'assez grandes quantités.

La substitution d'une petite installation frigorifique à l'emploi direct de la glace est à conseiller dans ce cas parce

PETITES INSTALLATIONS FRIGORIFIQUES

que le froid sec convient mieux à la conservation des aliments que le froid humide, et surtout au point de vue pécuniaire. Comme un kilogramme de glace ne fournit que 79 frigories, alors qu'il en coûte 120 à produire, il est plus avantageux d'éviter la transformation. Le bénéfice réalisé par le fabricant à qui on achète la glace, vient encore s'ajouter à cette perte, de sorte que le rendement inférieur d'une petite machine frigorifique se trouve finalement compensé.

La présentation de ces petites machines est assez différente des installations industrielles, mais le principe de leur fonctionnement est identique.

On utilise toujours l'évaporation d'un liquide : ammoniaque, acide carbonique, anhydride sulfureux, chlorure de méthyle, eau. L'évaporation a lieu dans des serpentins ou dans des réservoirs à grandes surfaces d'échange, et la chaleur nécessaire à cette évaporation est prise au milieu dans lequel ces serpentins ou ces réservoirs sont placés. Ce milieu peut être de l'eau ou un liquide incongelable. Une disposition, qui diffère suivant le type de machine, permet de reconstituer le liquide primitif avec les vapeurs sortant de l'évaporateur pour l'évaporer de nouveau. Ces machines fonctionnent donc, comme celles destinées à l'industrie en circuit fermé.

Elles sont à *compression* ou à *absorption*. Il existe encore des machines *endothermiques* qui sont les plus simples. Rappelons que les premières aspirent les vapeurs du liquide produites dans l'évaporateur et les liquéfient ensuite par compression et refroidissement dans un condenseur. Dans les machines à absorption, on reconstitue le liquide en absorbant les vapeurs sortant de l'évaporateur dans un liquide intermédiaire, qui peut être de l'eau. Ces vapeurs se dégagent ensuite par le chauffage de l'eau et sont liquéfiées dans un condenseur.

LE FROID

Nous allons décrire quelques-unes de ces machines :

LES MACHINES A ABSORPTION. Elles ne possèdent pour ainsi dire pas d'organes mécaniques. A côté de cet avantage, qui est appréciable, elles ont l'inconvénient d'exiger beaucoup d'eau et doivent être munies d'un limiteur de pression, car un chauffage trop poussé au bouilleur pourrait être la cause d'accidents.

Il existe des appareils à absorption à marche continue,

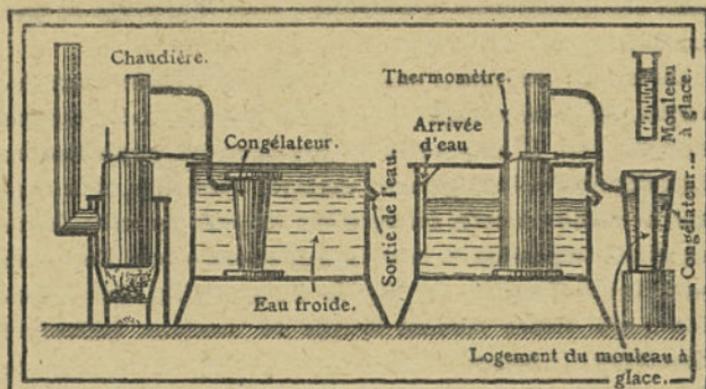


Fig. 29. — Appareil Lesoufaché Félix pour la fabrication de la glace ménagère.

assez compliqués et d'un prix trop élevé pour les modèles domestiques. La plupart des petites machines de ce genre fonctionnent à marche discontinue.

L'appareil contient alors une certaine quantité de liquide dont l'évaporation produit le froid lorsque tout le liquide est passé à l'état de vapeur et a été absorbé par l'eau.

Voici, d'ailleurs, comment fonctionne l'appareil à glace Lesoufaché Félix (fig. 29), basé sur le principe de la machine Carré.

PETITES INSTALLATIONS FRIGORIFIQUES

La chaudière contient une solution ammoniacale à 28° Baumé chauffée à feu nu; elle est reliée par un tube à l'appareil liquéfacteur dans lequel le gaz ammoniac, qui se dégage de la chaudière pendant le chauffage, vient se liquéfier au contact de l'eau froide contenue dans le bac. Le thermomètre placé sur la chaudière renseigne sur la fin de cette première opération.

Lorsqu'elle est terminée, le congélateur est retiré de l'eau et la chaudière y est plongée à son tour jusqu'aux trois quarts de sa hauteur. L'eau qu'elle contient se refroidit et, en raison de son affinité pour l'ammoniaque, absorbe les vapeurs du liquide qui entoure le mouleau à glace dans le congélateur. Cette vaporisation de l'ammoniaque étant accompagnée d'un abaissement de température, l'eau du mouleau se transforme en glace.

Ces petits appareils, semblables à celui que représente notre dessin, peuvent fournir 1 à 2 kilogrammes de glace par opération. Il en existe d'autres, plus importants, basés sur le même principe, qui produisent jusqu'à 10 kilogrammes de glace sans force motrice.

La machine à glace *Rapide* convient pour les très faibles productions de glace. Elle peut être actionnée à la main par une manivelle, ou par un petit moteur électrique. Une pompe à huile est reliée par un tube d'aspiration à une bonbonne contenant de l'acide sulfurique, et cette dernière, par un autre tube, au récipient dans lequel on met l'eau à transformer en glace. Dès que la pompe est mise en route, la dépression produite dans la bonbonne contenant l'acide sulfurique se transmet sur la surface de l'eau, qui s'évapore. En raison de l'affinité de l'acide sulfurique pour l'eau, les vapeurs sont absorbées et l'eau se refroidit rapidement. Au bout d'une dizaine de minutes, la glace est faite.

Une nouvelle machine à affinité a été imaginée par les

LE FROID

ingénieurs suédois Platen et Munters et appliquée à l'armoire frigorifique *Electro-Lux* (fig. 30). Nous n'en donnons pas une description détaillée qui serait longue et fastidieuse, mais nous en exposerons le principe en nous aidant

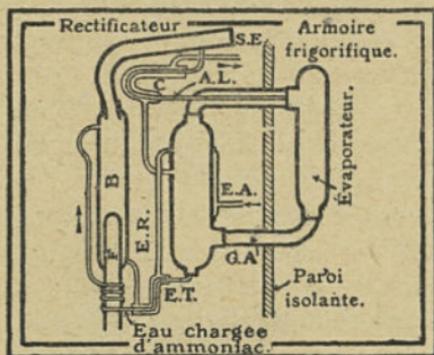


Fig. 30. — Principe de la machine à absorption « *Electro-Lux* ».

A.L., ammoniaque liquide ; S.E., sortie de l'eau ; B, bouilleur ; E.R., eau refroidie ; E.A., entrée de l'eau froide ; G.A., gaz ammoniac ; E.T., échangeur de température ; F, foyer.

absorbe le gaz pour reconstituer la solution saturée. Celle-ci fait retour à la chaudière après avoir subi un réchauffage préalable dans un échangeur de température et autour du foyer.

L'ensemble des appareils est placé à l'extérieur de l'armoire frigorifique ; seul l'évaporateur, producteur du froid, est enfermé à l'intérieur.

Le rectificateur à ailettes, que l'on remarque au-dessus du condenseur, est destiné à liquéfier les vapeurs d'eau qui accompagnent celles d'ammoniaque à la sortie du bouilleur et qui retournent immédiatement dans ce dernier appareil, par suite de l'inclinaison donnée au rectificateur.

On remarque également que l'absorbeur est refroidi par

du dessin schématique ci-contre.

La solution saturée d'ammoniaque est chauffée dans le bouilleur par un jet de gaz ou une résistance électrique. Peu à peu le gaz ammoniac est libéré. Il se liquéfie dans un condenseur à eau C, descend dans un évaporateur d'où les vapeurs se rendent dans un absorbeur alimenté par de l'eau refroidie qui ab-

PETITES INSTALLATIONS FRIGORIFIQUES

une circulation d'eau froide extérieure conjuguée avec celle du condenseur. Quant au tuyau qui relie la partie supérieure de l'évaporateur à la partie supérieure de l'absorbeur, il est destiné — et ceci constitue la caractéristique de l'invention — à établir l'équilibre des pressions à l'intérieur des deux appareils. Cet équilibre est réalisé par l'introduction de gaz hydrogène sous pression qui permet à la solution riche quittant l'absorbeur de remonter à la partie supérieure du bouilleur sans l'intervention d'une pompe comme dans les appareils Carré.

Enfin, dans l'échangeur de température, l'eau chaude prise à la base du bouilleur cède ses calories à celle qui vient de l'absorbeur ; la même eau est donc d'abord refroidie avant de pénétrer dans l'absorbeur et réchauffée à sa sortie.

LES MACHINES ENDOTHERMIQUES. ☞ ☞ Ce sont des machines basées sur le principe des mélanges réfrigérants dans lesquels la chaleur de combinaison est empruntée aux corps en présence eux-mêmes, au lieu de l'être à l'extérieur.

L'appareil *Frigoria*, qui appartient à cette catégorie renferme quatre mouleaux à glace et deux récipients tronconiques destinés à la préparation des sorbets. Le réfrigérant employé est le nitrate d'ammoniaque, qui se présente sous la forme d'un sel et que l'on peut récupérer à la fin de chaque opération. On prépare la quantité de nitrate et d'eau nécessaire et on verse en trois fois, par tiers chaque fois (un tiers de nitrate et un tiers d'eau). Après avoir mis les mouleaux en place, on tourne le batteur avec la manivelle. En vingt minutes, l'opération est terminée. Pour rafraîchir les boissons, il suffit de placer les bouteilles dans le liquide qui a servi à préparer la glace.

LES MACHINES A COMPRESSION. ☞ ☞ Les petits ap-

LE FROID

pareils à compression sont des plus recommandables lorsqu'ils ont été bien construits et munis de dispositifs facilitant la conduite et l'entretien. Ils sont à haute pression avec l'acide carbonique, à moyenne pression avec l'ammoniaque, à basse pression avec l'anhydride sulfureux, le chlorure de méthyle, le chlorure d'éthyle, ou à vide avec l'eau.

La puissance absorbée pour un même travail est à peu près la même avec chaque type de machine, car les rapports de compression, quoique différents, sont compensés par la nécessité de débiter des volumes de vapeurs également différents.

Avec la haute pression, la construction est spéciale et les fuites difficilement évitées. De plus, l'acide carbonique présente l'inconvénient de n'être liquéfiable que jusqu'à $+ 31^{\circ},35$, qui est sa température critique; il en résulte ce fait que, si l'eau du condensateur est un peu chaude, le rendement diminue.

Avec les basses pressions, les compresseurs alternatifs doivent être d'assez grandes dimensions, ainsi que les conduites; les pressions dans les évaporateurs sont souvent inférieures à la pression atmosphérique et il devient difficile d'éviter les rentrées d'air aux presse-étoupes.

Quelques constructeurs ont établi, pour les très basses pressions, des compresseurs rotatifs d'un encombrement plus réduit et d'un prix moins élevé que les compresseurs alternatifs; mais le compresseur rotatif ne doit pas présenter d'usure exagérée et sa construction est très délicate.

Aussi les appareils à pression moyenne (machines à ammoniaque) sont-ils de beaucoup les plus employés.

Avec l'ammoniaque, il faudrait, pour descendre à la pression atmosphérique dans l'évaporateur, atteindre une température de $- 31^{\circ}$ environ. Quant à la pression au condenseur, elle n'a jamais à dépasser 15 kilogrammes environ avec de

PETITES INSTALLATIONS FRIGORIFIQUES

l'eau à $+ 30^{\circ}$; les fuites et les rentrées d'air sont donc faciles à éviter. La moindre fuite est d'ailleurs décelée par l'odeur caractéristique du fluide.

Cet échappement de gaz pourrait constituer un inconvénient s'il se répandait dans l'atmosphère où sont rassemblées les denrées alimentaires; mais les constructeurs sérieux ne prévoient jamais de joints au contact des liquides ou de l'air à refroidir. Les joints sont toujours en dehors des chambres et des appareils où la présence de traces d'ammoniaque pourrait avoir des conséquences fâcheuses.

De nombreux perfectionnements ont été apportés, ces temps derniers, aux appareils frigorifiques en vue d'augmenter la sécurité pendant la marche, de simplifier la conduite au point de la rendre presque automatique et d'augmenter le rendement. Il existe même des appareils entièrement automatiques, mais il convient de ne leur accorder qu'une confiance relative et de leur préférer les appareils dans lesquels l'automatisme peut être facilement contrôlé, surtout ceux munis de dispositifs permettant de se rendre compte très facilement de l'état de la marche et de le modifier en cas de besoin.

Les petites installations, plus encore que les grandes, exigent des qualités de conduite, d'entretien et de marche tout à fait exceptionnelles. Il ne faut pas oublier, en effet, qu'elles sont généralement placées sous la surveillance de personnes peu compétentes. Il en résulte qu'*elles ne peuvent être vendues à bas prix*. Pour aboutir à des prix de vente avantageux, certains constructeurs n'hésitent pas à exagérer la simplification, même au détriment de la sécurité. C'est ainsi que si on réduit, par exemple, l'épaisseur des tubes, ceux-ci ne tardent pas à être mis hors d'usage par suite de l'action de la rouille.

Le groupement en un seul bloc des appareils essentiels,

LE FROID

compresseur, condenseur, évaporateur, et des organes annexes : robinet de réglage, séparateur d'huile, etc., est avantageux pour les très petits appareils, tels que ceux destinés aux meubles réfrigérants; mais, lorsqu'il s'agit d'installations d'une capacité supérieure à 1 000 frigories-heure (8 à 10 kilogrammes de glace à l'heure), il est souvent plus désirable de loger les appareils séparément dans une pièce ou même dans deux pièces contiguës.

Avant de présenter quelques modèles d'appareils, il nous paraît utile d'attirer l'attention des acheteurs éventuels sur la désignation de grandeur de ces appareils.

Ainsi, l'importance d'une installation est souvent indiquée en frigories. Or la production est très différente suivant le régime de fonctionnement, quel que soit l'appareil. Une machine qui peut produire 10 000 frigories-heure si elle est employée à refroidir de l'eau à zéro degré, ne fournira plus que 5 000 frigories-heure, à peine, si elle est employée à la conservation de la viande congelée, qui exige une température beaucoup plus basse que zéro degré.

L'indication en frigories n'a donc de valeur que s'il est nettement spécifié à quelles températures de fonctionnement elle se rapporte. Il est de beaucoup préférable de faire garantir par le constructeur la réalisation d'un programme nettement défini avec une certaine puissance absorbée, relevée au tableau électrique par exemple, pendant un certain nombre d'heures de marche par jour. Une telle garantie, sanctionnée en cas de non-réalisation, est bien préférable à la promesse d'un nombre de frigories mal défini, difficilement contrôlable et qui peut être tout à fait hors de proportion avec les besoins de froid de l'installation à réaliser.

Il suffit, d'ailleurs, de s'adresser à un constructeur sérieux pour obtenir toute satisfaction.

PETITES INSTALLATIONS FRIGORIFIQUES

Nous allons maintenant étudier quelques-unes des installations domestiques les plus connues et les plus appréciées.

LES ARMOIRES FRIGORIFIQUES. Ce sont des meubles de dimensions variables, que l'on installe à l'office et qui constituent des garde-manger pour tous les aliments frais ou cuits. Ils sont divisés en compartiments avec rayons recevant les viandes, les fruits, les légumes, les boissons à rafraîchir. Une case spéciale, dans laquelle se trouve l'évaporateur, contient des mouleaux dans lesquels on met de l'eau potable pour obtenir de la glace alimentaire. Enfin, les parois sont fortement calorifugées à l'aide de diverses substances, généralement du liège aggloméré, qui empêchent la déperdition du froid intérieur.

L'armoire *Frigidaire* est constituée extérieurement par une tôle émaillée recouvrant l'armature en bois et le liège aggloméré. La fermeture hermétique des portes est assurée par des bourrelets pneumatiques en caoutchouc et toutes les surfaces intérieures sont également en tôle vitrifiée en blanc. Deux tiroirs avec cadre et poignée en porcelaine contiennent les petits cubes de glace obtenus automatiquement. A la base est logé le groupe compresseur, tandis que l'évaporateur a été reporté à la partie supérieure.

Le plus petit modèle de ces armoires est actionné par un petit moteur électrique d'un quart de cheval seulement, qu'il suffit de brancher sur une prise de courant du réseau de lumière continu ou alternatif pour mettre l'installation en marche. Un interrupteur coupe ou rétablit le courant lorsque la température intérieure est au-dessous ou au-dessus de son régime normal.

Toutes les armoires frigorifiques se présentent avec des formes un peu différentes les unes des autres, plus ou moins volumineuses selon les nécessités de chacun, mais

LE FROID

ce sont toujours des garde-manger qui se distinguent seulement des garde-manger ordinaires par leur équipement frigorifique.

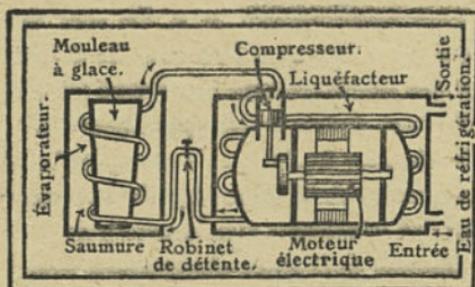


Fig. 31. — Installation frigorifique Aurore.

Le système *Aurore* (fig. 31) diffère du précédent, et de tous les autres, en ce sens que le moteur et le compresseur, constituant un bloc unique, sont plongés entièrement dans le bac liquéfacteur et entourés par le serpentin où s'opère la liquéfaction du gaz ammoniac. Dans les appareils destinés uniquement à produire de la glace, le serpentin de l'évaporateur est placé dans un bac à saumure et entoure les mouleaux.

Dans l'armoire *Corblin* (fig. 32) le compresseur appartient à un type tout à fait spécial, connu sous le nom de compresseur à membrane. En voici le curieux principe :

Le piston, au lieu d'agir directement sur le gaz pour l'aspirer et le refouler, chasse une masse d'huile sous une membrane élastique pendant la compression et, pendant sa

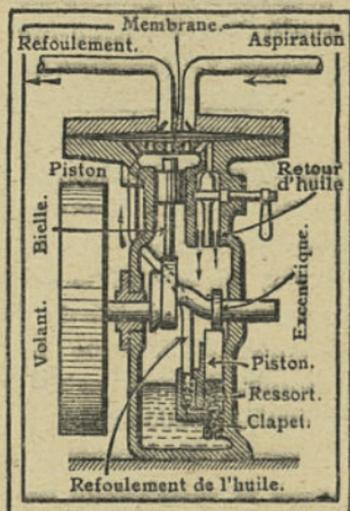
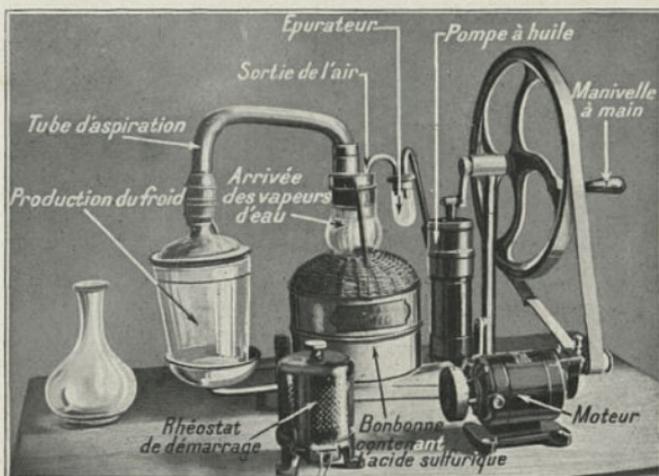
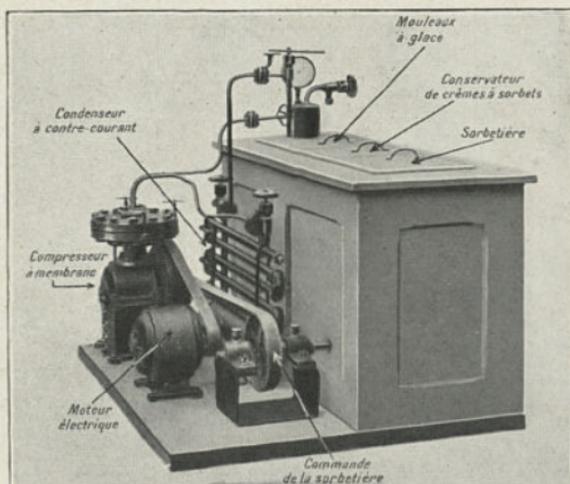


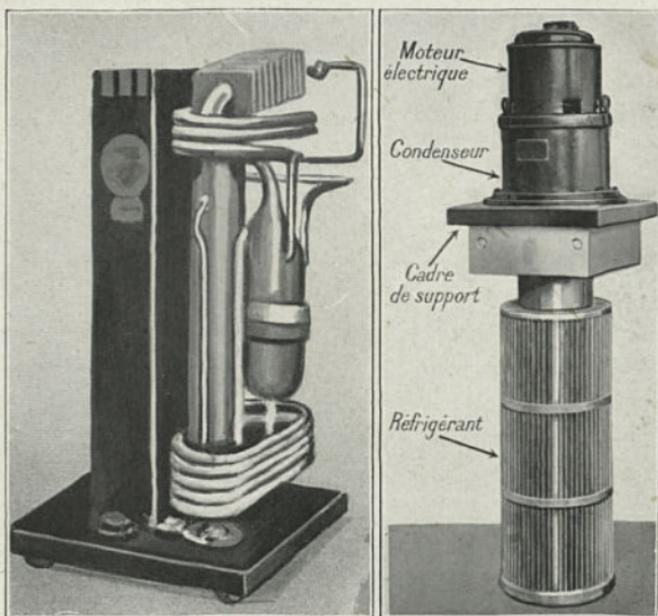
Fig. 32. — Compresseur à membrane système Corblin.



MACHINE A GLACE DE MÉNAGE.

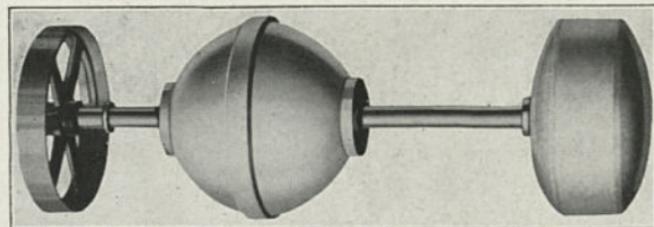


SORBETIÈRE AUTOMATIQUE CORBLIN.



APPAREIL DE PLATEN MUTERS.
Vu du côté du générateur de froid.

MACHINE A GLACE
ESCHER-WYSS.



LE CONDENSEUR (au centre), L'ÉVAPORATEUR (à droite) DU FRIGORIGÈNE A. S.

PETITES INSTALLATIONS FRIGORIFIQUES

descente, crée une dépression sous cette membrane qui fléchit.

Ce fléchissement a pour effet de provoquer une autre dépression au-dessus d'elle; la soupape d'aspiration s'ouvre pour laisser pénétrer le gaz. Pendant la remontée du piston, les effets de compression se manifestent sur l'huile, qui oblige la membrane à s'incurver dans l'autre sens pour chasser le gaz par la soupape de refoulement. On évite ainsi le contact entre l'huile et le gaz.

Comme une certaine quantité d'huile s'échappe toujours entre le piston et le cylindre, une petite pompe de compensation plongeant dans le réservoir d'huile assure toujours la quantité de fluide nécessaire au bon fonctionnement de l'appareil sous la membrane. Enfin, la manœuvre d'une soupape spéciale permet de régler la valeur de la compression en laissant échapper plus ou moins d'huile ou en fermant complètement cette sortie.

Ce compresseur ne comporte pas de presse-étoupe.

Dans les appareils *Autofrigor*, l'agent actif est le chlorure de méthyle. Ce sont, par conséquent, des machines à basse pression : de 0 kg. 100 à 1 kg. 300 dans l'évaporateur et 0 kg. 800 à 6 kilogrammes dans le condenseur au lieu de 2 kg. 300 et 10 kg. 500 qui sont nécessaires à l'ammoniaque.

Le moteur, le compresseur et l'évaporateur forment un seul bloc cylindrique que l'on introduit dans un autre cylindre un peu plus grand constituant le bac à saumure et à la base duquel sont les mouleaux à glace.

On peut monter cet ensemble dans un garde-manger ordinaire bien isolé, auquel on fera aboutir les conduites d'eau nécessaires ainsi que les fils d'amenée du courant au moteur. Le tout petit modèle absorbe 150 watts à l'heure en courant alternatif triphasé et 250 volts en courant continu pour faire descendre la température de l'armoire à -10° . Il consomme de 20 à 30 litres d'eau à l'heure.

LE FROID

LES INSTALLATIONS COMMERCIALES. Le petit commerce de denrées alimentaires utilise des armoires frigorifiques semblables à celles que nous venons de décrire, mais de plus grande capacité.

Les installations bien comprises rendent d'immenses services à ceux qui les possèdent, à la condition d'être soigneusement surveillées et entretenues. Or, très souvent, elles sont abandonnées à elles-mêmes et, au bout de quelque temps, deviennent inutilisables. Il faut cependant bien se convaincre qu'une machine, quelle qu'elle soit, demande des soins ; il ne viendrait à personne l'idée de ne jamais nettoyer son automobile, de ne pas vérifier le fonctionnement du carburateur, de ne jamais s'occuper des

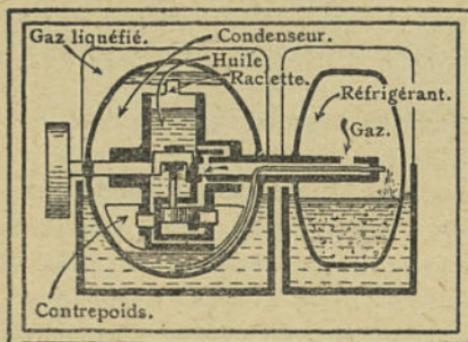


Fig. 33. — Le frigorigène A. S.

pneus. Les machines frigorifiques, sans être aussi exigeantes, méritent tout de même autre chose qu'un total abandon.

Le groupe *Audiffren Singrün*, connus sous le nom de *Frigorigène A. S.* (fig. 33), se

présente sous un aspect très différent des machines que nous avons étudiées jusqu'ici. C'est une machine à compression constituée par deux capacités, l'une à peu près sphérique, l'autre lenticulaire, réunies par un arbre creux. La seconde constitue le réfrigérant et la première le condenseur. Le mécanisme de compression, commandé par une poulie extérieure, est enfermé dans le condenseur. Il comporte un cylindre oscillant autour d'un axe,

PETITES INSTALLATIONS FRIGORIFIQUES

ce cylindre étant maintenu vertical par un contrepoids en plomb. L'axe est coudé et la manivelle qui commande le piston est solidaire de ce coude.

Pendant la rotation des deux capacités, le cylindre est animé d'un mouvement oscillant et le piston se déplace pour aspirer le gaz contenu dans l'évaporateur. Ce gaz se répand dans le condenseur, se liquéfie au contact des parois et, par la force centrifuge, le liquide vient s'appliquer contre la surface de ces parois en se séparant de l'huile, qui est moins dense.

Un tuyau, passant par l'arbre creux, ramasse ce liquide et le refoule, en raison de la pression intérieure du condenseur, dans l'évaporateur. Sous l'effet de l'aspiration produite par le piston, il vaporise en refroidissant le liquide réfrigérant qui entoure la capacité lenticulaire, et le cycle recommence.

Des tuyaux conduisent ensuite la saumure dans la chambre froide.

On voit que le compresseur est toujours en contact intime avec de l'huile chimiquement pure ; aussi l'usure est-elle presque nulle. Aucun réglage n'est à faire une fois l'appareil installé et aucune fuite n'est à craindre. Ajoutons enfin qu'avant le remplissage, l'appareil a été complètement vidé d'air ; aucune oxydation ne peut donc se produire.



CHAPITRE IX

LA CONSERVATION DES DENRÉES ALIMENTAIRES

Le père du froid. || L'action du froid sur les denrées alimentaires. || Procédé Ottessen. || Viandes fraîches et viandes frigorifiées. || Les principes de la conservation des denrées alimentaires. || Les frigorifiques d'abattoirs. || Les abattoirs de Casablanca. || Les navires frigorifiques. || Les installations frigorifiques sur les paquebots. || L'installation frigorifique d'un grand restaurant. || Les entrepôts frigorifiques. || L'entrepôt frigorifique de Paris-Bercy. || L'entrepôt frigorifique des Halles. || Les wagons frigorifiques. || Les trains frigorifiques. || La conservation du poisson.

LE PÈRE DU FROID. *o o* Après la découverte de Carré qui, en 1857, utilisait l'éther pour produire le froid dans une brasserie de Marseille, Charles Tellier songea à appliquer le froid à la conservation des denrées alimentaires, en particulier à la viande de boucherie et au gibier. C'est lui qui eut la première idée des transports frigorifiques.

Le premier navire qu'il fit construire, et auquel il donna le nom de *Frigorifique*, partit de Rouen pour La Plata le 25 décembre 1876 avec un chargement* de viande réfrigérée à 0°, non frigorifiée. La traversée dura 105 jours et la viande arriva en parfait état de conservation. Le *Frigorifique* rapporta une autre cargaison de viande qui fut vendue à Paris au mois d'août 1877.

L'expérience, toute concluante qu'elle fut, eut seulement le don d'amuser le public. Tellier, méconnu, mourut pauvre, alors que, quelques années plus tard, l'industrie frigorifique prenait un développement considérable, assurant la fortune

CONSERVATION DES DENRÉES

des producteurs du nouveau monde et celle des industriels.

L'ACTION DU FROID SUR LES DENRÉES ALIMENTAIRES. Les aliments d'origine animale ou végétale sont l'objet d'une fermentation qui les rend rapidement toxiques. Pour les conserver, il est nécessaire, ou de supprimer les ferments putrescibles (microbes), ou de retarder leur développement. A la température de 0°, on constate un ralentissement presque complet de leur action, qui atteint son maximum vers 60°.

Les ferments sont détruits dans l'eau bouillante, tandis que, même à 100° au-dessous de zéro, on ne peut que les paralyser.

Après la mort, les ferments animés interviennent presque immédiatement pour réaliser la destruction des tissus si leur action n'est pas combattue par le froid.

Mais les ferments solubles, qui entretiennent la vie, ne disparaissent pas aussitôt après la mort; ils conservent leur action pendant un certain temps en combattant celle des ferments putrides. C'est pourquoi nous pouvons consommer la viande un ou deux jours après l'abatage. Ce sont les ferments solubles qui réalisent la maturation qui rend la viande plus tendre, plus savoureuse. A partir de ce moment, on peut congeler ou réfrigérer la viande; l'action des ferments solubles et celle des microbes s'arrête immédiatement, pour reprendre après la décongélation.

La viande simplement refroidie à 0° (réfrigérée) peut se conserver pendant quatre ou cinq semaines; en Angleterre, où il se consomme chaque année 900 000 tonnes de viande importée, la presque totalité est simplement réfrigérée. Après sa sortie du frigorifique, elle se conserve à l'air libre plus longtemps que la viande fraîche qui maintient sa température initiale, sa température de vie, à 37°, tandis que la

LE FROID

première se maintient à un degré beaucoup inférieur.

Quant à la viande congelée, l'histoire du mammoth sibérien nous fournit une preuve de sa conservation indéfinie dans la glace. Industriellement, la durée de conservation est de six mois à un an. Au bout de ce laps de temps, les graisses font l'objet de modifications chimiques qui leur communiquent un goût de graillon. C'est d'ailleurs pour cette raison que les viandes congelées vendues au public pendant la guerre, et qui avaient un an ou deux d'entrepôt, ont été peu appréciées. Actuellement, cet inconvénient n'existe plus, les viandes conservées par le froid étant livrées à la consommation trois mois après l'abatage.

Dans les chambres frigorifiques, les quartiers de bœufs et les moutons entiers sont gelés à cœur, comme on dit, au bout de trois à cinq jours. On vérifie l'état de la viande en enfonçant un thermomètre jusqu'au milieu de la pièce; il doit marquer — 5°.

PROCÉDÉ OTTESSEN. // // Il existe un autre procédé de congélation, imaginé par le professeur Ottessen. On plonge les viandes directement dans un bain de saumure à — 20°. Au bout de douze à quinze heures, la congélation à cœur est obtenue. Les viandes sont ensuite débarrassées du sel qu'elles ont emprunté à la saumure par une immersion dans de l'eau chaude. Après quoi on recongèle la partie superficielle dans une chambre froide.

Ce procédé est employé au frigorifique de Lorient pour la conservation du poisson, parce qu'il dessèche moins les tissus que la congélation à l'air.

VIANDES FRAICHES ET VIANDES FRIGORIFIÉES.

// // Le Dr L. Laure a étudié les modifications physiques et chimiques que présentent les viandes réfrigérées et frigorifiées par rapport aux viandes fraîches.

CONSERVATION DES DENRÉES

Les premières conservent leur fraîcheur naturelle, tandis que les secondes deviennent dures comme un bloc de bois que l'on découpe à la scie. Si on examine de près cette viande, on remarque, parfois, qu'elle cède sous le doigt. Cela tient à son état de dessiccation très prononcé, l'eau que contenaient les muscles ayant été remplacée par l'air. Enfin, la viande prend une couleur plus foncée, que le temps accentue.

Autre constatation : l'évaporation de l'eau entraîne une perte de poids. D'après Monvoisin, cette perte ne serait que de 0,2 p. 100 par mois; elle atteint 1 p. 100 si l'entrepôt est bien ventilé. La dessiccation de la viande congelée est donc peu importante. D'ailleurs, elle conserve en quantité et en qualité tous les constituants de la viande fraîche, ainsi que l'a constaté, il y a longtemps déjà, le professeur A. Gautier. Cette opinion est confirmée par tous les savants qui se sont occupés de la question.

Ajoutons encore, en faveur de la qualité hygiénique de la viande frigorifiée, que les larves de parasites qu'elle pourrait contenir sont détruites par le froid, malgré la résistance qu'elles présentent. Il suffit d'un séjour de vingt jours à une température de -20° pour que les parasites du porc deviennent inoffensifs.

Quant à la perte de jus que l'on constate pendant la décongélation, il suffit, pour l'éviter, de procéder lentement en maintenant les morceaux dans une atmosphère sèche.

Le meilleur argument que l'on puisse invoquer en faveur de la consommation des viandes frigorifiées peut être tiré des statistiques. Il n'est, actuellement, aucun pays d'Europe, sauf peut-être la France, qui n'ait vu la consommation augmenter d'une année à l'autre. Si nous faisons exception à la règle, c'est uniquement parce que cette viande nous est vendue à un prix presque aussi élevé que la viande fraîche. Le Français préfère la viande fraîche, mais dans la plupart

LE FROID

des restaurants on lui sert très fréquemment de la viande frigorifiée, sans qu'il s'en doute, et qu'il trouve excellente !

LES PRINCIPES DE LA CONSERVATION DES DENRÉES ALIMENTAIRES. ■ ■ Toutes les denrées alimentaires peuvent être conservées par le froid, mais chacune d'elles exige un régime thermique et hygrométrique spécial. Aussi, dès que furent connus les principes de cette conservation, des recherches devinrent nécessaires pour fixer les conditions à appliquer dans chaque cas particulier. Les connaissances ont, d'ailleurs, été longues à acquérir, car seule l'observation était capable d'apporter tous les éléments nécessaires,

Nous allons donner quelques indications qui permettront aux possesseurs d'appareils frigorifiques ménagers de procéder avec méthode.

Pour ce qui concerne la viande dite de boucherie, à l'état réfrigéré ou à l'état congelé, les conditions de conservation intéressent seulement l'industrie. La viande de porc ne conserve ses qualités qu'à une température de -3° .

Les volailles se congèlent comme les viandes de boucherie, mais il faut les vider, les plumer et les emballer dans du papier parcheminé. En général, on place douze volailles ainsi préparées dans une caisse de bois à parois pleines avant de les envoyer à la congélation.

Le gros gibier, qui supporte des températures de -10° à -15° , n'est pas dépouillé; pour le petit gibier, une température de -6° suffit; on le congèle avec son poil ou ses plumes.

Le beurre et la margarine se conservent pendant six mois et même davantage à une température de -3° à -6° , à la condition que l'état hygrométrique soit assez élevé. L'expédition ne peut se faire que dans des wagons frigorifiques, le beurre ayant été, au préalable, enfermé dans des barils.

CONSERVATION DES DENRÉES

Pour ce qui concerne la conservation des œufs, on peut dire qu'il n'existe aucun procédé équivalent à celui du froid. M. Paul Angrand affirme que l'œuf garde pendant cinq mois ses qualités de produit frais; on peut, au bout de ce laps de temps, le consommer à la coque. Passé ce délai, il entrera sans inconvénient dans la confection des pâtisseries, des pâtes alimentaires et dans toutes les préparations culinaires. La conservation est d'ailleurs assez délicate, car la température doit être maintenue constamment entre $+ 2^{\circ}$ et 0° , sans jamais tomber au-dessous de $- 1^{\circ}$.

Le degré hygrométrique est également à observer; le plus favorable est de 75 p. 100. Comme la réfrigération par la saumure l'élève à 85 et même à 90 p. 100, on enlèvera une partie de l'humidité en plaçant de la chaux vive dans l'atmosphère ambiante.

Les œufs seront enfermés séparément dans des caisses à alvéoles en carton plissé, contenues dans des caisses en bois bien closes que l'on retournera de temps en temps pour que le jaune, plus lourd que l'albumine, reste bien au milieu de l'œuf.

Tout aussi délicat est le problème de la conservation des fruits par le froid. Ils doivent être cueillis à un état de maturité pas trop avancé et soumis à une température toujours supérieure à 0° : pommes, de 0° à $+ 2^{\circ}$; pêches, de $+ 2^{\circ}$ à $+ 4^{\circ}$; bananes, de $+ 8^{\circ}$ à $+ 12^{\circ}$; raisin, de $+ 1^{\circ}$ à $+ 3^{\circ}$. Quant au degré hygrométrique, il devra être maintenu entre 75 et 80 p. 100 pour se rapprocher de celui de l'atmosphère.

La conservation devra, en outre, s'effectuer dans l'obscurité complète. Les fruits seront enveloppés de papier de soie, puis de papier souple; les plus délicats, placés dans de l'ouate. La durée de conservation des raisins, des pommes, des poires est de quatre à huit mois; celle des prunes, des

LE FROID

abricots, de deux à trois mois, et celle des pêches, de trente à quarante jours.

Les légumes s'accoutument d'une température de + 2° à + 3°; leur traitement est beaucoup moins délicat que celui des fruits.

LES FRIGORIFIQUES D'ABATTOIRS. *▯ ▯* C'est en Argentine qu'il faut aller pour voir les plus importants frigorifiques d'abattoirs du monde entier. Le Dr Laure, qui les a visités, nous fait assister aux diverses formalités qui précèdent l'abatage, puis à la mise aux frigorifiques.

Les animaux, rassemblés dans des parcs attenants aux frigorifiques, sont visités par le service vétérinaire, qui délivre le permis d'abatage, puis conduits par un plan incliné à l'étage supérieur du frigorifique (5°, 6° et même parfois 7° étage), où ils sont baignés et douchés pendant vingt minutes.

Après le sacrifice, on les dépouille, on les vide, puis on les scie en deux parties suivant la colonne vertébrale, et, après nouvel examen sanitaire, chaque moitié est suspendue à un chariot aérien qui la dirige vers les chambres froides.

Avant d'y pénétrer, elle reçoit l'estampille de sa marque d'origine, puis fait l'objet d'un examen à la suite duquel elle est destinée soit à la congélation, soit à la réfrigération. Une classification par pays destinataires s'effectue en même temps. Les viandes grasses sont réservées à l'Angleterre; les viandes maigres, à l'Italie, où elles sont plus appréciées; les autres vont en France, en Allemagne. Les plus belles viandes sont seulement refroidies, et non congelées.

Quant aux viandes douteuses, elles subissent un nouvel examen qui décide s'il y a lieu de conserver une partie de l'animal ou de le sacrifier totalement. Cette sévérité est acceptée sans discussion par les propriétaires et les viandes

CONSERVATION DES DENRÉES

définitivement reconnues malsaines s'en vont au « digestor » où on les transforme en engrais après traitement pour en extraire du suif industriel.

La chair des porcs est encore plus minutieusement vérifiée que celle des bœufs. Des fibres musculaires sont prélevées sur chaque animal et placées entre deux lames de verre. Vingt ou trente échantillons, rassemblés ainsi, sont examinés au microscope sous un grossissement de 3 000 diamètres. Les larves des parasites apparaissent immédiatement.

Les viandes admises au frigorifique font d'abord un séjour de vingt-quatre à trente-six heures dans une chambre froide, à une température un peu supérieure à 0°, avant de passer à la congélation, dont la température varie de — 8° à — 15°. Au bout de cinq à six jours, la congélation à cœur est terminée. On divise alors la moitié de bœuf en deux quartiers et, afin de les protéger contre les dangers des manipulations futures, on les enveloppe dans des toiles à sac. Les moutons, entiers, sont entourés d'une cotonnade. Finalement, toutes ces viandes sont entreposées dans des chambres à — 6°, où elles attendent leur embarquement.

Dans les frigorifiques argentins, on abat chaque jour 1 000 à 2 000 bœufs, sans compter les porcs et les moutons. Le plus récemment construit de ces frigorifiques est aménagé pour abattre chaque jour 10 000 animaux : 4 000 bœufs, 3 000 moutons, 3 000 porcs.

Le grand nombre d'animaux présentés à l'abatage explique l'organisation sévère d'un service sanitaire qui exerce son action à la fois sur les animaux sur pied et sur les viandes fraîches ensuite. La viande congelée présente donc le maximum de garanties, beaucoup plus que la viande fraîche vendue sur les marchés de Paris et surtout sur ceux de province.

Au cours de l'année 1924, il a été abattu 10 millions d'ani-

LE FROID

maux, tant bœufs que moutons et porcs, en République Argentine. Ce chiffre permet de se faire une idée de l'importance de l'élevage, qui est conduit très scientifiquement. Les reproducteurs y atteignent des prix inconnus en Europe. Ainsi un taureau, grand champion de l'année 1925, âgé de deux ans et demi, a été vendu plus de deux millions de francs. C'est tout ce que nous pouvons dire de l'élevage sans nous éloigner de notre sujet.

LES ABATTOIRS DE CASABLANCA. *■ ■* Si les abattoirs industriels européens ne peuvent avoir l'importance de ceux des pays gros producteurs de bétail, leurs installations n'en sont pas moins parfaitement conçues et l'organisation ne laisse rien à désirer.

En 1924, la société Escher Wyss fut chargée, par la municipalité de Casablanca, de l'installation frigorifique de cette ville moderne. Construits sur un terrain de 48 000 mètres carrés de superficie, à 3 km. 500 du centre de la ville et à un kilomètre de la mer, ils sont desservis par une avenue clôturée qui conduit les animaux à un parc de stabulation divisé en deux parties: l'une pour le petit bétail, l'autre pour le gros bétail. Ce parc est entouré par le marché, où peuvent être exposés simultanément 1 300 bœufs et 5 000 moutons.

L'abatage a lieu dans des salles communes, sauf pour ce qui concerne les viandes destinées aux israélites qui sont abattues dans une salle spéciale. Le transport s'effectue par voies aériennes à deux rails; après inspection, elles sont dirigées vers le hall d'intercommunication où elles sont pesées, les déchets envoyés aux services annexes par des voies latérales sur des chariots. Dans les salles d'abatage, les murs sont revêtus de carreaux de faïence à la hauteur de 2 m. 50.

Les installations frigorifiques et les chaudières à vapeur

CONSERVATION DES DENRÉES

ont été calculées pour assurer à la fois les besoins municipaux et les besoins industriels. Les premières comprennent une antichambre rafraîchie à $+ 6^{\circ}$ ou $+ 8^{\circ}$, deux chambres froides pour viande de boucherie à $+ 2^{\circ}$ et $+ 4^{\circ}$, une antichambre pour viande de porc et une chambre froide qui lui fait suite; la température de cette dernière est de $+ 1^{\circ}$.

Le refroidissement de ces chambres est obtenu par circulation d'air froid. Le frigorifère appartient au système « humide », l'air étant en contact avec des surfaces verticales à ruissellement libre d'eau salée froide. On règle le degré d'humidité de l'air et la température en admettant de l'air supplémentaire par des canaux supérieurs. Cependant, les chambres de charcuterie sont refroidies par des tuyaux à saumure.

Ces installations, qui appartiennent au service municipal, peuvent recevoir chaque jour 16 000 kilogrammes de viande de boucherie et 3 200 kilogrammes de viande de charcuterie. La dépense est de 54 000 frigories-heure. Enfin, une petite fabrique de glace peut fournir 2 000 kilogrammes par jour.

Ces installations sont complétées par celles de l'abattoir industriel, qui comprend une salle de salaison refroidie à $+ 6^{\circ}$; deux salles de conservation pouvant être refroidies jusqu'à $- 10^{\circ}$; des salles de congélation et une salle de pré-refrigération à 0° .

La consommation de froid est de 4 120 000 frigories par jour, et l'isolation de toute l'installation est constituée par des panneaux de liège aggloméré au brai.

Les trois machines utilisées sont des compresseurs à ammoniaque. L'un, de 110 000 frigories-heure, assure les températures au-dessus de zéro; le second de 89 000 frigories-heure fournit les températures au-dessous de zéro. Le troisième est en réserve. Il existe, en outre, deux évaporateurs dans le bain de saumure, deux condenseurs à ruissellement avec

LE FROID

réfrigérants à contre-courant. La Société alsacienne de constructions mécaniques a fourni la machine à vapeur qui actionne les compresseurs.

LES NAVIRES FRIGORIFIQUES. ■ ■ L'Australie, la Nouvelle-Zélande, l'Uruguay, Madagascar, le Brésil, l'Afrique du Sud, les États-Unis, le Canada sont également producteurs de viandes frigorifiées que des flottes de navires frigorifiques transportent en Europe.

Il existe quatre cents gros navires frigorifiques transportant annuellement, à raison de quatre voyages en moyenne chacun, plus de trois millions de tonnes de viande. Trois cents de ces navires battent pavillon anglais, l'Angleterre consommant les deux tiers de la production mondiale en viande frigorifiée ou réfrigérée. Presque tous les navires français sont la propriété de la Compagnie des Chargeurs Réunis; ils peuvent assurer le transport de 300 000 tonnes de viande, quantité supérieure à nos besoins, puisque la France en consomme à peine 100 000 tonnes.

Cette consommation a d'ailleurs fortement diminué à la suite des nouveaux droits de douane qui ont élevé le prix de la viande frigorifiée à un chiffre presque égal à celui de la viande fraîche. On a voulu, par cette mesure, favoriser le cheptel national, sans se rendre compte que l'on fournissait des armes à la vie chère et que l'on mécontentait les pays producteurs, grands acheteurs d'objets de luxe et dont les besoins industriels sont immenses.

Au cours de la guerre, on a construit des « cargo-boats » entièrement aménagés en chambres frigorifiques; ils tendent à disparaître. Les grands paquebots frigorifiques modernes servent également au transport des passagers de toutes classes. Les derniers, construits par la Compagnie des Chargeurs Réunis, qui appartiennent au type *Déstrade*, dis-

CONSERVATION DES DENRÉES

posent de plus de 8 000 mètres cubes de chambres frigorifiques. Ceux de la Compagnie des Transports maritimes ne disposent que de 3 000 mètres cubes de chambres, mais ils reçoivent plus d'émigrants. La capacité du paquebot *Désirade* est de 12 000 bœufs ou 120 000 moutons.

Pour assurer la conservation de ces énormes quantités de viande, le navire a reçu un aménagement spécial, comprenant des chambres pour les machines à produire le froid et des cales plus soigneusement isolées que les parois des chambres des entrepôts terrestres. Des tubes conducteurs de l'agent frigorifique tapissent littéralement les parois et les plafonds des chambres froides (fig. 34).

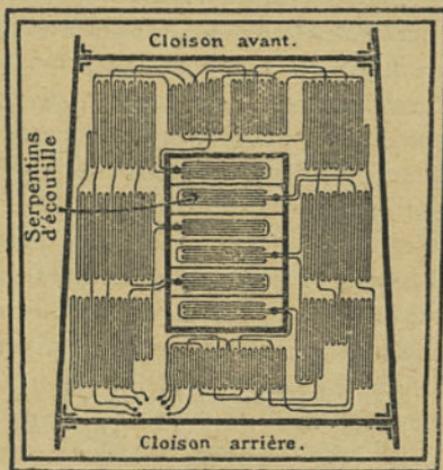


Fig. 34. — Distribution des serpentins sur le plafond de cale.

Dans un navire moderne, la longueur de ces tubes n'atteint pas moins de 40 kilomètres !

Les viandes frigorifiées y sont maintenues à une température de -7° , tandis que celles simplement réfrigérées, qui peuvent se conserver à l'état de viandes fraîches pendant trois semaines, ne subissent qu'une température voisine de -1° .

Les machines frigorifiques de bord fonctionnent généralement à l'acide carbonique ou au chlorure de méthyle, à l'exclusion de l'ammoniaque.

Pour obtenir un isolement aussi parfait que possible, la

LE FROID

coque du navire est doublée intérieurement d'une deuxième coque en bois de même forme et qui en est éloignée de 25 centimètres environ. L'espace vide est rempli de liège granulé. Les plafonds qui séparent les cales des water-ballasts comportent une épaisseur de 180 millimètres de liège granulé surmontée d'un premier plancher en bois de 22 millimètres d'épaisseur. A 25 millimètres au-dessus, est établi un deuxième plancher semblable au premier ; ils sont séparés par deux épaisseurs de papier imperméable. Des panneaux

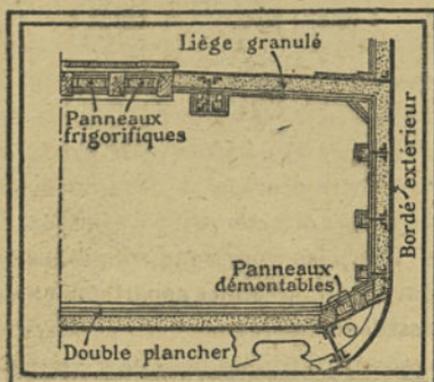


Fig. 35. — *Demi-coupe transversale d'un navire frigorifique.*

démontables, constitués de même, permettent la visite des water-ballasts. Verticalement, l'épaisseur de liège granulé est portée à 250 millimètres autour de la cale. Les cloisons de séparation entre les chambres possèdent une double enveloppe de liège d'une épaisseur totale

de 33 centimètres. Les hiloires (pièces de liaison), les éponilles (qui supportent les ponts) sont également isolées au liège granulé (fig. 35). C'est grâce à ces précautions que l'on parvient à maintenir constante, quelle que soit la température extérieure, celle des cales frigorifiques.

L'embarquement des viandes est entouré de précautions hygiéniques très sévères pour leur éviter l'action du soleil et le dépôt de poussières. En Argentine, on a établi un système transporteur par rails aériens ; les viandes sont suspendues à

CONSERVATION DES DENRÉES

des chariots courant sur ces rails, qui les amènent à la chaîne du treuil du bord. Sur tout le parcours, les viandes sont protégées par des toiles de tente.

Dès qu'une chambre a reçu sa cargaison, on en ferme la porte et son réseau de tubes est relié à la circulation générale de la saumure. A la fin du chargement, qui s'effectue en trois jours pour un cargo de 3 000 tonnes, toutes les portes et issues sont closes. Le navire prend le départ et, pendant toute la traversée, la surveillance des machines continue sans interruption.

Dans les cales, les quartiers de viandes frigorifiées sont empilés les uns sur les autres, comme des colis; mais, s'ils sont seulement réfrigérés, on les suspend à des tringles de manière à laisser entre eux une circulation d'air froid.

Arrivé à destination, le navire procède au débarquement de ses viandes, qui sont envoyées directement à l'entrepôt.

La flotte frigorifique française comprend vingt-quatre navires, dont onze de plus de 8 000 tonnes appartenant aux Chargeurs Réunis, qui possèdent encore quatre navires de plus de 3 000 tonnes. Les Transports Maritimes possèdent cinq navires; la Compagnie de navigation Sud-Atlantique, deux navires et la Société Havraise Péninsulaire, deux navires. Leur capacité totale est de 130 000 mètres cubes, permettant le transport de plus de 40 000 tonnes de viande par voyage.

LES INSTALLATIONS FRIGORIFIQUES SUR LES PAQUEBOTS. On a comparé les paquebots modernes à des cités flottantes. Rien n'est plus exact. Les milliers de passagers, l'équipage et le personnel du bord en font d'immenses hôtels placés dans une situation tout à fait particulière, puisque le ravitaillement est impossible pendant toute une traversée.

LE FROID

Pour constituer une réserve de viande fraîche, on embarquait autrefois les animaux vivants, que l'on sacrifiait au fur et à mesure des besoins. Actuellement, grâce au froid artificiel, le procédé a été abandonné, puisque l'on peut accumuler des réserves alimentaires de toute nature dans des chambres frigorifiques.

Pour fixer les idées, prenons l'exemple du paquebot *Ile-de-France*, dont l'installation frigorifique a été exécutée par la Société Dyle et Bacalan, et l'exploitation assurée par les Ateliers et Chantiers maritimes du Sud-Ouest.

La capacité totale des locaux à refroidir est de 1 400 mètres cubes. Une partie de ces locaux est réservée au service des vivres, et l'autre au fret constitué par les denrées périssables réfrigérées ou congelées. Suivant le cas, les températures varient de $+ 5^{\circ}$ à $- 10^{\circ}$. Ainsi, les garde-manger, la glacière au gibier, les fromages, le beurre et les œufs, la pâtisserie, sont à une température de 0° , tandis que les offices sont maintenus à $+ 5^{\circ}$. Les viandes de porc, les volailles, le gibier, le veau, le mouton, le bœuf sont conservés à $- 3^{\circ}$, alors que la température des fruits, des légumes est de $+ 3^{\circ}$. Dans les entreponts à fret, elle est maintenue à $- 10^{\circ}$.

L'isolation des locaux est assurée à l'aide de panneaux en liège aggloméré maintenus par un enduit de ciment armé pour les parois et les plafonds et en plus, sur les planchers, un dallage en carreaux de céramique striés.

La saumure froide qui circule dans les tuyauteries est produite par des machines à anhydride carbonique. Deux compresseurs entraînés par des moteurs électriques fournissent chacun 50 000 frigories-heure à la température de $- 18^{\circ}$ à la saumure, l'eau de mer utilisée dans les condenseurs étant à $+ 28^{\circ}$. Un circuit spécial avec pompes et réchauffeur de saumure permet le dégivrage.

CONSERVATION DES DENRÉES

L'INSTALLATION FRIGORIFIQUE D'UN GRAND RESTAURANT. *▯ ▯* Les hôtels, les restaurants utilisent largement le froid industriel. Voici un type d'installation très moderne.

Au restaurant Poccardi, à Paris, chaque service possède son meuble ou son local réfrigéré par un appareil spécial.

Au sous-sol existe une chambre froide à $+ 2^{\circ}$ ou $+ 4^{\circ}$ pour les viandes, une cave à bière à $+ 4^{\circ}$, un meuble à $+ 6^{\circ}$ contenant 1 000 bouteilles. Cet ensemble est desservi par un Frigorigène A. S. de 6 000 frigories-heure. Un second appareil semblable de 15 000 frigories-heure refroidit à $+ 6^{\circ}$ ou $+ 8^{\circ}$ un meuble destiné à la conservation des pâtes et matières entrant dans la confection des pâtisseries.

Le service du restaurant, au rez-de-chaussée, a à sa disposition un meuble à vingt-six compartiments pour diverses denrées; dans le bas, six autres compartiments sont réservés à la conservation des poissons dans la glace concassée. La température y est maintenue de $+ 4^{\circ}$ à $+ 6^{\circ}$ par un Frigorigène de 1 500 frigories-heure.

Les glaces, crèmes et sorbets sont enfermés dans un meuble à deux compartiments, l'un refroidi de $- 6^{\circ}$ à $- 8^{\circ}$ par un appareil de 600 frigories-heure, l'autre destiné aux glaces moulées pour la consommation journalière, à $- 10^{\circ}$. Enfin, les pâtes alimentaires cuites sont conservées à $+ 10^{\circ}$.

Le service du bar a à sa disposition deux meubles pour les bouteilles et un autre pour les sorbets, desservis par un appareil de 1 500 frigories-heure.

On remarque que le principe d'une puissante machine pour servir à tous les besoins a été écarté; les petites installations assurent plus facilement la régularité de la température nécessaire dans chaque cas particulier.

LES ENTREPOTS FRIGORIFIQUES. *▯ ▯* Les trans-

LE FROID

ports et les entrepôts frigorifiques étaient à peu près inexistantes en France avant la guerre. C'est en vue d'assurer le ravitaillement des troupes et celui de la population civile qu'un effort a été accompli. Bordeaux, Marseille, le Havre, Boulogne, Dunkerque, Rouen, etc., sont outillées pour recevoir les viandes frigorifiées. Les grands entrepôts du Havre ont une capacité de 62 000 mètres cubes; ceux de Bordeaux, 20 000; ceux de Marseille, 32 000; ceux de Boulogne, 10 000; de Dunkerque, 8 000; de Rouen, 3 000; de Brest, 2 400; de La Rochelle-Pallice, 10 000.

L'ENTREPOT FRIGORIFIQUE DE PARIS-BERCY. *o o*

C'est, là encore, une très importante usine frigorifique desservie par quatre quais de chargement et de déchargement. Les wagons pénètrent dans un hall refroidi et les viandes sont chargées et déchargées à l'abri de la chaleur, de la poussière et de la pluie. On peut charger treize wagons à la fois et en garer douze pour effectuer leur refroidissement.

Vingt-quatre chambres froides sont réparties sur cinq étages; leur capacité totale est de 17 000 mètres cubes. La température peut y être descendue à -12° suivant les besoins, et une chambre spéciale est réservée à la congélation. Une chambre froide supplémentaire dont la température descend à -30° sert à entreposer les crèmes et les chocolats destinés à la vente dans les établissements publics. La superficie totale utile de la gare frigorifique est de 5 000 mètres carrés.

La construction comporte un vaste tunnel de 30 mètres de largeur et de 300 mètres de longueur, dont la voûte a une épaisseur variant de 1 m. 40 à 4 m. 50. Les chambres froides sont situées de part et d'autre de ce tunnel, qui est flanqué de deux autres, dont l'un est utilisé comme voie charretière; le deuxième a reçu les voies ferrées.

CONSERVATION DES DENRÉES

L'ENTREPOT FRIGORIFIQUE DES HALLES. ☞ ☞ Il reçoit les denrées destinées à être vendues aux Halles et qui sont parvenues après la clôture du marché; on y resserre également celles achetées aux Halles, mais dont on ne doit prendre livraison que le lendemain ou le surlendemain. La ventilation est assurée par une prise d'air qui s'élève au-dessus du toit. Un ventilateur aspire cet air et le refoule dans les salles après son passage dans un frigorigère qui le sèche en le refroidissant. Le frigorigère des Halles est équipé pour la conservation de toutes sortes de denrées alimentaires : viande, poissons, légumes, fruits; il reçoit également les fleurs coupées. Sa capacité est de 5 000 mètres cubes.

Citons encore, sans nous y arrêter, les entrepôts parisiens de Paris-Ivry (17 000 mètres cubes), de Paris-Clichy (25 000 mètres cubes), de Paris-Vaugirard (6 000 mètres cubes). L'ensemble de ces entrepôts permet d'assurer la resserre de 20 000 tonnes de marchandises. Il existe également de nombreux entrepôts en province, en dehors des entrepôts côtiers que nous avons signalés; les plus importants sont ceux de Lyon (19 000 mètres cubes), Nice (6 000 mètres cubes), Grenoble (3 000 mètres cubes), Avignon (2 000 mètres cubes), Dijon, et, en Suisse, Genève.

Ils sont la propriété de trois compagnies : la Société française de Transports et Entrepôts frigorifiques, la Compagnie des Transports frigorifiques et la Société d'Exploitation des wagons frigorifiques, qui ont été fondées, les deux premières avec le concours des compagnies de chemins de fer et la dernière avec celui des chemins de fer de l'État.

LES WAGONS FRIGORIFIQUES. ☞ ☞ Ces compagnies possèdent également plus de 2 000 véhicules construits et équipés de façon à pouvoir être incorporés dans les trains de grande vitesse et même dans les rapides. Les wagons frigo-

LE FROID

rifiques se divisent en deux catégories: les *wagons isothermes* et les *wagons réfrigérants*.

Tous les wagons sont isothermes de par leur construction, constituée en principe par une caisse à parois très épaisses parfaitement isolantes. L'isolement est obtenu généralement en intercalant, entre les deux parois de bois qui forment la charpente du wagon, une forte paroi de liège recouverte de carton ou de feutre, parfois même de parois d'air.

En plus de cet aménagement, les wagons réfrigérants ont des bacs pouvant contenir 1 000 ou 2 000 kilogrammes de

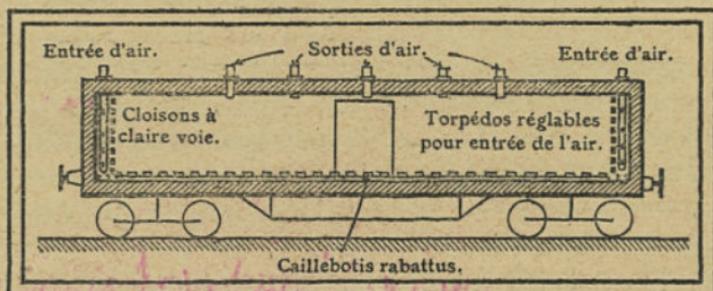


Fig. 36. — *Vue en coupe longitudinale d'un wagon isotherme.*

glace et un système d'aération permettant à l'air extérieur de pénétrer sur la glace pour être refroidi; cet air descend sur le plancher du wagon et est évacué au dehors, après avoir ventilé et rafraîchi le chargement.

Les wagons isothermes proprement dits (fig. 36) sont utilisés en toutes saisons pour le transport de la marée en caisses glacées, des viandes congelées, des œufs congelés, enfin de toutes les denrées qui portent en elles-mêmes un volant de froid ou dont l'emballage constitue ce volant. On les emploie également en été pour le transport du lait en bidons coiffés de glace, de la bière et, en hiver, pour celui des produits qui craignent l'action du froid, comme les bananes, les eaux

CONSERVATION DES DENRÉES

minérales, les vins de Champagne, etc. Les wagons réfrigérants (fig. 37) conviennent plus particulièrement au transport des produits exigeant une ventilation, telles que les viandes fraîches suspendues, et, en été, un refroidissement de la température ambiante : beurres, fromages, fleurs coupées, légumes et fruits frais.

Cependant, malgré les avantages que possèdent les wagons réfrigérants, le transport des fruits et des légumes s'effectue

presque toujours dans les wagons ordinaires des réseaux pourvus de persiennes d'aération disposées sur les quatre faces. Suffisants pour les légumes et fruits ordinaires, ils ne sauraient convenir au transport des fraises, cerises, pêches, melons, petits pois, asperges, haricots verts, choux-fleurs, qui s'altèrent rapidement sous l'action de la chaleur dégagée par l'ensemble d'un chargement massif, dépourvu de toute ventilation centrale. On remédie quelque peu aux inconvénients que présentent les simples wagons ventilés pour le transport de ces denrées, par un emballage à claire-voie, mais le palliatif est insuffisant.

On procède actuellement à la construction de wagons frigorifiques spécialement destinés à ce trafic, avec lesquels on pourra constituer des trains complets de primeurs. Des stations de prérefrigration de wagons et de colis compléteront cette organisation.

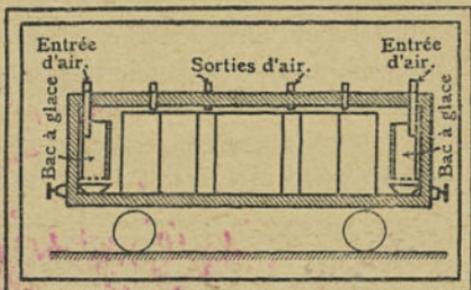


Fig. 37. — Coupe d'un wagon réfrigérant, avec les deux bacs à glace et les appareils d'aération.

LE FROID

Les nouveaux wagons construits par la Société française de Transports et Entrepôts frigorifiques, type Nord, on 12 m. 09 de longueur de caisse, 2 m. 40 de largeur et 2 mètres de hauteur. La surface utile est de 29 mètres carrés et le volume de 58 mètres cubes. La limite de chargement en grande vitesse est de 22 tonnes et en petite vitesse de 28 tonnes.

Depuis le mois de mars 1927, fonctionne un service rapide entre Boulogne et Domodossola pour le transport du poisson frais à destination de l'Italie.

Les wagons peuvent transporter 10 tonnes en grande vitesse et sont munis, sur toutes les faces, d'une forte

Fig. 38. — Appareil de réglage pour l'entrée de l'air dans les wagons à primeurs.

isolation en liège torréfié de 10 centimètres d'épaisseur.

La Compagnie des chemins de fer d'Orléans a mis à l'essai un wagon « refroidi » pour les voyageurs. L'expérience a

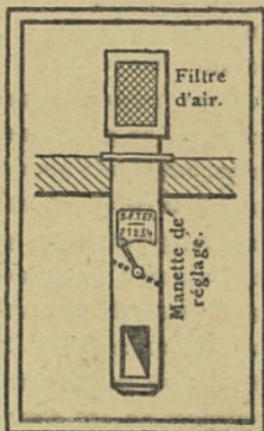
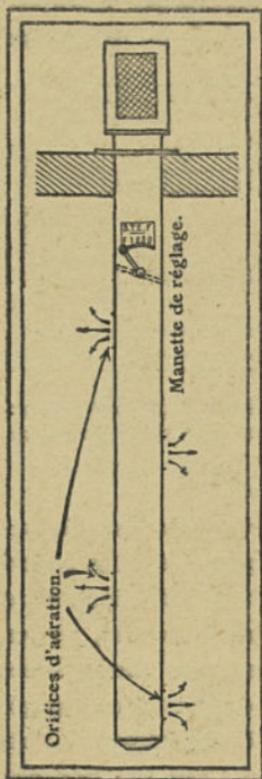
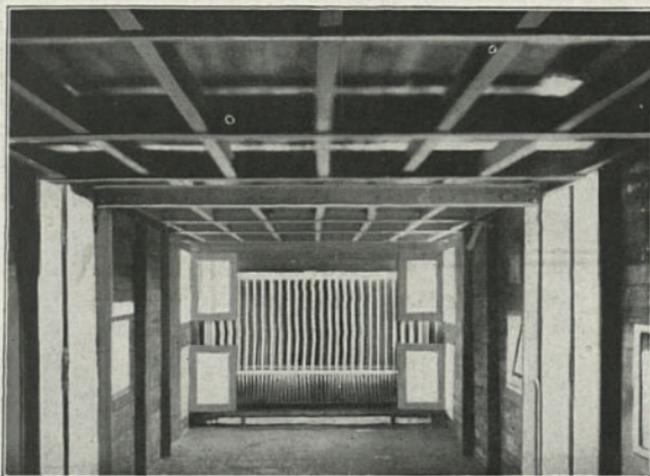


Fig. 39. — Appareil de réglage pour l'entrée de l'air pour les wagons de viandes fraîches.



WAGON ISOTHERME.



INTÉRIEUR D'UN WAGON FRIGORIFIQUE.



WAGON FRIGORIFIQUE.



UN GROUPE D'ARMOIRES FRIGORIFIQUES DANS UN GRAND RESTAURANT PARISIEN.

CONSERVATION DES DENRÉES

eu lieu pendant les plus fortes chaleurs de l'été 1929 et les caisses de glaces installées à l'une des extrémités du wagon ont assuré une baisse de température de 10 degrés à l'intérieur des compartiments. C'est là une heureuse initiative qui mérite d'être suivie par toutes les Compagnies de chemin de fer.

LES TRAINS FRIGORIFIQUES. ¶ ¶ Dans les cas de transport sur de très longues distances, il devient nécessaire d'utiliser des wagons spéciaux, qui sont de véritables usines ambulantes produisant constamment le froid nécessaire à la conservation des denrées. Ils sont donc à refroidissement continu, indépendants les uns des autres, ou quelquefois groupés dans un convoi dont l'une des voitures est équipée comme une usine frigorifique pour distribuer le froid aux autres. Aux États-Unis, on constitue ainsi des trains frigorifiques qui permettent aux denrées alimentaires de traverser tout le continent pour prendre ensuite les navires frigorifiques et parvenir en Europe. La Sibérie nous envoie également des volailles et des œufs par trains frigorifiques.

LA CONSERVATION DU POISSON. ¶ ¶ Tous les auteurs qui ont étudié les méthodes actuelles de conservation du poisson par le froid ont dû admettre que cette conservation est insuffisante. Jusqu'à ces temps derniers, la glace, cassée en petits morceaux, était chargée de ce soin. Sur les bateaux de pêche, qui emportent une quantité de glace atteignant parfois 50 tonnes, on met trois ou quatre rangées de poissons nettoyés sur un lit de glace; au-dessus, un autre rayon est aménagé de même. Ainsi se remplissent les cales. Arrivé à terre, le poisson est lavé, trié et placé de nouveau entre des couches de glace pour être expédié. Quelquefois on congèle le poisson entouré de glace ou, mieux, de neige,

LE FROID

obtenue par la pulvérisation de la glace, lorsqu'il doit être maintenu en entrepôt pendant plusieurs jours.

Si on porte la température des chambres frigorifiques à -10° , on congèle tout le contenu de la caisse en un seul bloc et le poisson peut être conservé longtemps ainsi; mais la décongélation doit s'effectuer très lentement.

A Lorient, qui a été organisé spécialement pour constituer une sorte de port régulateur de la marée, on plonge le poisson (procédé Ottessen) dans la saumure refroidie à -17° ; au bout d'une heure et demie, il est placé dans des chambres froides de -8° à -12° .

Mais il importe avant tout d'assurer la parfaite conservation du poisson à bord du chalutier, où il reste parfois quinze jours et plus avant d'être entreposé.

Or, la conservation par la glace a été condamnée par les meilleurs des techniciens de la science du froid. C'est que, sous l'influence de la température ambiante, la glace fond et l'eau de fusion se répand sur le poisson en y semant les bactéries dont elle est chargée. De plus, les aspérités de la glace endommagent l'épiderme, qu'il est très important de conserver intact parce qu'il constitue précisément un protecteur contre ces bactéries dont l'activité ne peut être enrayée qu'à la température de -15° environ. C'est pourquoi le poisson qui a séjourné quelque temps dans les cales à glace est souvent débarqué lorsque la décomposition a commencé à apparaître.

Sur certains chalutiers, on pratique la congélation lente à l'air sec, comme on le fait dans les abattoirs pour les viandes de boucherie. Ce procédé, préférable au précédent, laisse encore à désirer. C'est que la congélation lente a pour effet de désagréger les tissus en disloquant leurs cellules par la transformation du protoplasma en une infinité de petits glaçons aigus qui ne tardent pas à perforer les membranes

CONSERVATION DES DENRÉES

cellulaires et à les rompre. On aboutit ainsi à créer une véritable bouillie cellulaire, qui bouleverse la structure histologique des chairs.

Dans la congélation rapide (procédé Dahl), au contraire, l'eau n'a pas le temps de quitter la fibre musculaire avant d'être gelée. D'après le professeur Torup, elle se change en particules minuscules distribuées à l'infini et incorporées dans les fibres. Cette chair conserve ses caractéristiques et, par conséquent, toutes ses qualités.

D'ailleurs, dans les laboratoires où l'on étudie l'anatomie microscopique des tissus, on est amené, pour « fixer » convenablement et rapidement un tissu anatomique, à faire usage de la réfrigération rapide.



CHAPITRE X
LE FROID DANS LES INDUSTRIES
ALIMENTAIRES

Les produits de la boucherie et de la charcuterie. || Le froid dans l'industrie vinicole. || Les eaux-de-vie. || Pomologie. || La laiterie et les industries du lait. || Le lait congelé. || La crème et le beurre. || Les fromages. || La chocolaterie. || La brasserie.

LA plupart des industries traitant les produits de l'alimentation sont tributaires du froid. Il ne faut cependant pas entendre par là que les préparations nécessitent des températures de 0° ou au-dessous. En règle générale, le froid n'intervient que pour maintenir les produits, pendant leur préparation, à une température parfois assez élevée qui correspond au meilleur développement des bactéries. Si, dans les fermentations, on introduisait réellement du « froid », la plupart des agents qui les produisent seraient tués.

LES PRODUITS DE LA BOUCHERIE ET DE LA CHARCUTERIE. // // Cette préparation s'effectue en général dans les abattoirs régionaux, dont elle constitue une annexe.

L'un des mieux outillés, en France, est l'abattoir de Fenouillet (Haute-Garonne), alimenté par les foires régionales du Plateau Central et des Pyrénées. La capacité journalière d'abatage est de 300 bovins, 300 veaux, 400 moutons et 500 porcs.

Le refroidissement de l'air des ateliers de fabrication est assuré par des compresseurs à ammoniacque Fixary et un

DANS LES INDUSTRIES ALIMENTAIRES

frigorifère. L'air circule dans des gaines en maçonnerie de briques légères avec enduit en ciment utilisées alternativement pour le refoulement et pour l'aspiration. Tous les canaux sont pourvus de registres de distribution à ouvertures multiples réglables et à glissières manœuvrées au moyen de câbles. En outre, des papillons d'obstruction permettent d'assurer le fonctionnement ou l'isolement d'une ou plusieurs chambres séparées et de modifier la répartition des volumes d'air. Cet air parcourt les ateliers de fabrication qui comprennent : la saucissonnerie, l'atelier des charcuteries et conserves, les fumoirs et l'atelier des boyaux salés. Dans la saucissonnerie, il se fabrique par jour 6 000 kilogrammes de produits qui sont envoyés dans un séchoir dont les parois longitudinales sont doublées d'une deuxième paroi, constituant la gaine d'air, percée de nombreux orifices à ouvertures réglables. Comme la température à maintenir dans le local est de $+ 15$ à $+ 18^{\circ}$, avec un degré hygrométrique de 00,80, aucune protection isolante n'était nécessaire. Toutes les autres manipulations s'effectuent à la même température et les ateliers sont rafraichis dans les mêmes conditions.

LE FROID DANS L'INDUSTRIE VINICOLE. // La fabrication du vin n'étant pas industrialisée, comme celle de la brasserie, par exemple, les conditions de préparation diffèrent souvent d'une région à une autre, et même d'un propriétaire à un autre, car elle dépend souvent de la qualité des raisins, du cru même.

Employé dans le traitement des moûts (vins doux non fermentés), le froid peut permettre de retarder la fermentation en vue de la conservation de ces moûts pendant une période aussi longue qu'on le désire. En règle générale, il est utilisé pour empêcher la température de fermentation de s'élever au delà d'une certaine limite.

LE FROID

On sait, en effet, qu'à partir de $+ 38^{\circ}$, les ferments souffrent ; certains sont même tués à $+ 40^{\circ}$. Il y a donc intérêt à maintenir cette première température pendant toute la durée de la fermentation, car elle est la plus favorable au développement des bactéries.

Divers types de réfrigérants sont en usage. Les plus employés sont ceux du type Lawrence, constitués par deux lames minces de cuivre étamé et ondulé. Elles sont rapprochées l'une de l'autre de quelques millimètres seulement et on oblige l'eau de réfrigération (il n'est pas nécessaire de faire intervenir un liquide à basse température) à circuler de bas en haut entre les tôles, tandis que les moûts ruissellent de haut en bas sur l'extérieur de ces mêmes tôles. Le ruissellement a lieu en vase clos, sans aération ni évaporation, pour empêcher les pertes d'alcool.

Le froid intervient également pour réaliser la clarification des moûts et des vins, pour éliminer certaines substances qui se présentent alors à l'état solide et tombent dans le fond des cuves. Les vins une fois mis en cuves sont également refroidis soit par un appareillage intérieur, soit par un système extérieur. Dans ce dernier cas, la cuve est complètement enfermée dans une chambre froide à peine plus grande qu'elle et on fait ruisseler, sur les deux parois latérales et la paroi postérieure, extérieurement, c'est-à-dire dans l'espace compris entre ces parois et celles de la chambre froide, une solution incongelable convenablement refroidie.

Lorsque l'on utilise des cuves en bois, on peut employer des batteries de tubes placées au-dessus du plafond, dans lesquelles s'effectue la détente directe du gaz frigorigène ou des frigorigères extérieurs avec de puissants ventilateurs.

Pour ce qui concerne la conservation des vins, on sait que la température des caves devient dangereuse dès qu'elle atteint $+ 15^{\circ}$, parce qu'elle favorise le développement des

DANS LES INDUSTRIES ALIMENTAIRES

mycodermes sur la surface du liquide. On parvient d'ailleurs facilement, par la construction des murs, à maintenir une température convenable dans les caves; mais si, pour une raison quelconque, on constatait une insuffisante protection, il serait très simple de recourir aux installations frigorifiques qui, dans ce cas spécial, seraient peu coûteuses en raison de la température, toujours supérieure à 0°, à maintenir dans la cave.

Le froid intervient également dans le vieillissement des vins, en favorisant la dissolution de l'air pendant les soutirages et en précipitant une partie des composés provenant de l'oxydation. L'emploi combiné du froid et de l'oxygène a fait également l'objet d'essais approfondis.

Il est une opération, peu pratiquée jusqu'ici en France, dont le froid est appelé à devenir l'agent idéal; nous voulons parler de la concentration. Concentrer un vin, c'est lui enlever une partie de l'eau qu'il contient, soit pour relever sa teneur alcoolique, soit pour préparer des vins de liqueur.

D'autre part, les moûts concentrés par le froid peuvent être conservés facilement et servir à la préparation de boissons sans alcool, de miels de raisin, de confitures et de gelées à base de raisin ou de pommes, de produits pharmaceutiques, en utilisant la curieuse propriété que possède le moût de raisin de dissoudre les alcaloïdes (quinquina, kola) et les albuminoïdes (jaune d'œuf, lait, viande), de les digérer par l'action de ses propres acides organiques et d'en assurer la conservation sans cuisson pendant une durée indéfinie.

Le procédé de concentration système Cabanne-Daubron est très simple. Un tambour rotatif horizontal, refroidi soit par détente directe, soit par une circulation de saumure, tourne au-dessus de la cuve à vin ou à moût en trempant légèrement dans le liquide. Il se couvre aussitôt d'une mince couche congelée que des raclettes détachent et qui est ensuite

LE FROID

envoyée dans des appareils qui séparent la neige provenant de l'eau des particules solides glacées.

La concentration à froid peut d'ailleurs être appliquée à tous les liquides organiques souffrant de l'action de la chaleur ou qui sont altérés par l'évaporation, comme les jus de fruits, le tanin, les extraits de marc de raisin, etc.

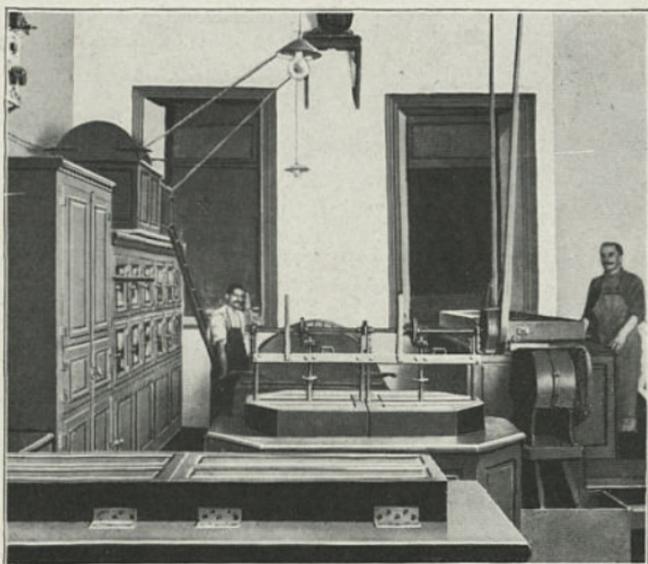
*
* * *

Il nous reste à dire quelques mots du froid dans la fabrication des vins mousseux.

En Champagne, la clarification est réalisée par le froid avant le remuage et le dégorgement. Les goulots des bouteilles renversées sont trempés dans un bac contenant la solution incongelable refroidie à une très basse température. Le dépôt tombe et se trouve pris dans la couche de glace qui se forme dans la partie immergée du goulot. Le vin est également réfrigéré aussitôt après la fermentation pour obtenir la clarification.

Les appareils employés diffèrent avec la nature des vins : champagne, vouvray, asti, etc. Enfin, l'incorporation de gaz carbonique à 0°, par exemple, permet au vin d'absorber une quantité de gaz bien supérieure à celle qu'il peut absorber par les procédés ordinaires. La mousse persiste alors beaucoup plus longtemps dans les verres.

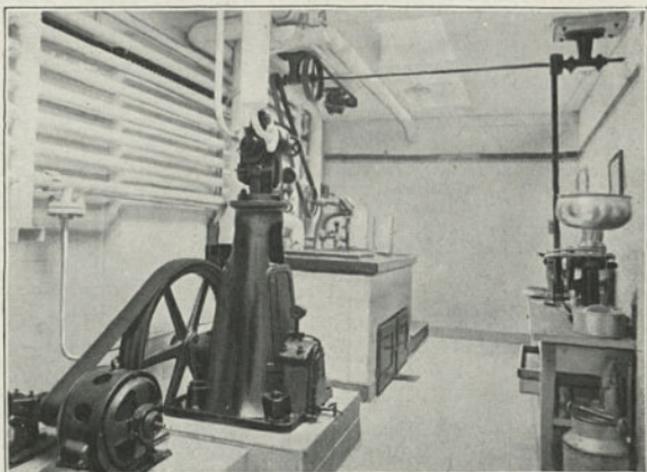
LES EAUX-DE-VIE. ☞ ☞ Certaines eaux-de-vie, en particulier celles qui sont ramenées au titre de 40° par addition d'eau, se troublent lorsqu'on les expédie dans les pays froids. Les matières insolubles en sont la cause. Le traitement par le froid de ces eaux-de-vie, semblable à celui de la clarification du vin, fait disparaître le phénomène. Également comme pour le vin, le vieillissement peut être obtenu par le froid en leur faisant supporter une température déterminée



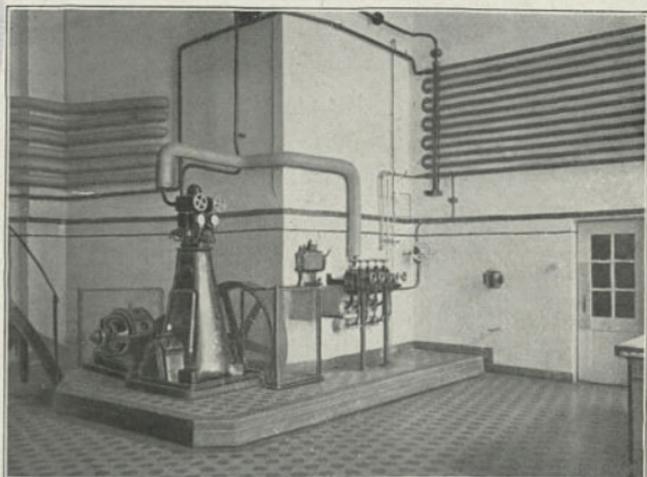
FABRICATION DE SORBETS PAR LE FRIGORIGÈNE.



INSTALLATION FRIGORIFIQUE POUR LA CONSERVATION
DES FROMAGES.



Cl. Escher-Wyss et C^{ie}.
COMPRESSEUR A ACIDE CARBONIQUE.
Installation pour confiserie et pâtisserie.



Cl. Escher-Wyss et C^{ie}.
SALLE DES MACHINES DE LA BOUCHERIE BISCHER A ZURICH.

DANS LES INDUSTRIES ALIMENTAIRES

par le degré alcoolique, plus basse, par conséquent, que pour le vin, et avec intervention de l'oxygène ou de l'ozone.

POMOLOGIE. ¶ ¶ Le cidre peut être traité par le froid exactement dans les mêmes conditions que le vin pour le débouillage et la clarification, la fabrication du cidre mousseux, la concentration des jus. Cette fabrication demanderait à être traitée industriellement dans les mêmes conditions que celle de la bière.

LA LAITERIE ET LES INDUSTRIES DU LAIT. ¶ ¶

Le traitement du lait par le froid intéresse toutes les manipulations qu'il subit, depuis la traite jusqu'à la livraison au consommateur. De ce traitement dépend sa parfaite conservation, c'est-à-dire, en définitive, sa qualité. Or, en France, bien peu de précautions sont prises dans ce sens.

Aux États-Unis, le lait est refroidi à la ferme, aussitôt après la traite, à la température de $+ 10^{\circ}$ et même au-dessous. Le transport s'effectue dans des récipients pourvus de chemises isolantes ou même de bidons à double enveloppe entre lesquelles on a fait le vide comme dans les vases Dewar. Des camions et des wagons isothermes, ou équipés avec des machines frigorifiques portatives, assurent le transport sur les longues distances.

Aux stations de réception, le lait est maintenu à une température de $1^{\circ},7$ à 7° . Enfin, au dépôt laitier du marché, il est pasteurisé et refroidi aux mêmes températures suivant l'heure de livraison aux consommateurs.

Si le lait est destiné à la fabrication du beurre, il est pasteurisé et refroidi à 21° . Quant à la crème, sa température de barattage est de 10° à 15° , suivant la saison.

Le beurre destiné à être entreposé pendant une semaine est conservé à la température de $1^{\circ},7$. Si l'entreposage doit être

LE FROID

prolongé, la température est abaissée entre — 17° et — 23°, car, plus la température est basse, mieux le beurre se conserve dans les dépôts.

En Angleterre, le lait est refroidi à + 3°,3 dans les dépôts de campagne, puis expédié dans des réservoirs d'acier de 13 000 litres de capacité revêtus extérieurement d'une épaisse couche de liège; à l'intérieur, un émail vitrifié soustrait le liquide au contact du métal.

A l'arrivée à destination, le lait est soutiré à l'aide de l'air comprimé, filtré, pasteurisé pendant une demi-heure et refroidi dans des réservoirs qui se vident dans des bouteilles. Celles-ci sont placées dans des caisses et chargées sur des camions qui les distribuent dans les grands centres.

Toutes ces précautions indiquent bien que le seul moyen pratique capable d'assurer une bonne conservation du lait réside dans le refroidissement, qui doit être assuré aussitôt après la traite. Toute ferme tant soit peu importante devrait donc posséder une machine frigorifique qui lui serait également utile, d'ailleurs, pour la conservation de toutes les denrées alimentaires sans exception. Il en résulte incontestablement une dépense de premier établissement assez importante que ne pourraient supporter les petits cultivateurs, mais il leur reste la ressource de constituer une installation commune.

Dans tous les cas, une installation quelconque doit être capable de traiter en une heure et quart toute la production de lait.

En pratique, l'installation frigorifique de la ferme peut se résumer à peu de chose. Le lait, sitôt traité, est mis en bidons de transport que l'on plonge aussitôt dans un bac rempli d'eau maintenue à 0° par de la glace ou par une petite machine frigorifique, dont le serpentín s'entoure, dans le bac, d'un manchon de glace qui remplit les fonctions d'accumu-

DANS LES INDUSTRIES ALIMENTAIRES

lateur de froid. Si l'eau peut être agitée par une hélice, le refroidissement est plus rapide (fig. 40).

La température du lait s'abaisse rapidement; en moins d'une heure, un bidon de 20 litres est refroidi à 4°. Si on maintient le lait dans le bac, il se rapproche de 0°. On conserve, de cette façon, le lait de la traite du soir; il est même possible de garder pendant toute une journée la traite du matin sans craindre aucune altération.

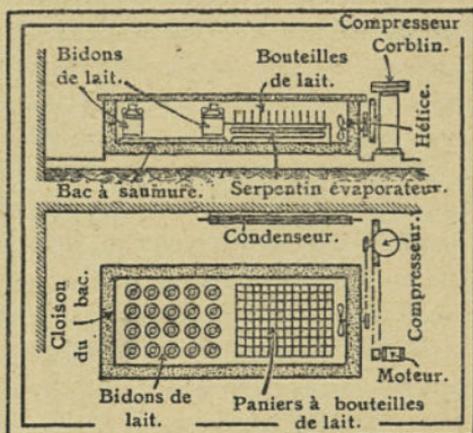


Fig. 40. — Installation pour le refroidissement sans congélation de quelques centaines de litres de lait.

LE LAIT CONGELÉ. On a tenté de congeler le lait, mais il a été constaté que, au cours de la congélation, les éléments constitutifs se séparent. Le bloc solidifié est composé de couches concentriques, avec une partie supérieure feuilletée contenant presque toute la matière grasse tandis que le restant de la masse est très chargé en lactose et en caséine. Si on lui fait reprendre l'état liquide, la reconstitution normale ne s'effectue pas; la matière grasse reste en grumeaux et ne s'émulsionne plus. Ce lait avait été utilisé pour refroidir le lait frais en incorporant des morceaux de cette glace dans les bidons, mais on a remarqué que la matière grasse du bloc de lait se sépare pendant la fusion et donne au lait frais un aspect peu engageant.

LE FROID

Pour éviter ces inconvénients, M. Corblin a eu l'idée de congeler le lait en lames minces dans une saumure très froide et vivement agitée, donnant un résultat suffisamment rapide pour que les éléments constitutifs du lait n'aient pas le temps de se séparer avant leur congélation. En huit minutes, une lamelle de lait d'un centimètre d'épaisseur est congelée à cœur dans une saumure à -15° .

On utilise des mouleaux semblables à ceux employés dans la fabrication de la glace, mais de préférence cylindriques. Dans ces mouleaux, on en introduit d'autres semblables, un peu plus petits, de manière à ménager entre eux un vide d'un centimètre. Cet intervalle est rempli de lait que l'on congèle dans la saumure. On démoule dans l'eau tiède en plongeant l'ensemble des mouleaux. Le lait se détache du mouleau extérieur, s'enlève avec le mouleau intérieur, dont on le sépare avec une raclette. Il est ensuite utilisé pour la conservation du lait frais dans les industries qui traitent le produit en opérant des mélanges, en écrémant une partie du lait, etc. (fig. 41).

Pour les agriculteurs, M. Corblin a imaginé un procédé plus simple.

Dès que la traite est terminée, le lait est mis dans les bidons de transport et ceux-ci plongés aussitôt dans le bac à saumure à -15° . On les y laisse un quart d'heure seulement, c'est-à-dire le temps nécessaire à la production d'une couche solide de faible épaisseur sur la surface intérieure du bidon. Le restant du lait, non congelé, se conserve ainsi pendant longtemps à une température voisine de 0° .

Dans le cas où le ramassage s'effectue par petites quantités chez les cultivateurs, une installation s'impose au dépôt central pour soumettre le lait au traitement par congélation. Là, les bidons seront ensuite placés dans des caisses bien isolées qui serviront pour le transport. Si on désire conserver

DANS LES INDUSTRIES ALIMENTAIRES

ce lait pendant plusieurs jours, il faut les mettre dans des chambres froides.

Pour assurer la conservation dans les meilleures conditions possibles, on peut encore préparer à l'avance des bidons pourvus intérieurement de leur épaisseur de lait congelé qui se conserve dans le bac à saumure d'une traite à l'autre. La traite se fait alors directement dans ces bidons, où le lait se refroidit aussitôt.

La congélation n'est cependant pas absolument nécessaire lorsque le lait ne doit supporter que des parcours de 10 à

20 kilomètres, depuis la ferme jusqu'à la ville voisine, surtout lorsque le trajet s'effectue avec une camionnette automobile. Comme, dans ce cas, la traite du soir est conservée simplement dans un bac partiellement rempli d'eau refroidie par de la glace, ou mieux, par une petite machine frigorifique, ainsi qu'il a été expliqué plus haut.

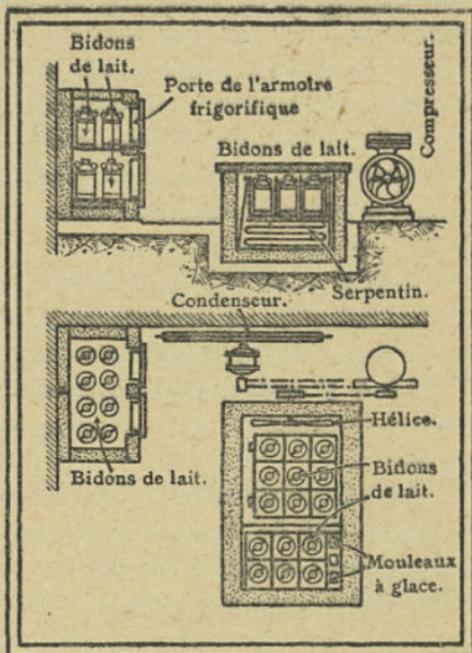


Fig. 41. — Installation pour le refroidissement et la congélation de quelques centaines de litres de lait.

LE FROID

Les dessins d'installations que nous reproduisons permettent de se rendre compte de leur simplicité.

LA CRÈME ET LE BEURRE. // Lorsque la crème doit servir à la fabrication du beurre, elle doit toujours être ramenée à une température relativement basse, pour lui permettre de fermenter convenablement. Le refroidissement peut s'effectuer soit par l'intermédiaire de la saumure, soit, plus simplement, avec de l'eau glacée. Elle arrive ainsi à prendre sa température dite de maturation, qui est de $+ 8^{\circ}$ à $+ 12^{\circ}$.

C'est également là la température de barattage. Mais, lorsque l'opération est terminée, on recommande, pour éviter les pertes de beurre par évacuation du petit lait, de refroidir le tout à $+ 5^{\circ}$ seulement. Sans cette précaution, le petit lait pourrait entraîner de 35 à 40 grammes de matière grasse par litre.

Quant à la conservation du beurre, elle doit s'effectuer à la température de $+ 2^{\circ}$, si le produit ne doit rester que quelques jours en dépôt. Dans le cas de resserre prolongée, la température sera plus basse : — 10° par exemple.

LES FROMAGES. // De toutes les industries du lait, celle de la fabrication des fromages est la plus complexe, en raison de la grande variété des produits. On sait qu'ils sont obtenus par l'emprésurage ou l'acidification du lait pour les uns, de la crème pour d'autres, du lait partiellement ou totalement écrémé pour d'autres encore, préalablement coagulé.

De là les dénominations de fromages gras et de fromages maigres, de fromages cuits ou crus, ces derniers étant frais ou salés.

Le froid intervient d'abord pour conserver au lait toute sa qualité avant qu'on lui incorpore la présure qui détermi-

DANS LES INDUSTRIES ALIMENTAIRES

nera la coagulation. Ensuite on l'utilise, pour régulariser la fermentation, la maturation, et enfin la conservation.

La fabrication du fromage de Roquefort, en particulier, a bénéficié largement du froid artificiel. Autrefois, le fromage était mis en cave à $+ 7^{\circ}$ en moyenne et devait subir, chaque quinze jours, une opération de grattage (revirage) ayant pour but d'enlever la couche glaireuse, due à l'action de certains ferments, qui le recouvrait. Actuellement, grâce au froid artificiel, la température des caves a pu être amenée à 0° par circulation d'air sur des frigorifères, et, en prenant la précaution de recouvrir les fromages de papier d'étain pour leur éviter le contact avec l'oxygène de l'air, on peut les conserver pendant près d'une année. Les fromages ainsi préparés sont d'ailleurs de meilleure qualité que ceux obtenus dans des caves non refroidies industriellement.

LA CHOCOLATERIE. // // Le froid n'est employé, en chocolaterie, que pour assurer le démoulage de la pâte, qui s'effectue entre $+ 10^{\circ}$ et $+ 14^{\circ}$. L'appareil employé pour assurer le refroidissement est une armoire à trois compartiments superposés. Dans le compartiment supérieur, qui constitue l'appareil frigorifique, le froid est produit par la détente directe; dans celui du milieu, des hélices, tournant à grande vitesse, agitent violemment l'air refroidi pour expulser les gaz chauds provenant de l'introduction continue du chocolat dans l'appareil. Enfin, les moules à refroidir sont placés dans le compartiment inférieur. En quinze minutes, le refroidissement est assuré et le démoulage s'effectue aisément.

LA BRASSERIE. // // En brasserie, le froid s'emploie sous la forme d'eau glacée dans la fabrication des bières dites de *fermentation basse*, entre $+ 5^{\circ}$ et $+ 10^{\circ}$. Lorsque la

LE FROID

fermentation s'effectue entre $+ 15^{\circ}$ et $+ 20^{\circ}$, la bière est dite de *fermentation haute*.

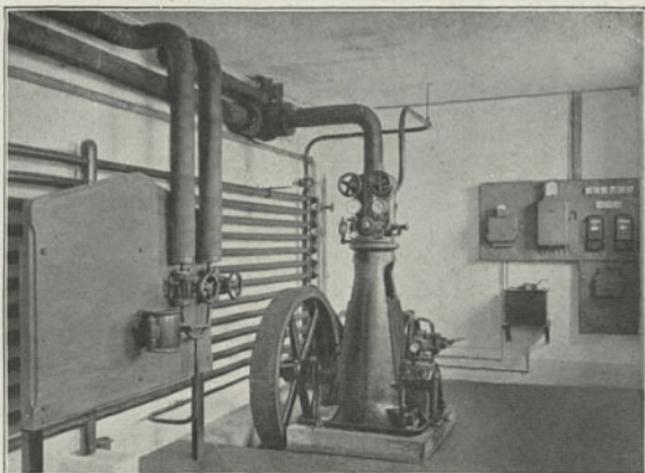
Dans la fermentation basse, on utilise le froid pour le refroidissement du moût, le maintien de ce moût à une température convenable par le refroidissement des caves de fermentation, et enfin celui des caves de garde, des chambres de soutirage et des magasins à houblon.

Le moût, qui sort de la chaudière à $+ 100^{\circ}$, est mis en contact avec l'air dans de grands bacs plats, ou bien oxygéné dans des appareils spéciaux où l'on injecte de l'air stérilisé; sa température tombe alors à $+ 70^{\circ}$. On le refroidit ensuite rapidement sur des réfrigérateurs en tôle ondulée où il tombe extérieurement, tandis que l'appareil est parcouru intérieurement par de la saumure refroidie. C'est alors que la fermentation intervient.

Cette fermentation doit s'effectuer à $+ 10^{\circ}$ au maximum, sinon la bière prendrait un mauvais goût. Or, pour maintenir cette température, il est nécessaire de fournir au moût 1 500 frigories par hectolitre. C'est pourquoi la fermentation s'effectue dans des caves spéciales où sont rassemblées les cuves.

Dans les anciennes brasseries, et actuellement encore dans celles de peu d'importance, on utilise des boîtes en fer étamé remplies de glace qui flottent dans les cuves. Ce sont les *nageurs de glace*, de plus en plus abandonnés. Les brasseries modernes ont adopté les serpentins dans lesquels circule la saumure refroidie à $- 7^{\circ}$ et qui plongent dans les cuves.

Pour conserver la bière après la fermentation, on la met dans des foudres aménagés dans les *caves* dites *de garde*. La température y est maintenue à $+ 2^{\circ}$ seulement. Comme une seconde fermentation a lieu à ce moment, les foudres sont maintenus ouverts par la bonde. Cette basse tempéra-



Cl. Escher-Wyss et C^{ie}.

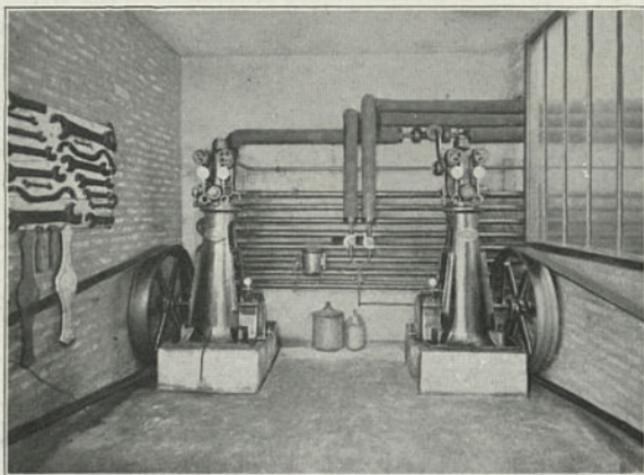
SALLE DES MACHINES FRIGORIFIQUES DE L'ABATTOIR DE ZOUG.



DÉGORGEMENT DU CHAMPAGNE A LA GLACE.



INSTALLATION FRIGORIFIQUE DANS UNE BOULANGERIE.



Cl. Escher-Wyss et C^{ie}.

SALLE DES MACHINES FRIGORIFIQUES DES ÉTABLISSEMENTS
FLEURY ET MICHON.

DANS LES INDUSTRIES ALIMENTAIRES

ture a pour effet de maintenir dans la bière l'acide carbonique qu'elle tient en dissolution.

Lorsque la bière doit être soutirée, l'opération s'effectue encore à la température de $+ 8^{\circ}$ à $+ 10^{\circ}$.

Quant au houblon, il est conservé dans des chambres spéciales à la température de 0° , dont l'état hygrométrique est de 0,50 environ.

L'utilisation des machines frigorifiques à vapeur d'eau en brasserie est envisagée actuellement pour la production de l'eau glacée destinée à remplacer la saumure dans les réfrigérants à moûts. Bien des brasseurs remplacent déjà cette saumure par de l'eau douce glacée qui leur donne plus de sécurité, tout en utilisant la circulation générale de l'installation frigorifique pour produire cette eau. Il paraît préférable de séparer complètement le service de l'eau glacée de la circulation générale de saumure en la produisant avec des machines frigorifiques à vapeur d'eau.



CHAPITRE XI

LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU FROID

La récupération des liquides volatils. || Débenzolage du gaz. || Le transport du gaz à longues distances. || Extraction de la paraffine. || Industrie des matières grasses. || La congélation des terrains. || La glace sèche. || La production du froid par le gel de silice. || L'extraction des sels de Glauber. || La séparation des mélanges gazeux industriels. || Les pistes de patinage. || Le rafraîchissement des régions tropicales. || Le froid et les alliages métalliques. || Le cuir et les fourrures. || Le froid et les hauts fourneaux. || Le béton et le froid. || Le rafraîchissement des salles de cinéma. || La mouture froide. || Les moteurs électriques refroidis. || La boulangerie. || La conservation des feuilles de mûrier en chambre froide. || Horticulture. || Conservation des cadavres. || Refroidissement des vaccins.

NOUS résumons, dans ce chapitre, tout ce qu'il est possible de connaître quant aux applications industrielles du froid. Il est très peu d'industries qui ne soient tributaires de températures plus ou moins basses que l'on réalise soit par l'intermédiaire de la glace, soit directement par les machines à froid. Mais les procédés d'utilisation constituent en règle générale des secrets que les intéressés se gardent jalousement de faire connaître. C'est pourquoi nous devons nous contenter, souvent, d'indications générales.

LA RÉCUPÉRATION DES LIQUIDES VOLATILS. ¶ ¶

Dans les usines de fabrication du celluloïd, de soie artificielle, dans les fabriques de poudre sans fumée, dans celles qui traitent le caoutchouc, on utilise des liquides coûteux, comme l'alcool, l'éther, l'acétate d'éthyle, le benzol, dont les vapeurs,

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU FROID

il y a quelques années encore, se perdaient dans l'atmosphère.

Pour les récupérer, M. Georges Claude a imaginé le dispositif suivant (fig. 42). L'air chargé de ces vapeurs est comprimé à environ 2 atmosphères,

puis envoyé dans un réfrigérant parcouru en sens inverse par de l'air refroidi par détente, où il est soumis à des températures de plus en plus basses. Sous l'effet progressif de ces températures, la vapeur d'eau tenant très peu d'alcool commence à se condenser, débarrassant ainsi l'air de sa présence. Les gaz peuvent alors atteindre une température un peu plus basse sans risque de congélation, pour y condenser de l'eau plus al-

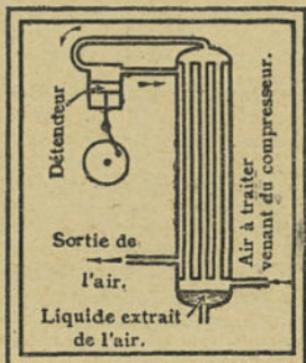


Fig. 42. — Principe de la récupération des solvants Georges Claude.

coolisée, laquelle peut atteindre une région plus froide et ainsi de suite. Au sommet du faisceau, la température étant de -100° environ, les dernières traces d'éther sont liquéfiées. Finalement, à la base de l'appareil, on recueille le solvant mélangé à l'eau; il est facile de séparer les deux liquides.

Dans la fabrication des poudres sans fumée, la qualité du produit et sa bonne conservation dépendent de leur homogénéité physique et chimique. Ce résultat ne peut être obtenu que par une fabrication au cours de laquelle toutes les manipulations s'effectuent toujours à une même température. Le traitement comporte deux phases : en premier lieu, le séchage par de l'air chaud et sec, bien purifié; ensuite, le refroidissement à -15° de cet air qui s'est chargé des vapeurs du dissolvant. Une poudrerie produisant 20 tonnes par jour

LE FROID

utilise un compresseur de 40 000 frigories-heure et le volume de l'air traité est de 1 000 mètres cubes à l'heure. On récupère ainsi une moyenne de 7 000 litres d'éther et d'al-

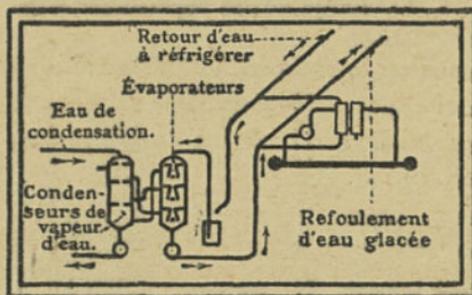


Fig. 43. — Récupération des dissolvants volatils par condensation sur des métiers à caoutchouter au moyen des appareils à froid Scam-Follain.

cool en vingt-quatre heures. C'est là un exemple remarquable de l'emploi du froid pour récupérer les dissolvants utilisés dans les industries chimiques.

M. Follain a réalisé diverses installations de récupération du benzol dans les usines de fabrication de tissus caoutchoutés. On sait que le benzol permet de dissoudre la gomme pour réaliser l'imprégnation des tissus. Le tissu reçoit la gomme dissoute entre deux cylindres, puis parcourt une table chauffante enveloppée dans un tunnel très aplati où circule de l'air chaud.

Cet air se sature de benzol, qui se dégage du tissu sous l'action de la chaleur; il est aspiré par un ventilateur qui le refoule dans un condenseur où il se débarrasse partiellement du

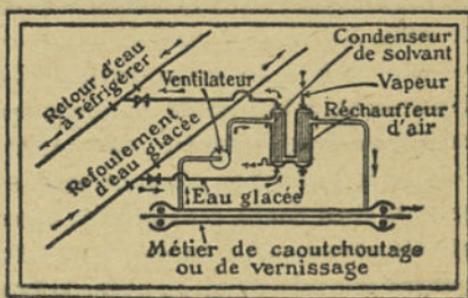


Fig. 44. — Détails de l'installation de récupération Scam-Follain.

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU FROID

benzol qu'il tient en suspension et retourne au tunnel. On récupère ainsi une partie du liquide, mais moins en été qu'en hiver, à cause de la température plus élevée de l'eau de circulation (fig. 43 et 44)).

Dans des installations où la récupération n'était que de 35 p. 100 en moyenne elle a été plus que doublée par l'emploi de la machine Follain qui fournit de l'eau à une température basse et régulière.

DÉBENZOLAGE DU GAZ. Dans ces industries, une partie du benzol est entraînée par le gaz, tandis que l'huile de

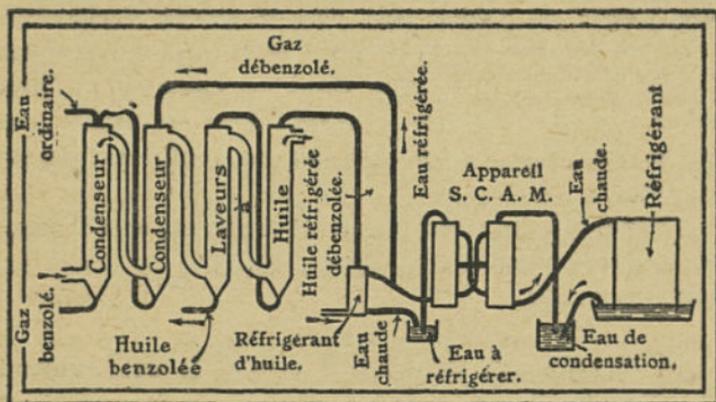


Fig. 45. — Installation de débénzolage du gaz de cokeries et d'usines à gaz.

lavage en dissout une certaine quantité. Pour récupérer le plus possible de benzol, il est nécessaire que l'huile soit convenablement refroidie, afin d'éviter que la tension du benzol dissous dans l'huile soit égale à celle du benzol dilué dans le gaz. Si ces deux tensions sont égales, l'huile ne peut plus absorber de benzol et il s'échappe avec le gaz en pure perte. Cependant, il convient de ne pas exagérer le refroidisse-

LE FROID

ment de l'huile qui la rendrait plus visqueuse et, de ce fait, diminuerait son pouvoir absorbant.

D'autre part, le gaz doit être également refroidi à une température légèrement inférieure à celle de l'huile, afin d'éviter la condensation de la vapeur d'eau sur l'huile, car le gaz est saturé de vapeur d'eau.

Notre figure montre une installation de débenzolage (fig. 45). L'eau à réfrigérer est aspirée, sous l'effet du vide, à travers la colonne de l'évaporateur dans lequel elle se refroidit par évaporation partielle et est extraite par une pompe centrifuge qui refoule, d'une part, vers le réfrigérant d'huile, et, d'autre part, vers le dernier condenseur (scrubber) placé avant le premier laveur à huile. Comme l'évaporateur, le condenseur étagé de l'appareil à froid aspire sous l'effet du vide l'eau qui lui est nécessaire; une pompe centrifuge renvoie cette eau au réfrigérant atmosphérique.

A la cokerie des hauts fourneaux de Rouen, on a obtenu, par ce moyen, une récolte supplémentaire de 10 tonnes de benzol par mois.

LE TRANSPORT DU GAZ A LONGUES DISTANCES.

En refroidissant le gaz à $+ 1^{\circ}$, sa teneur en naphthaline est abaissée à environ 5 centièmes de gramme. Il y a là une possibilité de transporter le gaz sur les longues distances sans craindre le dépôt de naphthaline à l'intérieur des conduites par les temps froids. On sait, en effet, que le transport du gaz non refroidi, gaz naturel ou gaz de houille, s'accompagne toujours de dépôts de naphthaline qui réduisent la section des conduits et, comme conséquence, accroissent leur résistance.

EXTRACTION DE LA PARAFFINE. La paraffine

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU FROID

est tirée de l'huile de pétrole. Quand on distille cette huile, on obtient d'abord de l'essence, puis du pétrole lampant. Le résidu, distillé à son tour, donne des huiles à paraffine et un autre résidu qui fournit les huiles fines à machine.

Des huiles à paraffine, on extrait d'abord le goudron par l'acide sulfurique; ce qui reste est traité par le froid entre $+ 10^{\circ}$ et $+ 15^{\circ}$, puis entre 0° et $+ 5^{\circ}$, et enfin entre 0° et $- 18^{\circ}$. Toute la paraffine du pétrole est ainsi extraite.

INDUSTRIE DES MATIÈRES GRASSES. // Nous savons déjà que le froid conserve les matières grasses, telles que le beurre. Par lui aussi, à des températures d'ailleurs peu basses (de $+ 6^{\circ}$ à $+ 8^{\circ}$), on extrait la margarine des huiles d'olive, de coton, d'arachide, de lin. Si on fait refroidir ces huiles, lentement, à quelques degrés au-dessous de zéro, on oblige les cellules végétales à se séparer. On emploie également le froid dans la fabrication des beurres végétaux, de la margarine du commerce, dans celle des savons et des bougies.

LA CONGÉLATION DES TERRAINS. // Lorsqu'il s'agit de creuser des puits de mine, on se préoccupe surtout de la présence des terrains aquifères qu'il faudra traverser.

Il est devenu courant de congeler ces terrains. Le premier essai eut lieu aux mines d'Anzin en 1886. La congélation fut même employée lors de la construction de la partie du tunnel du métropolitain qui relie les caissons de la place Saint-Miche à ceux qui avaient été foncés en Seine.

Voici comment s'effectue le forage d'un puits de mine à l'aide du froid.

Si on doit forer un puits de 5 mètres de diamètre, par exemple, on creuse, sur une circonférence enveloppante de 6 m. 50 environ, des trous distants de 1 mètre les uns des

LE FROID

autres dans lesquels on introduit les tubes congélateurs.

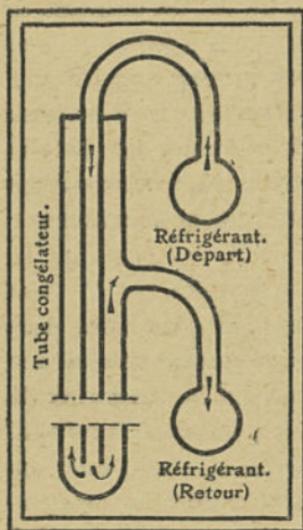


Fig. 46. — Tube congélateur pour puits de mine.

terrain congelé constitue une couronne qui enveloppe entièrement le futur puits de mine (fig. 47). On peut alors procéder aux travaux. La dépense de frigories est assez grande pendant la période de congélation, mais elle diminue fortement ensuite puisqu'il suffit de maintenir une température acquise. Elle augmente grandement lorsque le puits doit traverser une nappe d'eau souterraine, et surtout lors-

Ceux-ci comportent deux tubes concentriques ménageant entre eux une couronne annulaire. Le tube intérieur est relié à l'arrivée de la saumure refroidie et l'autre à la sortie. La saumure, à -10° généralement, descend donc jusqu'à la base du tube intérieur et remonte par le tube extérieur en contact avec le terrain à congeler (fig. 46).

Le sol se congèle lentement autour de chaque tube; au bout de trente à quarante-cinq jours, suivant les cas, la congélation atteint un rayon de 0 m. 50 autour des tubes. A ce moment, le

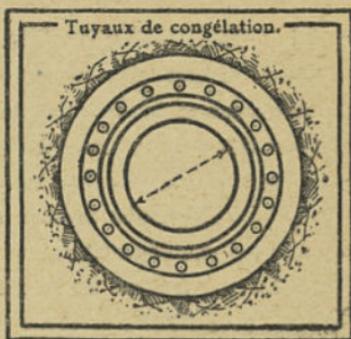


Fig. 47. — Disposition des tuyaux de congélation autour d'un puits de mine.

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU FROID

que cette eau contient des sels minéraux qui abaissent sa température de congélation.

LA GLACE SÈCHE. // // Voici un produit nouveau qui est appelé à modifier grandement l'industrie du froid, notamment pour ce qui concerne la conservation des denrées alimentaires. C'est la glace du gaz carbonique, improprement appelé « acide » carbonique, puisqu'il ne possède aucune propriété des acides, et que nous en consommons tous les jours dans les boissons gazeuses.

Elle se présente sous la forme de blocs d'un blanc pur, dont la température atteint — 80° et qui passent directement de l'état solide à l'état gazeux. C'est là un avantage énorme sur la glace ordinaire, dont les manipulations laissent partout des traces liquides fort désagréables. Aussi la glace carbonique tend-elle à remplacer de plus en plus la glace ordinaire pour la conservation des denrées alimentaires dans les glaciers et même dans les wagons frigorifiques pour leur transport.

Ce progrès n'est encore réalisé qu'en Amérique, pays du froid, mais il a également pénétré en France, et depuis un an *La Carbonite française* livre régulièrement des blocs de 10 kilogrammes à quelques fabricants de crèmes glacées qui ont pu apprécier le nouveau produit.

On fabrique la glace sèche en partant du gaz carbonique, suivant divers procédés. Le plus courant est basé sur la détente. Il est inutile de faire passer le gaz par l'état liquide. On le comprime dans les bouteilles qui servent à son transport et on le laisse ensuite se détendre à la pression atmosphérique dans une colonne en tôle où il se convertit en neige. Cette neige tombe à la base de la colonne où elle est recueillie « à la pelle » comme de la farine. Elle est ensuite comprimée en blocs de 10 kilogrammes sous une presse.

LE FROID

Sa température est de $-78^{\circ},4$. Nous sommes donc en présence non de glace, mais de neige comprimée.

La glace sèche est conservée dans des fosses bien isolées, puis livrée, enveloppée dans du carton ondulé et du papier, par des camions également isolés.

Abandonnée à l'air libre, elle se transforme directement en une vapeur plus lourde que l'air, qui est du gaz carbonique (sublimation), se recouvre de givre provenant de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique et disparaît assez rapidement. Si on jette un morceau de cette glace dans une casserole contenant de l'eau, d'énormes bulles de gaz se dégagent sans arrêt, mais l'eau ne se refroidit nullement; cela tient à ce fait que le bloc se couvre d'une pellicule de glace d'eau qui empêche la propagation du froid dans toute la masse.

La manipulation de cette glace doit être entourée de certaines précautions. Il faut éviter de la saisir directement avec les doigts, sous peine de brûlure. Pour la débiter, on se couvrira les mains de gants et il sera prudent de mettre des lunettes afin qu'aucun fragment ne se projette dans les yeux.

En dehors des conditions de propreté qui accompagnent sa manipulation, la glace sèche possède des qualités réfrigérantes beaucoup plus élevées que la glace ordinaire. C'est pourquoi, en Amérique, on l'utilise pour le transport des *ice creams* et même pour celui du poisson, sur de très grandes distances, dans des wagons isothermes (fig. 48). Quoique le prix de cette glace soit dix fois supérieur à celui de la glace ordinaire, son rendement la rend plus économique. Ainsi pour transporter un wagon de poisson frais de New York à Détroit, il suffit de 550 kilogrammes de glace sèche, alors que la quantité de glace d'eau nécessaire pour effectuer le même trajet est de 8 tonnes, et 800 kilo-

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU FROID

grammes de sel, avec deux arrêts pour le rechargement du wagon en cours de route. De plus, l'absence d'eau sur les planchers des wagons réalise une sérieuse économie de matériel roulant. Les pertes par évaporation sont inférieures à 10 p. 100.

Grâce à ce produit, le transport et la conservation de la plupart des denrées alimentaires, comme le beurre, le lait, le fromage, les œufs, peuvent être réalisés dans des conditions bien supérieures aux procédés actuels. La glace carbonique intervient même dans le raffinage des

huiles, les essais de câbles électriques à basse température, la conservation des laines, des fourrures. Une tonne de glace sèche maintient un wagon de viande pendant six jours à la température de 1°7

La nouvelle glace est donc appelée à un avenir plein de promesses. En France, en dehors de *La Carbonite française*, plusieurs usines productrices se construisent actuellement, notamment à Lille, Nancy, Lyon, Marseille. Il en existe déjà d'ailleurs en Belgique, en Allemagne et en Suisse.

LA PRODUCTION DU FROID PAR LE GEL DE SILICE. Le gel de silice est un sable de silice chimiquement inerte vis-à-vis de toutes les substances. La fabrication est conduite de façon à donner un produit poreux, dont les pores, invisibles même au microscope, représentent les 41 p. 100, en volume, de la matière. Cette conformation lui permet d'absorber 25 p. 100 de son propre poids de vapeur

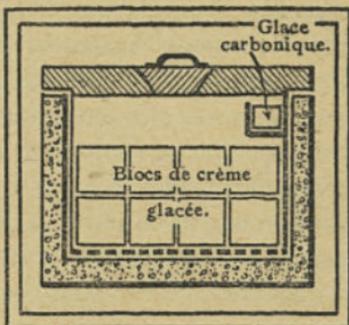


Fig. 48. — Seau utilisé aux Etats-Unis pour le transport des crèmes glacées.

LE FROID

d'eau. Lorsqu'on chauffe le produit, la vapeur se dégage et, après refroidissement, redevient capable d'une nouvelle adsorption (1).

On voit que le gel de silice peut constituer l'élément essentiel d'une machine à adsorption. Dans les appareils construits sur ce principe par la société Copeland Products Inc., les organes ont été si parfaitement étudiés que la production du froid est constante.

Un wagon frigorifique a été équipé avec un tel adsorbent, un évaporateur et un condenseur. Le gel de silice absorbe des vapeurs d'anhydride sulfureux. Chauffé au gaz, il abandonne ces vapeurs, qui vont se liquéfier dans le condenseur. En pratique, pour obtenir une production continue de froid, on installe deux adsorbents de petit diamètre travaillant l'un après l'autre.

L'évaporateur est constitué par un réseau de tubes fixés au plafond du wagon. Quant au condenseur à refroidissement par l'air, il est installé sur le toit. La durée du chauffage est de trente minutes et il s'écoule deux heures et demie entre deux périodes successives de chauffage. L'adsorption dure quatre heures et demie. Un thermostat placé dans le wagon règle la température en agissant sur le chauffage des adsorbents.

Au cours du voyage d'essai, la température du wagon ne dépassa jamais celle fixée par le thermostat; elle se maintint constamment à $-16^{\circ},7$; celle des filets de poisson était de $-7^{\circ},8$ au moment du chargement. Au moment du déchargement, on constata que les filets étaient à la température de $-10^{\circ},6$ après un séjour de onze jours dans le wagon.

(1) On réserve le mot « adsorbent » à l'appareil fonctionnant avec un corps solide. Les liquides sont absorbants et les solides adsorbants.

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU FROID

LA LIQUÉFACTION DU CHLORE. ¶ ¶ Georges Claude réalise la liquéfaction du chlore par simple compression en utilisant un lubrifiant qui est l'acide sulfurique. Certains industriels font intervenir le froid sans compression.

L'EXTRACTION DES SELS DE GLAUBER. ¶ ¶ Le froid est employé dans presque toutes les fabrications de produits chimiques, mais il est presque impossible d'obtenir le moindre renseignement sur l'usage qui en est fait.

Ainsi les grandes fabriques de matières colorantes sont sillonnées de tubes conduisant la saumure refroidie à des cuves où s'effectuent les opérations de la chimie organique. La glace fabriquée sur place, puis broyée, intervient directement dans les solutions à refroidir pour abaisser leur température, empêcher les décompositions et élever le rendement en matières colorantes; enfin, certains composés fournissent, aux basses températures, des substances colorantes autres que celles qu'ils donnent à des températures élevées.

D'ailleurs, le principe fondamental de l'emploi du froid dans les industries chimiques réside dans les trois grandes manipulations de séparation, de cristallisation et de prévention des décompositions. Nous en arrivons ainsi à parler de l'extraction du sel de Glauber que l'on est parvenu récemment à produire en grosses masses. Disons d'abord quelques mots du compresseur.

C'est un compresseur rotatif actionné par une turbine admettant de la vapeur à la pression de 25 kilogrammes et à la température de 350°, qui produit 8 millions de frigories-heure. C'est la machine du genre la plus puissante du monde. Le turbo-compresseur a été construit par la société suisse Brown-Boveri pour l'usine chimique allemande de Kaisersoda, qui appartient à la Kali-Industrie A. G. Les machines rotatives ne conviendraient pas pour des instal-

LE FROID

lations modestes, en raison de l'important débit qu'elles fournissent; on ne peut les employer que si ce débit est supérieur à 50 mètres cubes à la minute, débit correspondant à une puissance de 1 300 000 frigories-heure, avec l'ammoniaque.

Le compresseur est constitué par trois corps de compression de cinq éléments chacun. Un élément comprend une roue mobile et un diffuseur. Le gaz admis dans la roue immobile est chassé dans le diffuseur, où sa vitesse est transformée en pression. De là, il pénètre dans la roue mobile de l'élément suivant, où le même phénomène se reproduit, ainsi que dans les autres éléments qui suivent. La compression s'effectue donc en trois étapes différentes (compresseur étagé) : basse pression, moyenne pression, haute pression. Le fonctionnement des éléments de chaque étage est le même, mais la pression augmente lorsque le gaz passe d'un élément à un autre et d'un étage à l'étage suivant.

Le compresseur est entraîné par sa turbine à la vitesse de 6 000 tours par minute en absorbant 2 365 chevaux. Si la température est de -15° à l'évaporateur et de $+30^{\circ}$ au liquéfacteur, il fournit 6 millions de frigories-heure; mais si cette dernière température tombe à 25° , le rendement atteint 8 millions de frigories-heure.

Le sel de Glauber est du sulfate de soude cristallisé; c'est la matière première pour la fabrication du verre; l'industrie des matières colorantes en consomme également de grandes quantités. Sa fabrication est une branche secondaire de l'industrie de la potasse. Les résidus solubles de cette industrie sont traités avec du sel marin dissous dans l'eau et soumis à une température de -4° à -5° . Les deux composés se séparent : sel marin et eau d'une part, sel de Glauber d'autre part.

Il y a quelque dix ans, la fabrication ne pouvait guère

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU FROID

s'effectuer qu'en hiver, mais, depuis l'introduction des machines à froid, elle est devenue permanente. Dans l'installation actuelle, le mélange est refroidi à -5° .

On extrait également le sel de Glauber dans les usines à cuivre et dans les grosses industries de production de l'acide sulfurique. Les minerais sont grillés avec addition de sel marin et lessivés avec de l'eau et de l'acide chlorhydrique. Les machines à froid permettent de séparer le sel de Glauber par cristallisation.

LA SÉPARATION DES MÉLANGES GAZEUX INDUSTRIELS. Les gaz industriels : gaz à l'eau, gaz d'éclairage, gaz se dégagant des fours à coke, contiennent tous de l'hydrogène qu'il était intéressant de séparer de tous les carbures qui l'accompagnent en vue de son utilisation dans la préparation de l'ammoniaque synthétique. Le problème a été posé par Georges Claude et résolu avec beaucoup de simplicité, sinon sans de longs travaux d'approche.

La rectification s'effectue dans une colonne double à faisceaux tubulaires qui reçoit, à la base, le mélange des gaz dont le point d'ébullition est assez éloigné (méthane, -161° , 37, hydrogène, -252° , 73) pour permettre la séparation assez facilement. Le mélange gazeux pénètre à la base de l'appareil, se refroidit dans le faisceau inférieur au contact du méthane liquide, puis le méthane se liquéfie et est remonté dans la seconde colonne de rectification, où il retombe en pluie en rencontrant l'hydrogène qui, non condensé, s'élève dans la colonne. Il est ensuite ramené dans le faisceau inférieur par la canalisation P (fig. 49).

Mais il reste encore du méthane, dont une partie disparaît pendant cette seconde phase de son ascension, et nous le retrouvons liquéfié en A. Une pompe le relève encore en un point plus élevé de la colonne, où il continue à purger

LE FROID

l'hydrogène. A partir de ce moment, on peut considérer l'hydrogène comme à peu près pur; il s'échappe alors vers le détenteur, qui reçoit en même temps une certaine quantité

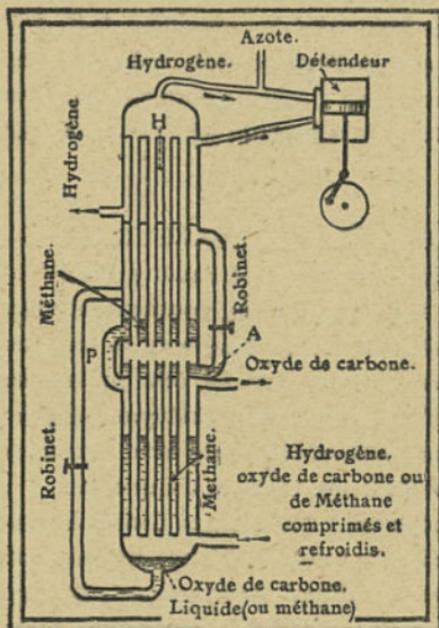


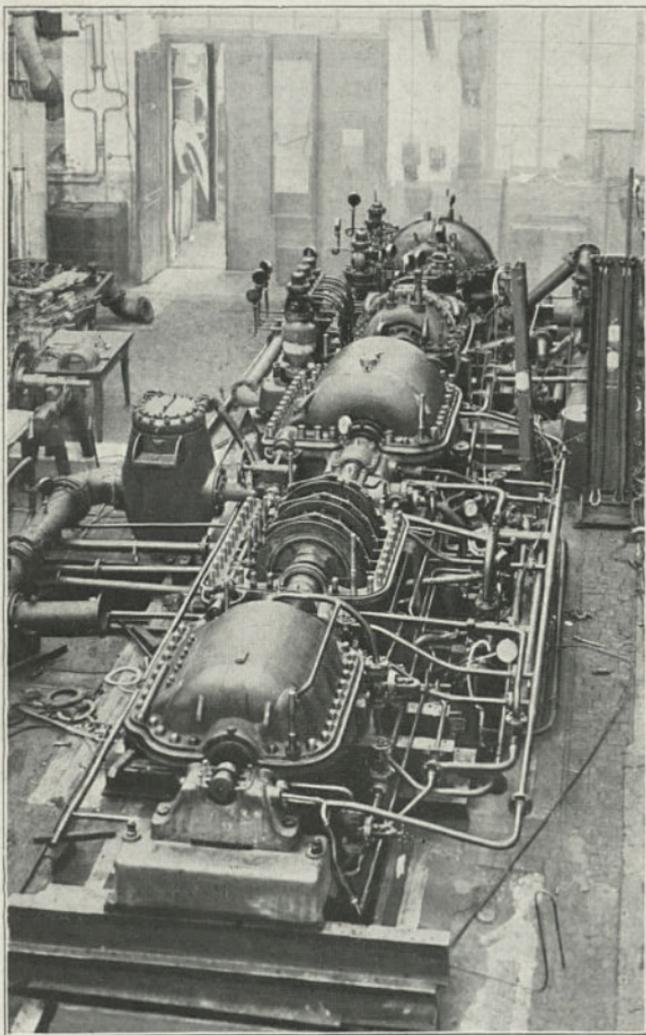
Fig. 49. — Procédé Claude pour l'extraction de l'hydrogène des gaz sortant des fours à coke en vue de la fabrication synthétique de l'ammoniaque.

d'azote, introduit pour lubrifier le détenteur. C'est cette introduction d'azote qui a permis le fonctionnement de l'appareil. Voici comment :

L'hydrogène qui s'échappe par le haut de la colonne de rectification est à une température encore très éloignée de son point de liquéfaction. Si on le détend, cette température s'abaissera encore sans qu'il se produise la moindre liquéfaction; mais un autre gaz, l'azote par exemple, intro-

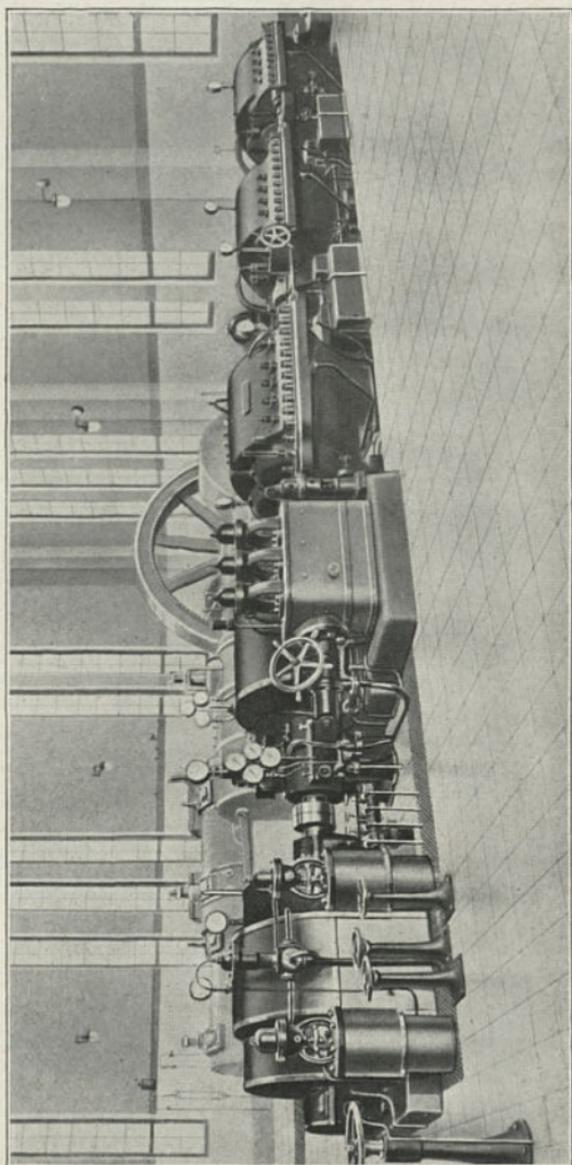
duit en même temps que lui et venant d'une source extérieure, y trouvera la température nécessaire à sa liquéfaction, (environ -207°). C'est ainsi que l'azote remplit les fonctions de lubrifiant et permet à la machine de marcher.

L'hydrogène, comprimé ensuite, est refoulé dans la partie supérieure H du faisceau et s'échappe vers les appareils



Cl. Brown Boveri et C^o.

GRUPE COMPRESSEUR A AMMONIAQUE DE 6 A 8 MILLIONS DE
FRIGORIES-HEURE.



COMPRESSEUR A AMMONIAQUE POUR L'EXTRACTION DU SEL DE GLAUBER.
Cl. Iroux Bovy et Cie.

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU FROID

d'utilisation, qui le recueillent en vue de la synthèse de l'ammoniaque.

On récupère ainsi, non seulement un gaz précieux, mais aussi d'autres gaz, tels que l'oxyde de carbone et surtout le méthane, qui sont utilisés pour le chauffage des fours. Dès maintenant, les cokeries françaises s'équipent avec des appareils Georges Claude ; Béthune produira prochainement, grâce à la récupération de l'hydrogène, 60 tonnes d'ammoniaque par jour ; Aniche, 60 tonnes également ; Decazeville, 10 tonnes ; Saint-Etienne, 20 tonnes ; Ougrée-Marihaye, 60 tonnes. L'ensemble des cokeries françaises ainsi équipées serait capable de produire 1 000 tonnes d'ammoniaque par jour, soit par an 1 500 000 tonnes de sulfate d'ammoniaque, dix fois plus que ce qu'utilise l'agriculture aujourd'hui.

LES PISTES DE PATINAGE. *o o* Les plus anciennes pistes de patinage sont le « Pôle Nord », à Paris, qui fut inauguré en 1892, et le « Palais de Glace », à Paris également, construit l'année suivante. Depuis lors, les grandes villes d'Europe ont suivi l'exemple : il existe de belles pistes à Londres, Bruxelles, Lyon, Nice, Glasgow, Berlin, Vienne, Leningrad, etc.

L'une des plus modernes est le Palais des Sports, à Berlin, transformé en Palais de Glace en 1925. Le compresseur, à ammoniaque, est à deux étages de compression ; il produit 340 000 frigories-heure dans la saumure à -10° et est actionné par une machine à vapeur de 220 chevaux. Le condenseur est du type à ruissellement. La vapeur d'échappement est utilisée pour le chauffage de l'établissement. L'évacuation des eaux de refroidissement n'étant pas admise dans les égouts, ces eaux sont constamment utilisées en leur ajoutant un peu d'eau fraîche.

LE FROID

La saumure est refoulée dans les tuyaux de la piste par une pompe de 240 mètres cubes à l'heure et sa température se relève de 1° à 1°,5 pendant son passage sous la piste. Le réseau tubulaire de la piste repose sur un revêtement d'asphalte isolé du sol par 60 centimètres de liège placé entre deux couches de béton.

Il existe également dans différentes villes des pistes à l'air libre. L'idée de ces pistes appartient à M. Engelmann, de Vienne. Plusieurs systèmes de tuyauteries ont été préconisés : tubes de section carrée placés très près les uns des autres, tubes de section ovale ou même tuyaux à gaz ordinaires. On a même préconisé la construction d'une vaste cuvette en tôle, ayant les dimensions de la piste, dans laquelle est logée une autre cuvette légèrement plus petite et de bords moins élevés, soutenue dans la première par des fers à double T. La saumure circule entre les deux cuvettes et congèle l'eau contenue dans la seconde.

A Budapest, l'installation comporte un compresseur de 600 000 frigories-heure. La saumure est aspirée dans le refroidisseur par une pompe qui débite 7 500 litres par minute. La piste est divisée en quatre parties indépendantes ; on en congèle une, deux ou trois ou la totalité, suivant les besoins. L'isolement entre le sol et les tuyaux est assuré par une couche d'air.

La plus grande piste de glace artificielle a été établie en Amérique pour compléter la mise en scène d'un film intitulé *Le Moulin Rouge*. Un canal a été spécialement creusé pour filmer des fêtes printanières ; il fut ensuite congelé en disposant dans l'eau des réseaux de tubes métalliques dans lesquels fut envoyé de l'ammoniaque détendu au moyen d'un compresseur. Les techniciens qui avaient entrepris ce travail s'étaient rendu compte que la congélation rapide d'une telle masse d'eau déterminerait une dilatation telle que les

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU FROID

parois du canal eussent été incapables de résister. Ils tournèrent la difficulté en terminant ce canal par une cloison mobile qui, sous la poussée de la glace, se déplaça de 2 mètres.

LE RAFRAICHISSEMENT DES RÉGIONS TROPICALES. // Par une méthode extrêmement hardie et originale, MM. Georges Claude et Boucherot sont parvenus à utiliser la différence de température qui existe entre les eaux profondes et les eaux superficielles des océans pour faire fonctionner des turbines. Ces engins sont attelés à des alternateurs fournissant de l'énergie électrique sans dépense de combustible et à un prix de revient par conséquent infime.

Les eaux profondes remontant à la surface apportent avec elles le froid qu'elles ont emmagasiné dans les régions polaires et qu'elles conservent presque intégralement au cours de leur voyage vers les régions équatoriales. A 500 mètres de profondeur, leur température est de 10°, de 7° à 750 mètres, de 5° à 1 000 mètres, de 3°,5 à 2 000 mètres, de 3° à 4 000 mètres.

Comme la température des eaux superficielles est d'au moins 25°, le fait de puiser les eaux profondes à 750 mètres, par exemple, amènera à la surface de l'eau à 7° qui, après avoir rempli sa fonction dans l'installation envisagée, pourra être distribuée aux agglomérations du littoral afin de leur apporter la fraîcheur qui leur manque.

En admettant que cette eau sorte des appareils à la température de 10°, il lui faudra, pour atteindre celle de 20° aux dépens de l'air ambiant, absorber 10 000 calories par mètre cube; autrement dit, elle dégagera 10 000 frigories par mètre cube. Ces 10 000 frigories sont capables de refroidir 25 000 mètres cubes d'air en utilisant des frigorifères spé-

LE FROID.

ciaux dans lesquels les deux fluides seront en contact permanent.

M. Boucherot estime que le prix de revient du million de frigories ne dépassera pas 0 fr. 35 dans les gros débits. Une canalisation de 3 à 4 mètres de diamètre fournirait annuellement une quantité de froid correspondant à la production de 40 millions de tonnes de glace par an. Mais, ne nous y trompons pas, il ne s'agit ici que de rafraîchir les locaux d'habitation et les villes par l'évacuation dans les rues. Il serait impossible, avec toutes ces frigories, de produire un seul kilogramme de glace.

La circulation de cette eau fraîche aura pour effet de tempérer fortement les régions tropicales et de favoriser leur mise en valeur en y rendant le travail moins pénible.

LE FROID ET LES ALLIAGES MÉTALLIQUES. ❖ ❖

J. Dewar et R. Hadfield ont reconnu que, si l'on fait passer de la température ordinaire à celle de l'air liquide certains alliages métalliques, leurs propriétés physiques sont modifiées. Ainsi, pour ce qui concerne l'acier, la charge de rupture est doublée et les allongements diminuent peu à peu jusqu'à devenir nuls. Avec l'aluminium, les allongements passent de 7 à 27 p. 100. M. Guillet a effectué des essais au choc. A — 80°, la fragilité du fer n'est pour ainsi dire pas modifiée; à — 190°, elle est complète.

LE CUIR ET LES FOURRURES. ❖ ❖

L'entreposage des fourrures dans les chambres frigorifiques rend de grands services aux possesseurs. Il suffit qu'elles soient soumises à une température de 4° à 5° au-dessus de zéro pour arrêter l'activité des insectes. Les larves de mites ne peuvent être détruites qu'au bout de trois semaines à une température de — 15°.

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU FROID

Certaines peaux d'animaux à fourrures sont inutilisables parce que le cuir manque de souplesse. On parvient cependant à en tirer parti de la manière suivante :

Deux fourrures sont tendues sur un cadre métallique, l'une d'un côté, l'autre de l'autre, de manière que le côté fourrure soit à l'extérieur. On plonge le tout dans un bac d'eau douce transformée ensuite en glace par une machine frigorifique. Le bloc de glace étant sorti, le cadre métallique est légèrement chauffé ; il se détache et on obtient deux blocs emprisonnant chacun une peau.

Chaque bloc est ensuite scié à la naissance des poils : on recouvre alors la surface des poils d'un tissu souple enduit de colle. Chaque poil s'y trouve fixé et l'ensemble de la fourrure, intacte, a reçu ainsi un support... étranger qui lui apporte la souplesse marchande voulue. On récupère ainsi, par cet ingénieux procédé, la peau et la fourrure.

LE FROID ET LES HAUTS FOURNEAUX. ¶ ¶ On utilise le froid dans la métallurgie pour déshydrater l'air des hauts fourneaux afin d'éviter le refroidissement du coke. La consommation de combustible est ainsi diminuée.

LE BÉTON ET LE FROID. ¶ ¶ Les essais effectués par l'école technique supérieure de Stuttgart ont permis de reconnaître que tous les bétons fabriqués à la température de 0° n'atteignent pas leur résistance normale. Il est donc tout indiqué, dans la construction, de ne jamais préparer le béton lorsque la température se rapproche de 0°. Mais, si la résistance du béton atteint déjà 100 kilogrammes par centimètre carré lorsque la gelée survient, il n'est plus influencé.

LE RAFRAICHISSEMENT DES SALLES DE CINÉMA.
¶ ¶ On se préoccupe partout, lors de la construction des-

LE FROID

nouvelles salles de cinéma, de réserver aux spectateurs une atmosphère aussi pure et aussi fraîche que possible. Les machines productrices de froid peuvent encore, dans ce cas, intervenir judicieusement. Voici comment a été résolu le problème dans une salle américaine :

Les appareils fournissent 150 000 frigories-heure. Avant l'arrivée du public, un ventilateur aspire l'air par des ouvertures ménagées dans le plafond; cet air est ensuite refoulé à travers un frigorigène sous le plancher de la salle, d'où il s'échappe par un grand nombre de bouches d'aération. Comme le refroidissement détermine la dessiccation de l'air (à une température déterminée correspond un degré hygrométrique également déterminé et, à basse température, l'air ne retient qu'une faible quantité de vapeur d'eau), l'atmosphère de la salle est purifiée et à peu près sèche.

Pendant la représentation, il n'est pas possible de soumettre les spectateurs à l'arrivée d'air froid sous leurs pieds. On inverse alors la circulation d'air en aspirant par les ouvertures du plancher et en refoulant l'air froid par celles du plafond. Enfin, l'atmosphère est renouvelée par la prise au dehors d'une certaine quantité d'air frais.

LA MOUTURE FROIDE. ☞ ☞ Les moulins évitent maintenant les inconvénients dus à l'échauffement des céréales par un refroidissement énergétique qui s'effectue pendant le passage des grains dans les conduits, les élévateurs et les broyeurs. L'air est mis en mouvement par un ventilateur qui l'oblige à se refroidir et à se dessécher; il est ensuite filtré. Cette installation permet de traiter des blés très humides, normalement impossibles à moudre. On a constaté que le rendement en farine est augmenté de 1,5 à 2 p. 100 avec suppression des produits inférieurs.

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU FROID

LES MOTEURS ÉLECTRIQUES REFROIDIS. ▯ ▯

Dans une récente communication, M. Follain insiste sur le refroidissement des moteurs électriques en circuit fermé, notamment sur les sous-marins. Cette application est une précaution essentielle contre les incendies; de plus, elle permet le rejet au dehors des calories dégagées par le moteur et, comme conséquence, améliore les conditions d'habitabilité du sous-marin.

LA BOULANGERIE. ▯ ▯ Le froid industriel est peu employé en boulangerie, dans nos pays; en Amérique, on l'utilise couramment pour la maturation de la pâte, qui a été mélangée à la levure, pendant le pétrissage et la fermentation. Le froid peut être utilisé également pour le refroidissement du pain et l'entreposage de la levure qui doit être conservée à une température de $4^{\circ},4$ à $7^{\circ},2$ dans une atmosphère sèche. D'autre part, l'usage des pétrisseurs à grande vitesse exige de l'eau à $4^{\circ},4$, que l'on ne peut toujours se procurer en toute saison. Certains boulangers rafraîchissent les malaxeurs en faisant passer de la saumure dans l'axe creux; d'autres insufflent de l'air pur et refroidi à travers la masse pendant le pétrissage.

LA CONSERVATION DES FEUILLES DE MURIER EN CHAMBRE FROIDE. ▯ ▯ La station expérimentale du froid de Milan, ayant conservé par le froid une grande quantité de feuilles, en alimenta les vers à soie. A la fin du premier stade de la croissance, le petit ver mangea ces feuilles et sortit de la ramée au bout de trente-six jours, en produisant des cocons excellents.

Au Japon, l'emploi du froid est général pour entreposer les œufs du ver à soie eux-mêmes. En 1926, 15 millions de plaques furent entreposées dans 477 frigorifiques. On ne dit

LE FROID

pas à quelle température sont soumis les cocons reproducteurs et ceux destinés au dévidage.

HORTICULTURE. ∞ ∞ Le froid est un stimulant dans la production des fleurs. On sait, en effet, que certaines plantes bourgeonnent plus facilement et plus régulièrement quand elles ont subi l'action des gelées; mais les renseignements font encore défaut pour ce qui concerne les plantes susceptibles de bénéficier de ce phénomène dans les chambres froides. Le froid permet également de retarder les époques de la cueillette des fleurs saisonnières et de les avoir à sa disposition pendant toute l'année.

CONSERVATION DES CADAVRES. ∞ ∞ Dans toutes les villes tant soit peu importantes, des établissements spéciaux sont affectés à la conservation des cadavres par le froid en vue d'en empêcher la putréfaction.

Les ports sont particulièrement outillés dans ce dessein à cause de la fréquence des accidents.

A Hambourg, a été installée récemment une nouvelle morgue à l'hôpital. La chambre de conservation peut recevoir de 50 à 60 cadavres; près d'elle sont aménagées cinq caves de congélation refroidies à -15° et une armoire pour la congélation des préparations.

REFROIDISSEMENT DES VACCINS. ∞ ∞ Les vaccins sont conservés à basse température : -12° à -14° . Un meuble frigorifique a été spécialement construit pour cet usage par la maison Brown Boveri et C^{ie}, de Mannheim. Il est équipé avec un frigorigène A. S. et comporte un bac à saumure très fortement isolé au liège, qui contient quatre caisses cylindriques en fer-blanc et trois autres plus grandes, rectangulaires. On introduit les vaccins dans ces

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU FROID

dernières. Elles sont ensuite fermées avec des couvercles comportant un joint hermétique en caoutchouc. Les vaccins peuvent être ainsi conservés pendant plusieurs années et en très grandes quantités.

Chaque jour voit s'étendre les applications du froid. Toutes les industries en sont tributaires à un degré quelconque, parce que ses actions physiques, chimiques, et nous ajouterons thérapeutiques, sont si variées, si importantes que celui qu'intéresse le progrès y trouve des éléments de méthode inédite pour ses recherches. Nous citerons seulement le cas du grand savant qu'est Georges Claude, dont la succession des découvertes entraîne peu à peu une révolution industrielle se traduisant d'ores et déjà par la production abondante d'engrais et demain par l'amélioration des conditions d'existence dans les régions tropicales. La France est restée quelque peu en arrière jusqu'ici au point de vue du développement des industries frigorifiques et de leurs applications domestiques. Mais l'exemple de l'Amérique a créé un mouvement qui s'étend de plus en plus, qui gagne les châteaux et s'élargira vers les campagnes. On s'apercevra alors que le froid est aussi utile à la vie moderne que peut l'être l'électricité.



BIBLIOGRAPHIE

Matière, Electricité, Radiations (ce qu'il faut connaître pour suivre les progrès de la physique actuelle), par Marcel Boll.

Cours d'exploitation des Installations frigorifiques, par Banet-Rivet.

Bulletin mensuel des renseignements frigorifiques.

La Viande frigorifiée, par le D^r Laure.

Air liquide, Oxygène, Azote, Gaz rares, par Georges Claude, membre de l'Institut.

La Chaleur et le Froid, par A. Boutaric, professeur à la Faculté des Sciences de Dijon.

Le Froid industriel, par L. Marchis, professeur à la Faculté des Sciences de Paris.

La Revue générale du Froid et des Industries frigorifiques.

La Science et la Vie.

Je sais tout.

La Nature.

Machines et Aménagements frigorifiques, par Paul Angrand.

Le Froid, par A. Boutaric (Collection *Encyclopédie par l'Image*).



TABLE DES GRAVURES

	Pages
<i>PLANCHE I.</i>	
Installation productrice du froid par la vapeur d'eau.....	FRONTISPICE.
<i>PLANCHE II.</i>	
Récolte de la glace naturelle. Traîneau rotatif découpeur de glace	32
<i>PLANCHE III.</i>	
Amundsen, sur le <i>Maud</i> , est bloqué par les glaces.....	33
<i>PLANCHE IV.</i>	
Appareil de liquéfaction de l'air.....	48
<i>PLANCHE V.</i>	
Installation de sorbetières dans un bar à Londres. — Manutention des viandes congelées dans un entrepôt frigorifique	49
<i>PLANCHE VI.</i>	
Transvasement de l'oxygène liquide. — Un jet d'air liquide de courte durée est inoffensif. — Expansion violente de l'air liquide. — Caléfaction: expérience du verre.	56
<i>PLANCHE VII.</i>	
Tubes à gaz carbonique sous pression ; blocs de glace carbonique et leurs cartons d'emballage. — Neige carbonique.....	57
<i>PLANCHE VIII.</i>	
Laboratoire de Leyde : Appareil de liquéfaction de l'Hélium.....	72
<i>PLANCHE IX.</i>	
Laboratoire de Leyde : Appareils pour la liquéfaction de l'Hydrogène.....	73
<i>PLANCHE X</i>	
Machine frigorifique à vapeur d'eau. — Condensateur à ruissellement	88

TABLE DES GRAVURES

	Pages
<i>PLANCHE XI.</i>	
Essai des compresseurs. — École des Arts et Métiers : Usine Fixary.....	89
<i>PLANCHE XII.</i>	
Appareils de démoulage des pains de glace. — Emma- gasinage des blocs de glace dans une glacière.....	104
<i>PLANCHE XIII.</i>	
Armoire frigorifique. — Armoires frigidaire dans un magasin d'alimentation	105
<i>PLANCHE XIV.</i>	
Machine à glace de ménage. — Sorbetière automatique Corblin	120
<i>PLANCHE XV.</i>	
Appareil de Platen Munters. Machine à glace Escher- Wyss. Le condenseur, l'évaporateur du frigorigène A. S.	121
<i>PLANCHE XVI.</i>	
Wagon isotherme. — Intérieur d'un wagon frigorifique.	144
<i>PLANCHE XVII.</i>	
Wagon frigorifique. — Un groupe d'armoires frigori- fiques dans un grand restaurant parisien.....	145
<i>PLANCHE XVIII.</i>	
Fabrication des sorbets par le frigorigène. — Installa- tion frigorifique pour la conservation des fromages....	152
<i>PLANCHE XIX.</i>	
Compresseur à acide carbonique. — Salle des machines de la boucherie Bischer à Zurich.....	153
<i>PLANCHE XX.</i>	
Salle des machines frigorifiques de l'abattoir de Zoug. — Dégorgement du champagne à la glace.....	160
<i>PLANCHE XXI.</i>	
Installation frigorifique dans une boulangerie. — Salle des machines frigorifiques des Établissements Fleury et Michon.	161
<i>PLANCHE XXII.</i>	
Groupe compresseur à ammoniac de 6 à 8 millions de frigories-heure.....	176
<i>PLANCHE XXIII.</i>	
Compresseur à ammoniac pour l'extraction du sel de Glauber.....	177

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I

Page

LA CHALEUR ET LE FROID.

Qu'est-ce que la chaleur ? — Le froid est de la chaleur négative. — La température. — La quantité de chaleur. — La mesure des températures. — La mesure des quantités de chaleur. — Le zéro absolu. — Fusion et solidification. — La vaporisation. — La liquéfaction. — Les sources de froid. — Équivalent mécanique de la chaleur.....

7

CHAPITRE II

LE FROID DANS LA NATURE.

Le froid au début de l'ère quaternaire. — La neige. — Les glaciers. — Les glaces polaires. — La température de l'atmosphère. — La grêle. — Les hivers rigoureux. — Action du froid sur les organismes vivants. — Le froid en médecine. — Effets physiologiques du froid sur l'homme

22

CHAPITRE III

LA SCIENCE DU FROID.

L'histoire chronologique de la liquéfaction des gaz. — L'air liquide.....

38

CHAPITRE IV

LES GAZ ATMOSPHÉRIQUES.

La conservation de l'air liquide. — Les propriétés physiques de l'air liquide. — L'air liquide et le charbon. — Les applications de l'air liquide. — La séparation des éléments de l'air. Production de l'oxygène pur. — Principe du retour en arrière. — L'oxygène li-

(189)

LE FROID

quide. — L'extraction des gaz rares de l'atmosphère. — Pages
Le krypton et le xénon. — Les applications
industrielles de l'oxygène. — Appareils de sauve-
tage. — Les applications industrielles de l'azote... 50

CHAPITRE V

LES TRÈS BASSES TEMPÉRATURES.

Kammerlingh Onnes. — La liquéfaction de l'hydro-
gène. — La liquéfaction de l'hélium. — Les propriétés
des corps aux très basses températures..... 70

CHAPITRE VI

COMMENT L'INDUSTRIE PRODUIT LE FROID.

Les fluides frigorigènes. — Les machines à compres-
sion. — Le condenseur. — L'évaporateur. — Les ma-
chines frigorifiques à absorption. — Les machines à
vapeur d'eau. — Les machines à air. — Les machines
endothermiques. — Le rendement des machines
frigorifiques. — Les frigorifères. — La détente
directe. — Comment on conserve le froid dans
les chambres froides. — Nouveaux isolants..... 79

CHAPITRE VII

LA GLACE ARTIFICIELLE.

La fabrication de la glace. — Le rendement d'une
machine à glace. — Les glaciers. — La fabrication de
la glace à domicile. — Les usages de la glace. — La
crème glacée « ice cream »..... 99

CHAPITRE VIII

LES PETITES INSTALLATIONS FRIGORIFIQUES.

Les machines à absorption. — Les machines endo-
thermiques. — Les machines à compression. — Les ar-
moires frigorifiques. — Les installations commerciales. 110

CHAPITRE IX

LA CONSERVATION DES DENRÉES ALIMENTAIRES.

Le père du froid. — L'action du froid sur les denrées
alimentaires. — Procédé Ottessen. — Viandes fraîches
et viandes frigorifiées. — Les principes de la conser-
vation des denrées alimentaires. — Les frigorifiques

(190)

TABLE DES MATIÈRES

d'abattoirs. — Les abattoirs de Casablanca. — Les navires frigorifiques. — Les installations frigorifiques sur les paquebots. — L'installation frigorifique d'un grand restaurant. — Les entrepôts frigorifiques. — L'entrepôt frigorifique de Paris-Bercy. — L'entrepôt frigorifique des Halles. — Les wagons frigorifiques. — Les trains frigorifiques. — La conservation du poisson.	Pages 124
---	--------------

CHAPITRE X

LE FROID DANS LES INDUSTRIES ALIMENTAIRES.

Les produits de la boucherie et de la charcuterie. — Le froid dans l'industrie vinicole. — Les eaux-de-vie. — Pomologie. — La laiterie et les industries du lait. — Le lait congelé. — La crème et le beurre. — Les fromages. — La chocolaterie. — La brasserie.	148
--	-----

CHAPITRE XI

LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU FROID.

La récupération des liquides volatils. — Débenzologie du gaz. — Le transport du gaz à longues distances. — Extraction de la paraffine. — Industrie des matières grasses. — La congélation des terrains. — La glace sèche. — La production du froid par le gel de silice. — L'extraction des sels de Glauber. — La séparation des mélanges gazeux industriels. — Les pistes de patinage. — Le rafraîchissement des régions tropicales. — Le froid et les alliages métalliques. — Le cuir et les fourrures. — Le froid et les hauts fourneaux. — Le béton et le froid. — Le rafraîchissement des salles de cinéma. — La mouture froide. — Les moteurs électriques refroidis. — La boulangerie. — La conservation des feuilles de mûrier en chambre froide. — Horticulture. — Conservation des cadavres. — Refroidissement des vaccins.	162
--	-----



IMPRIMERIE CRÉTÉ
CORBEIL (S.-ET-O.)
1405-3-1930

