



Aperçu sur l'Histoire de la Production du Froid

1- Le Froid avant les machines frigorifiques

Glace Naturelle

L'Homme des pays tempérés s'est rapidement rendu compte que les denrées périssables pouvaient être conservées dans de bien meilleures conditions l'hiver que l'été. L'utilisation du « froid naturel » s'est faite très tôt et aussi très longtemps puisqu'au début du 20^{ème} siècle le marché de la glace naturelle était encore plus important que celui de la glace artificielle. La glace produite naturellement, sans machines, était :

- soit issue, de façon permanente, de régions froides et transportée sur de longues distances ;
- soit issue, de manière discontinue, des pièces d'eau des régions tempérées gelées par le froid hivernal. Il était nécessaire de conserver cette glace dans des édifices particuliers les « glaciers » dont les parois devaient être thermiquement isolantes.
- soit produite, toujours de manière naturelle, mais à l'instigation de l'homme, quand cela était possible. Ainsi, dans les pays au ciel très clair, on a pu produire de la glace dans des bassins largement ouverts vers le ciel. Le rayonnement thermique de l'eau permettait, dans certaines conditions atmosphériques, un refroidissement suffisant pour former de la glace¹.

Mélanges réfrigérants

On s'est avisé, sans doute fortuitement, que le mélange de certains sels dans l'eau abaissait notablement la température de la solution ainsi obtenue. Le premier à avoir évoqué l'usage, en Inde, au 4^{ème} siècle, de tels mélanges semble être l'écrivain arabe Ibn Abi Usaibia.

L'usage du refroidissement de l'eau par l'emploi du salpêtre est cité par le médecin italien Zimara, à Padoue (1530) et le médecin espagnol, Blas Villafranca, à Rome (1550). On a ensuite découvert que le mélange de neige et de sels permettait d'atteindre des températures encore plus basses. Ces phénomènes ont été relatés par Battista Porta (1589) et Tancredo (1607).

2- Les précurseurs et les savants

Dès le 17^{ème} siècle, la chaleur et le froid alimentèrent les réflexions des savants et philosophes comme Robert Boyle (1627-1691) en Angleterre et Mikhail Lomonossov (1711-1765) en Russie. Dans la même période, après les premiers travaux de Galilée, de très nombreuses études furent entreprises sur la thermométrie où s'illustrèrent Guillaume Amontons (1663-1705) en France, Isaac Newton (1642-1727) en Angleterre, Daniel Fahrenheit (1686-1736), allemand qui travailla en Angleterre et aux Pays-Bas, René de Réaumur (1683-1757) en France et enfin Anders Celsius (1701-1744) qui créa, en 1742, en Suède, l'échelle thermométrique centésimale.

¹ En prenant des précautions convenables, le Professeur Trombe a pu obtenir le refroidissement de surfaces noires, exposées au ciel clair, de 30 à 35 K au dessous de la température ambiante. Au 5^{ème} siècle avant J-C, le grec Protagoras rapportait que les Egyptiens produisaient ainsi de la glace dans des récipients plats placés sur le toit des maisons.

William Cullen (1710-1790) observa que l'évaporation de l'éther éthylique en abaisse la température. Il obtint, en 1755, un peu de glace en faisant évaporer de l'eau sous une cloche à vide. Son disciple et successeur, l'écossais Joseph Black (1728-1799), établit bien la différence entre chaleur et température, et peut être considéré comme le fondateur de la calorimétrie. Dans cette spécialité s'illustrèrent les français Pierre Simon de Laplace (1749-1827), Pierre Dulong (1785-1838) et Alexis Petit (1791-1820), Nicolas Clément-Desormes (1778-1841) et Victor Regnault (1810-1878).

Après les travaux de l'écossais James Watt (1736-1819) sur la machine à vapeur, les études des physiciens sur les gaz : Boyle, en Angleterre, Edme Mariotte (1620-1684) puis Jacques Charles (1746-1823) et Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850) en France, après les expériences de l'américain Benjamin Thomson (1753-1814), la Thermodynamique pouvait entrer en scène. C'est le français Sadi Carnot (1796-1832) qui ouvrit le rideau, en 1824, avec son célèbre mémoire qui jetait les bases du second principe de la Thermodynamique. Au cours du 19^{ème} siècle, tandis que s'amorçaient les études sur les divers systèmes frigorifiques, la Thermodynamique se construisit rapidement avec les travaux de James Prescott Joule (1818-1889) en Angleterre, Julius von Mayer (1814-1878), Herman von Helmholtz (1821-1894), Rudolph Clausius (1822-1888) en Allemagne, Ludwig Boltzmann (1844-1906) en Autriche et William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907) en Angleterre. D'autres physiciens prestigieux contribuèrent à l'extension de la Thermodynamique au cours du 20^{ème} siècle.

3- L'apparition des divers systèmes frigorifiques

Nous distinguerons deux grandes classes de systèmes frigorifiques : ceux qui consomment, pour fonctionner, de l'énergie mécanique ou son équivalent, les *systèmes mécano-frigorifiques*, et ceux qui consomment essentiellement de l'énergie thermique, les *systèmes thermo-frigorifiques*.

3-1- Systèmes mécano-frigorifiques

Parmi eux, deux familles se détachent :

- les systèmes à compression de vapeurs liquéfiables,
- les systèmes utilisant des cycles à gaz

Systèmes à compression de vapeur

Le fluide actif du cycle frigorifique, le *frigorigène*, se vaporise dans un *évaporateur* en produisant le froid utile. La vapeur produite est aspirée et comprimée par un *compresseur mécanique*. Elle est refoulée dans un *condenseur* où elle se liquéfie. Le liquide formé retourne vers l'évaporateur en traversant un *régleur* (ou *détendeur*). Ce système est, de très loin, le plus répandu.

Une première description du cycle a été donnée en 1805 par l'américain Oliver Evans (1755-1819). Mais c'est à l'américain Jacob Perkins (1766-1849), qui travaillait en Angleterre que nous devons le premier brevet et un premier modèle fonctionnant à l'éther éthylique (1835). Les premières machines à compression qui eurent un succès industriel sont le fait d'un écossais émigré en Australie, James Harrison (1816-1893) (brevets en 1855-56-57). Les machines étaient fabriquées en Angleterre, elles pouvaient produire de la glace ou refroidir des saumures, *liquides frigoporteurs*. Le frigorigène était toujours l'éther éthylique.

De nouveaux frigorigènes firent ensuite, successivement, leur apparition :

- l'*éther diméthylique* utilisé par le français Charles Tellier (1828-1913).
- le *dioxyde de carbone* CO_2 utilisé par l'américain Thaddeus Lowe (1832-1913). Après une éclipse, il réapparaît actuellement.
- l'*ammoniac* NH_3 , d'abord expérimenté par Tellier (en 1862), il entra vraiment dans la production du froid avec l'américain David Boyle (1837-1891) et surtout l'allemand Carl von Linde (1842-1934). Il est toujours utilisé.
- le *dioxyde de soufre* SO_2 par le suisse Raoul Pierre Pictet (1846-1929). Il disparut au seuil de la seconde guerre mondiale.

- le *chlorure de méthyle (chlorométhane) CH₃Cl*, utilisé pour la première fois par le français C. Vincent en 1878. Il eut, lui aussi une assez longue carrière commerciale puisqu'il ne disparut que dans les années 1960.
- les *hydrocarbures fluorés* ; Recherchant des frigorigènes de sécurité (non toxiques et non inflammables) et s'inspirant des travaux de Swarts, (en 1893-1907) à Gand, une équipe américaine de Frigidaire Corporation, dirigée par Thomas Midgley mis au point en 1930 la production des premiers frigorigènes fluorés. Apparurent successivement le premier CFC, le R12 (CF₂Cl₂) en 1931, puis le premier HCFC, le R22 (CHF₂Cl), en 1934 et, en 1961, le premier mélange azéotropique R502 (R22/R115).

Depuis la publication, en 1974, d'un article des Prix Nobel américains F.S. Rowland et M.J. Molina, montrant l'action pernicieuse du chlore sur l'ozone stratosphérique, les frigorigènes chlorés, CFC et HCFC sont soumis, par le Protocole de Montréal (1987) et ses amendements à des processus d'éviction. Actuellement sont proposés des frigorigènes fluorés mais non chlorés, des HFC purs comme le R134a ou des mélanges de HFC (R410A, R407C, R404A, etc.) fluides qui ont une action plus ou moins forte sur l'effet de serre. On propose aussi l'utilisation (ou le retour) des frigorigènes « naturels », plus contraignants mais avec une action très faible ou nulle sur l'effet de serre comme l'ammoniac, les hydrocarbures, l'eau, le CO₂.

Au fil du temps les composants des systèmes à compression ont, eux aussi, fortement évolués. Ainsi les compresseurs à pistons lourds, lents et encombrants de la fin du 19^{ème} siècle ont fait place 100 ans après à des machines rapides et légères. De nouveaux types de compresseurs sont successivement apparus : compresseur à vis bi-rotor (A. Lysholm en Suède - 1934) compresseur à vis mono-rotor (B. Zimmern en France - 1967), compresseur « spiro-orbital » (scroll) dans les années 70 (brevet du français Léon Creux - 1905), compresseurs centrifuges (travaux fondamentaux du français Auguste Rateau - 1890 puis de l'américain Willis Carrier - 1911).

On chercha vite, pour les petites machines, à limiter les fuites de frigorigène par l'usage de groupes frigorifiques hermétiques. Le premier du genre fut la curieuse machine de l'abbé Audiffren (1905). Les groupes hermétiques sont maintenant largement utilisés.

Parallèlement, les échangeurs thermiques (condenseurs et évaporateurs) s'améliorèrent et s'allégèrent.

Systèmes utilisant des cycles à gaz

Ici le fluide actif ne change pas d'état au cours du cycle frigorifique mais reste gazeux. Comprimé, le gaz s'échauffe, on le refroidit alors, sous pression, jusqu'à la température ambiante puis on le détend ce qui entraîne un abaissement de sa température.

La première « machine à air », à cycle ouvert, est due à l'américain John Gorrie (1803-1855) pour refroidir de la saumure à -7°C (brevets 1850-51). S'inspirant du moteur à air chaud du pasteur Robert Stirling (1837) l'écossais Alexander Kirk (1830-1892) réalisa une machine à cycle fermé qui produisit régulièrement, pendant une dizaine d'année, à partir de 1864, une température de -13 °C. Dans cette technique, on peut citer les contributions de l'allemand Franz Windhausen (1829-1904), de l'américain Leicester Allen (1832-1912) et du français Paul Giffard (1837-1897).

Le développement de ces systèmes fut moindre que celui des machines à compression de vapeur car leur efficacité est plus réduite dans le domaine courant de la réfrigération, de la congélation et de la climatisation. Elles sont, par contre, à l'origine de la plupart des cycles cryogéniques pour la liquéfaction des gaz et la production des basses températures.

Systèmes thermoélectriques

Le français Jean Charles Peltier (1785-1845) découvrit, en 1834, que le passage d'un courant continu dans une jonction de deux métaux différents provoque, selon le sens du courant un dégagement ou une absorption de chaleur à cette jonction. Longtemps simple curiosité scientifique, la thermoélectricité se développa au fil des années 1940 à 60 avec les connaissances sur les semi-conducteurs. Les espoirs qu'elle a fait naître furent cependant assez vite déçus et les utilisations actuelles sont marginales.

3-2- Systèmes thermo-frigorifiques

On distingue, parmi ces systèmes frigorifiques consommant de l'énergie thermique :

- les systèmes à absorption,
- les systèmes à adsorption et thermo-chimiques
- les systèmes à éjection

Systèmes frigorifiques continus à absorption

Bien que leur importance soit beaucoup plus réduite que celle des systèmes à compression, ce sont, actuellement, les seuls systèmes thermo-frigorifiques qui connaissent un certain développement. Ici la circulation du frigorigène n'est pas due à un compresseur mécanique mais à la circulation, par pompe, d'un liquide absorbant dont la teneur, en frigorigène absorbé, dépend de la température et de la pression. Le travail mécanique nécessaire est très réduit, le système, en contrepartie, consomme de la chaleur.

Le père de ces systèmes est le français Ferdinand Carré (1824-1900) qui breveta en 1859 la première machine à absorption continue utilisant le couple frigorigène : ammoniac – absorbant : eau. Ces machines furent presque immédiatement opérationnelles. Leur étude thermodynamique ne débuta qu'en 1913 avec l'allemand Edmund Altenkirch et se poursuivit durant la première moitié du 20^{ème} siècle. Il faut aussi citer les travaux de l'italien Guido Maïuri sur ces machines et ceux des suédois von Platen et Munters sur le cycle à absorption-diffusion pour les réfrigérateurs à absorption sans pompe (1920). Les années 40 ont vu apparaître, aux Etats-Unis, la machine à absorption eau-bromure de lithium, où l'eau est le frigorigène ; cette adaptation du cycle de Carré est depuis largement utilisée en climatisation.

Les systèmes à absorption discontinus, bien qu'apparus très tôt, (appareils à refroidir les carafes d'eau d'Edmond Carré² - 1866) ne se développèrent guère.

Systèmes frigorifiques à adsorption et thermo-chimiques

Ils apparurent plus tardivement, essentiellement dans la première moitié du 20^{ème} siècle. Leur fonctionnement, basé sur les effets thermiques qui accompagnent la sorption ou la désorption physique d'un gaz sur un solide (systèmes à adsorption) ou bien la formation, ou la décomposition, de composés chimiques avec un gaz frigorigène (systèmes thermo-chimiques) est naturellement discontinu. Encore peu utilisés, ils font l'objet, actuellement, de nombreuses recherches.

Système frigorifique à éjection

Bien qu'il puisse être utilisé avec d'autres frigorigènes, c'est avec l'eau que le système frigorifique à éjection entra en scène en 1908. La paternité en revient au français Maurice Leblanc (1857-1923). L'abaissement de température de l'eau, qui se vaporise sous basse pression est obtenue en aspirant la vapeur formée au moyen d'un éjecteur, ou trompe, alimenté par un jet de vapeur vive provenant d'une chaudière. L'éjecteur est une tuyère d'abord convergente – l'accroissement de la vitesse du jet diminue la pression ce qui permet l'aspiration voulue – puis lentement divergente – l'augmentation progressive de la section offerte à la vapeur ralentit sa vitesse et la pression remonte. Ce système qui a des créneaux d'utilisation bien spécifique est peu répandu.

4- Quelques dates concernant la liquéfaction des gaz et la production du froid aux basses et très températures – Cryogénie

Conventionnellement le domaine cryogénique correspond aux températures inférieures à 120 K (-153,15 °C)³.

² Le frère de Ferdinand Carré

³ Rappelons que 0 °C = 273,15 K (K pour kelvin), température exprimée dans l'échelle absolue Kelvin.

- 1877 : Louis Cailletet, à Paris, puis Raoul Pictet, à Genève, liquéfient (de façon transitoire) l'oxygène.
- 1883 : K. Olszewski et S. Wroblewski liquéfient, à Cracovie, (de façon permanente) l'oxygène (température d'ébullition $T_{eb} = 90$ K) et l'azote ($T_{eb} = 77$ K).
- 1895 : Carl. von Linde, en Allemagne, obtient, par détente Joule-Thomson (dans un robinet, sans fourniture de travail à l'extérieur), 3 litres/h d'air liquide.
- 1898 : Liquéfaction de l'hydrogène ($T_{eb} = 20,4$ K), à Londres, par James Dewar.
- 1902 : Georges Claude liquéfie de l'air en utilisant la détente dans une machine, avec fourniture de travail à l'extérieur.
- 1908 : Liquéfaction de l'hélium ($T_{eb} = 4,2$ K), à Leyde, par Heike Kamerlingh Onnes.
- 1911 : Découverte fortuite de la supraconductivité du mercure par Kamerlingh Onnes à Leyde ; il n'utilisa le terme de « supraconductivité » qu'en mars 1913.
- 1926 : Description du procédé de refroidissement par désaimantation adiabatique indépendamment par W.F. Giauque (Canada) et P. Debye (Pays-Bas).
- 1931 : Mise en évidence, à Leyde, du point λ (2,17 K) par W.H. Keesom et K. Clusius : – Hélium I (normal) – Hélium II (superfluide).
- 1933 : Premières expériences de désaimantation adiabatique par Giauque à Berkeley (Etats-Unis) (0,53 à 0,25 K).
- 1931 – 1938 : Série de travaux sur la superfluidité de l'Hélium : Burton, A.D. Misener, H. Jones, P. Kapitza, J. G. Daunt, K. Mendelssohn, F. London, L. Tisza.
- 1956 : Désaimantation adiabatique nucléaire (13 μ K) : Kurti, Robinson, Simon et Spohr (Oxford).
- 1965 : Refroidisseur à dilution de ^3He dans ^4He (2 mK) : B.S. Neganov (URSS) ; De Bruyn Ouboter et K.W. Taconis (Pays-Bas).
- 1983 : Refroidissement des électrons du cuivre (20 nK) par O. Lounasmaa (Finlande)
- 1986 : O. Lounasmaa : vers 1 nK l'argent devient un aimant.
- 1986 : J.G. Bednorz et K.A. Muller découverte de la supraconductivité « haute température » (35 K).