



La production du froid

UNE TECHNIQUE RÉCENTE



Si le feu et la production de chaleur ont été des découvertes précoces dans l'histoire de l'humanité, les techniques de production du froid sont quant à elles très récentes. Historiquement, on peut dissocier d'une part, l'exploitation du froid naturel (sous forme de glace ou de neige, directement prélevées dans le milieu naturel) et d'autre part, la production de froid artificiel (indépendante des ressources naturelles existantes ou des conditions climatiques).

HISTORIQUE

L'EXPLOITATION DU FROID NATUREL

Dans le premier cas, les hommes ont été confrontés à la rareté des sources naturelles de froid, à leur difficulté de transport et de conservation et à leur alternance saisonnière. Les premières applications concernaient le stockage et permettaient, en partie, de s'affranchir de ces contraintes : des fosses renfermant de la glace recouverte de paille pour conserver de la viande, un mélange de glace et de sels pour abaisser la température, l'utilisation d'amphores poreuses favorisant l'évaporation et le rafraîchissement du contenu, l'exploitation et le stockage de la glace dans des compartiments isothermes...

LA PRODUCTION DU FROID

Ce n'est qu'au milieu du XIX^e siècle que les premiers systèmes de production ont été mis au point et ont permis de « fabriquer » du froid artificiel. La naissance de la thermodynamique, l'avènement de l'électricité et les besoins de conservation des aliments ont joué un rôle prépondérant dans ce développement, notamment à partir du milieu du XX^e siècle.

QUELQUES NOTIONS

FROID, CHALEUR ET TEMPÉRATURE

Le froid correspond à des températures « basses », ce qui implique de limiter les apports de chaleur.

La chaleur est une forme d'énergie relative au mouvement des

molécules. Elle est transférée d'un corps chaud vers un corps froid. La température est l'agitation des molécules et des atomes qui composent ce corps. Elle s'exprime généralement en degré Celsius (°C). La température de -273 °C est le point qui détermine le zéro absolu et pour lequel l'agitation moléculaire est nulle. La thermodynamique utilise cette référence dans son échelle thermométrique, exprimée en Kelvin.

LES MODES DE TRANSMISSION DE LA CHALEUR

L'échange de chaleur peut s'accomplir selon trois modes de transmission.

La conduction

Le transfert de chaleur s'effectue, sans mouvement, entre deux corps en contact qui présentent des températures différentes. Il peut également s'effectuer au sein d'un même corps si ses parties affichent des températures distinctes. Certains corps ont de bonnes propriétés conductrices (comme le **cuivre** ou



l'aluminium) et d'autres sont de mauvais conducteurs (le bois, le polystyrène...).

La convection

Propre aux liquides et aux gaz (les fluides), le transfert d'énergie par convection est lié au mouvement des molécules par différence de densité. Les parties chaudes sont plus légères et vont donc se déplacer et véhiculer la chaleur. Cette convection peut être naturelle (le gradient thermique provoque le mouvement) ou forcée (la circulation du fluide est provoquée artificiellement, ce qui génère un transfert de chaleur).

Le rayonnement

Le rayonnement thermique est l'émission d'ondes électromagnétiques par un corps chauffé. Lorsque ce rayonnement atteint un corps plus froid, il est en partie absorbé sous forme de chaleur.

LES MODES DE PRODUCTION DU FROID

Quatre principaux procédés sont utilisés pour produire du froid.

LA DÉTENTE D'UN GAZ COMPRIMÉ

La température d'un gaz augmente lorsqu'il est comprimé. Inversement, la détente d'un gaz provoque un abaissement de sa température. C'est ce principe qui intervient lors de l'utilisation d'une **bombe aérosol** : la détente du gaz



engendre un refroidissement de la bouteille.

LE REFOUILLISSEMENT THERMOÉLECTRIQUE (EFFET PELTSIER)

Ce phénomène repose sur l'application d'un courant électrique au point de contact de deux métaux différents, ce qui génère une libération ou une absorption de chaleur au niveau des jonctions. Cette technique de production du froid possède un rendement assez faible. En revanche, elle est particulièrement adaptée aux systèmes d'appoint ou transportables : pas de pièce mobile, ni de produit chimique sensible dans le dispositif.

LA DISSOLUTION DE SELS

La dissolution de certains sels dans certains liquides nécessite l'absorption de chaleur et provoque donc un abaissement de la température de la solution.

LA VAPORISATION D'UN LIQUIDE

La production du froid est réalisée par absorption de chaleur lors de l'évaporation d'un fluide. C'est la méthode de production du froid la plus courante. On distingue deux types de systèmes : les machines à compression mécanique et les machines à absorption.

MACHINE FRIGORIFIQUE À ÉVAPORATION

Une machine frigorifique permet de prélever de la chaleur d'un système pour la restituer à un autre. Cependant, le premier principe de la thermodynamique énonce que le transfert de chaleur s'effectue toujours du point chaud au point froid. Le second principe de la thermodynamique montre quant à lui, qu'à l'inverse, pour extraire de la chaleur d'une source froide et la rejeter vers une source chaude, il est nécessaire de fournir un travail. C'est ainsi que fonctionnent la plupart des machines frigorifiques. Leur source froide et leur source chaude peuvent être un liquide, un gaz ou un solide. Généralement, on utilise un fluide frigorigène qui assure la production de froid en continu grâce à l'application de changements de phases : la vaporisation du fluide à la source froide (ce qui génère un refroidissement) et la condensation des vapeurs à la source chaude (entraînant une élévation de la température).

La machine peut être à cycle ouvert lorsque la vapeur est rejetée vers l'extérieur ou à cycle fermé quand le fluide frigorigène passe par deux échangeurs (un évaporateur où la chaleur est prélevée et un condenseur dans lequel la chaleur est rejetée).

LES FLUIDES FRIGORIGÈNES

CARACTÉRISTIQUES

Les fluides frigorigènes réalisent le transfert de chaleur par changement d'état physique (évaporation et condensation). Leur température d'évaporation à pression atmosphérique est inférieure à la température du milieu à refroidir et les fluides se présentent donc, dans

ces conditions, sous forme liquide. Par exemple, le fréon (aujourd'hui interdit de fabrication) possède une température d'évaporation de -29,8 °C.

CLASSIFICATION

On distingue différentes catégories de fluides selon leurs propriétés. Leur identification est codifiée à l'aide de la lettre R (Réfrigérant) et d'une suite numérique définissant leur type, leur composition chimique et leurs propriétés physiques.

Les fluides inorganiques purs

Les plus courants sont l'eau, l'ammoniac et de le dioxyde de carbone. L'eau (R718) ne peut être utilisée que pour la production de froid positif (température supérieure à 0 °C). L'ammoniac (R717) est utilisé depuis plus d'un siècle (notamment dans l'industrie agro-alimentaire) mais présente des risques d'inflammabilité et de toxicité. Enfin, le dioxyde de carbone (R744) est également toxique et nécessite l'application de très fortes pressions, ce qui limite son emploi.

Les hydrocarbures

Ces composés sont très inflammables et leur usage est souvent limité à de petites unités de production. On trouve par exemple le propane (R290), le butane (R600) ou l'isobutane (R600a).

Les hydrocarbures halogénés

Utilisés en corps purs ou en mélange de corps purs, ils sont classés en trois catégories :

- les CFC ou chlorofluorocarbures, tel que le fréon (R12), sont aujourd'hui interdits ;
- les HCFC ou hydrochlorofluorocarbures ne peuvent plus être utilisés dans les nouvelles installations (ces deux composés - CFC et HCFC - contiennent du chlore, molécule provoquant la destruction de la couche d'ozone) ;

Une histoire glaciale

30 %
Le froid permet de limiter les pertes sur les denrées périssables d'environ 30 %.

99 %



En France, 99 % des foyers possèdent un réfrigérateur ou un congélateur.

20 %

Les réfrigérateurs et les congélateurs représentent 20 % de la consommation électrique des ménages français.

15 %

La production du froid représente 15 % de la consommation d'électricité des pays industrialisés.

7 %

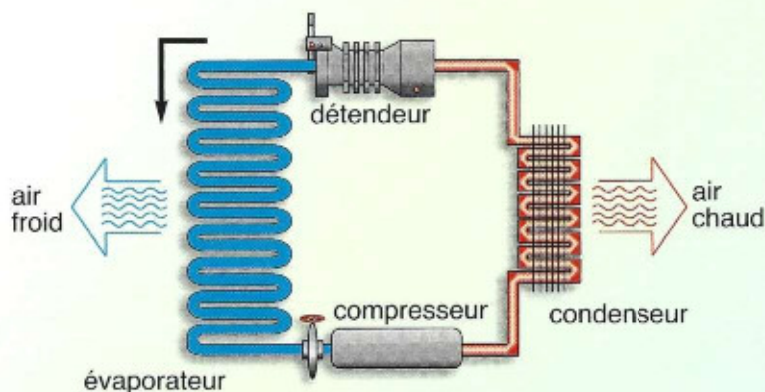
En France, le froid industriel représente 7 % de la consommation nationale d'électricité.

Le secteur agro-alimentaire



57 %
des besoins industriels

Principe des machines frigorifiques



• Les HFC ou hydrofluorocarbures, non chlorés, sont actuellement en usage. Ils sont également dérivés du méthane et de l'éthane, mais de nouveaux fluides, cette fois dérivés du propane ou de l'isobutane, sont également produits. Le choix d'un fluide dépend de ses caractéristiques thermodynamiques (autrement dit, ses capacités à produire un type de froid donné), de son prix, de son interaction (ou plutôt de sa neutralité) avec les éléments techniques environnants et de critères environnementaux et de sécurité (inflammabilité, toxicité, etc.).

MACHINE FRIGORIFIQUE À COMPRESSION MÉCANIQUE

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Une machine frigorifique à compression est composée de cinq éléments principaux.

- Le compartiment isolé dans lequel est maintenue une basse température.
- L'évaporateur qui est un échangeur de chaleur assurant l'évaporation d'un fluide par absorption de chaleur. Il existe, suivant la source à refroidir, des évaporateurs à air (convection naturelle ou forcée) ou à eau.
- Le compresseur qui permet d'établir de hautes pressions. On différencie les compresseurs à vapeur – dits volumétriques (compression par réduction du volume) qui sont les plus courants ou turbocompresseurs (compression par la force centrifuge) destinés à des installations de fortes puissances – et les compresseurs à piston (compression par transfert d'énergie mécanique).
- Le condenseur est également un échangeur de chaleur qui, cette fois, condense les vapeurs du fluide frigorigène en libérant la chaleur contenue dans ces gaz. On distingue, suivant le fluide de refroidissement, les condenseurs à air (à convection naturelle ou forcée) et les condenseurs à eau.
- Le détendeur qui régule la pression du fluide et la quantité admise dans l'évaporateur.

À ce dispositif s'ajoute un certain nombre d'organes annexes, tels que le réservoir de fluide, le séparateur d'huile, les pompes à fluide ou à eau, les ventilateurs, les déshydratateurs...

CYCLE DE RÉFRIGÉRATION

La chaleur présente dans le compartiment isolé provoque l'évaporation du fluide frigorigène au niveau de l'évaporateur. Cette chaleur est absorbée par le fluide, ce qui génère un refroidissement du compartiment isolé. Les vapeurs formées sont alors dirigées vers la bouteille « anti-coups » qui s'assure que la totalité du fluide soit sous forme gazeuse. Le gaz est ensuite aspiré par le compresseur, comprimé et dirigé vers le condenseur. La vapeur sous haute pression et à température élevée cède sa chaleur à un fluide de refroidissement (l'eau ou l'air) et se condense. Le fluide frigorigène retourne au réservoir et peut à nouveau alimenter le détendeur. Celui-ci réduit la pression du fluide et régule la quantité distribuée à l'évaporateur. Le cycle peut alors reprendre.

LA DISTRIBUTION DU FROID

La distribution du froid peut être directe ou indirecte.

Dans le premier cas, l'évaporateur se trouve dans le compartiment à refroidir (la chambre froide). Ce système est simple à mettre en œuvre et présente les meilleures performances énergétiques. Mais la quantité de fluide nécessaire peut être importante et l'utilisation de certains fluides frigorigènes est délicate et réglementée (par exemple, l'ammoniac).

Concernant la distribution indirecte, le fluide frigorigène refroidit un fluide appelé frigoporteur. C'est ce dernier qui assure le refroidissement du compartiment isolé. L'installation est évidemment plus complexe et d'un rendement énergétique plus faible. Par contre, plusieurs installations peuvent être alimentées par un même système, tout en confinant les fluides frigorigènes considérés dangereux.

MACHINE FRIGORIFIQUE À ABSORPTION

La machine frigorifique à absorption reprend les mêmes principes de fonctionnement qu'une machine à compression, à savoir l'évaporation et la condensation d'un fluide. Cependant, elle repose également sur la solubilité d'un gaz dans un liquide. Ainsi, le fluide utilisé est en fait un mélange binaire composé d'un absorbant et d'un fluide frigorigène, plus volatile. On utilise principalement les couples suivants :

- eau et bromure de lithium (l'eau constitue le fluide frigorigène) ;
- ammoniac et eau (l'ammoniac est le fluide frigorigène).

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

La machine frigorifique à absorption dispose de quatre principaux éléments.

- L'évaporateur : son fonctionnement est le même que pour la machine frigorifique à compression. Le fluide frigorigène absorbe la chaleur du compartiment isolé, se vaporise et est dirigé vers l'absorbant.
- L'absorbant : la vapeur est dissoute dans la solution absorbante (réaction exothermique) et le mélange absorbant/fluide frigorigène est créé.
- Le désorbant : son rôle est de séparer le fluide frigorigène du mélange en le vaporisant. On obtient ainsi à la sortie du désorbant des vapeurs de fluide frigorigène et une solution absorbante.
- Le condenseur : le gaz est liquéfié en cédant sa chaleur à un fluide caloporteur.

COMPARAISON AVEC LA MACHINE À COMPRESSION

Les deux systèmes (mécanique et à absorption) fonctionnent sur le principe de l'évaporation et de la condensation d'un fluide. Leur différence réside dans la façon de restituer au fluide un état liquide. Pour la machine à compression, c'est l'absorption qui joue ce rôle. Les machines à absorption ont un rendement moins important. Néanmoins, sans système mécanique, ces installations ont une durée de vie plus longue et leur maintenance est réduite. D'autre part, les fluides frigorigènes utilisés n'ont pas d'impact sur l'environnement.

LES APPLICATIONS

Trois niveaux de froid sont différenciés selon le type d'application : le froid positif, le froid négatif et le froid ultra négatif.

LE FROID POSITIF

Il se rapporte aux températures supérieures à 0 °C. Ses principales applications concernent la climatisation, la réfrigération et le refroidissement.

- La **climatisation** est un système de conditionnement de l'air régulant la



température, l'hygrométrie et le taux de particules. Elle permet de maintenir des conditions de confort ou d'exigences de fabrication industrielles (dans l'électronique ou la pharmacologie par exemple).

- La réfrigération est une technique de conservation limitant la dégradation des denrées alimentaires en maintenant une température positive inférieure à 10 °C. Les durées de conservation varient selon les produits, mais se comptent généralement en heures ou en jours.
- Le refroidissement de machines motrices, tournantes ou électroniques.

LE FROID NÉGATIF

Pour des températures comprises entre 0 et -30 °C, on parle de froid négatif. La congélation (dite lente), qui est une technique de conservation des produits biologiques, exploite ce gradient de températures. Le processus qui entre en jeu est la cristallisation (ou solidification) de l'eau contenue dans les produits. En maintenant cette basse température, les réactions biochimiques et le développement bactérien sont stoppés, assurant ainsi la préservation des produits sur des durées variant de 3 à 20 mois.

LE FROID ULTRA NÉGATIF

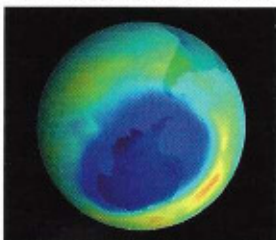
Le froid ultra négatif concerne les températures inférieures à -30 °C. Il est employé pour la **surgélation** ou des applications spécifiques (cryogénie, lyophilisation...). La surgélation est une congélation très rapide qui demande, dans sa mise en œuvre, des températures variant de -40 °C à -196 °C. La vitesse du procédé conduit à une cristallisation très fine de l'eau. Les produits sont ensuite conservés à des températures égales ou inférieures à -18 °C. Les avantages de la surgélation par rapport à la congélation sont de limiter l'altération des denrées (les fins cristaux de glace n'endommagent pas la



structure cellulaire), une durée de conservation doublée (entre 9 et 30 mois selon les produits) et une exsudation à la décongélation beaucoup plus faible. La lyophilisation est une technique de déshydratation qui requiert de très basses températures (-50 à -60 °C). Une fois le produit congelé et placé sous vide, la dessiccation se fait par sublimation : transformation directe de l'état solide (cristaux de glace) à l'état gazeux. La cryogénie se rapporte aux températures extrêmement basses (inférieures à -150 °C). Les domaines d'applications sont variés : le médical, l'alimentaire, l'industrie...

ENVIRONNEMENT

La production du froid a un impact direct et indirect sur l'environnement. Un impact direct tout d'abord, car certains fluides frigorigènes utilisés ont



une action destructrice sur la **couche d'ozone**. C'est le cas des CFC et des HCFC.

D'autre part, les hydrocarbures halogénés sont également de puissants gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement climatique. Leur impact, à concentration égale, serait bien supérieur à celui du dioxyde de carbone (8 500 fois supérieur pour les CFC, 1 700 fois pour les HCFC et 1 300 fois pour les HFC). Un impact indirect enfin, car les installations de production du froid sont énergivores. L'énergie primaire nécessaire à leur fonctionnement est à l'origine d'un dégagement important de dioxyde de carbone, contribuant encore à l'accroissement de l'effet de serre.

LES SYSTÈMES DE PRODUCTION DE DEMAIN

Les thèmes actuels de recherche sur la production du froid s'orientent principalement vers des systèmes économes en énergie et « neutres » vis-à-vis de l'environnement. Visant à anticiper la demande croissante en froid, les objectifs sont de limiter l'impact écologique et de permettre aux pays émergents d'avoir accès aux technologies du froid. Une autre voie de développement est celle de l'optimisation des procédés existants, avec toujours les mêmes buts. C'est par exemple le cas de la trigénération, qui permet d'exploiter la chaleur produite par cogénération (production simultanée d'électricité et d'énergie thermique) pour produire du froid.

LA RÉFRIGÉRATION À ADSORPTION

Ce système fonctionne sur le même principe que les machines à absorption. Cependant, au lieu d'utiliser une solution liquide (absorbant), c'est un solide (gel de silice, charbon actif, ou

zéolithe) qui adsorbe la vapeur du fluide frigorigène (eau, ammoniac ou méthanol). Cette technique est déjà appliquée : le rendement est faible, l'encombrement de la machine important, mais la maintenance est réduite et la consommation énergétique très faible.

LA RÉFRIGÉRATION PASSIVE PAR RAYONNEMENT

Tout corps noir émet une énergie (rayonnement thermique) se traduisant par une perte de chaleur et une baisse de sa température. C'est sur ce principe que repose la réfrigération passive par rayonnement. Passive, car elle ne met en jeu aucune pièce mobile. Pour que le refroidissement soit effectif, il faut que le corps noir soit totalement isolé et qu'il ne reçoive aucune énergie extérieure. C'est un juste équilibre entre le fait de maximiser le rayonnement sortant et de minimiser les énergies entrantes. Les recherches portent ainsi sur les propriétés du corps rayonnant et sur l'architecture du compartiment réfrigéré.

LES MINI-CANAUX

L'utilisation de fluides intéressants en terme environnemental, tels que l'ammoniac ou les hydrocarbures, est limitée par les risques d'inflammabilité et de toxicité. Des études sont donc réalisées pour réduire la charge de fluide nécessaire dans les installations classiques. La « miniaturisation » des composants permet également de réduire la consommation électrique. Les dernières technologies développées diminuent ainsi la quantité de fluide requis par dix.

LA RÉFRIGÉRATION MAGNÉTIQUE

Elle repose sur l'effet magnéto-calorique d'un corps, générant un échauffement ou un refroidissement sous l'action ou non d'un champ magnétique. Le rendement est nettement supérieur à celui de l'effet Peltier. Par rapport aux systèmes de production classique, l'avantage de la réfrigération magnétique est une très faible perte énergétique et donc une efficacité accrue. De plus, les matériaux en jeu sont solides, et non plus volatils, d'où un faible impact environnemental. Les recherches portent actuellement sur la conception de ces matériaux.

LA RÉFRIGÉRATION SOLAIRE

Comme l'énonce le second principe de la thermodynamique, pour transférer la chaleur d'une source froide à une source chaude, il est nécessaire de fournir de l'énergie. Des **capteurs solaires** peuvent produire une source chaude et délivrer cette énergie sous



forme de chaleur. Couplés à une machine à absorption ou adsorption, cette chaleur permet l'évaporation du fluide frigorigène et la production du froid. Les performances sont pour l'instant limitées, mais le procédé est énergétiquement autonome.