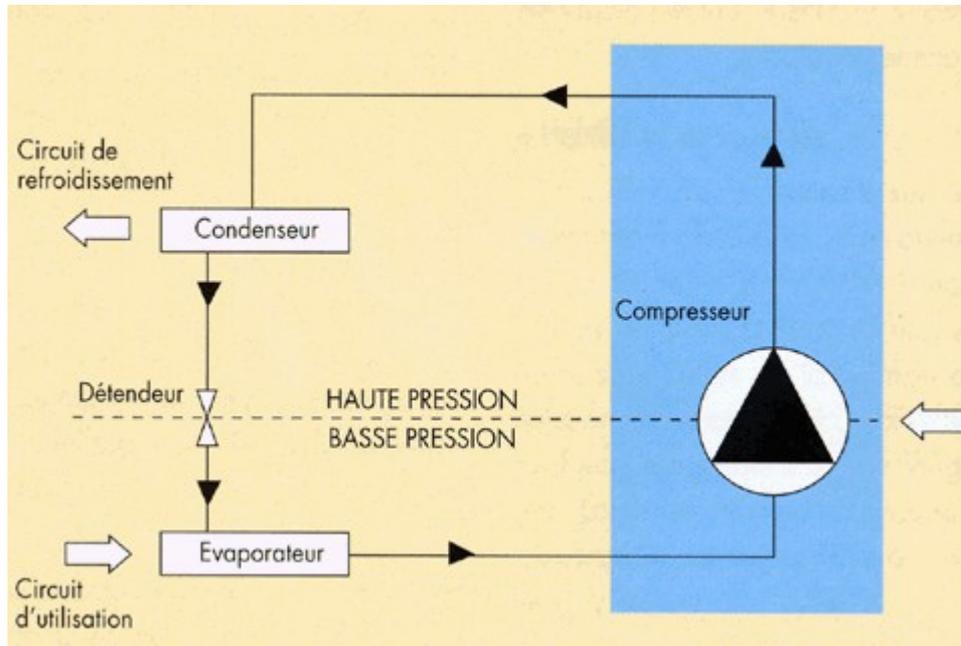


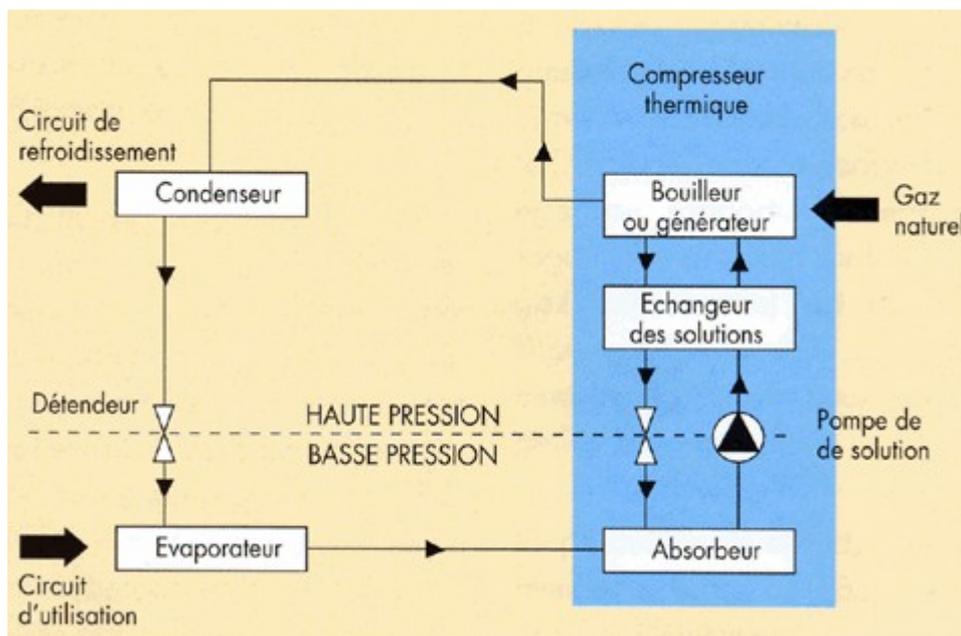
Principe de la réfrigération par absorption.

A la différence d'un procédé de production de froid par compression, le procédé par absorption s'avère plus économique d'un point de vue consommation électrique tout en assurant une production efficace de froid.

Compression classique :



Procédé par absorption :



2.1 Principe général

Le principe de base de la production de froid de confort consiste à prélever de la chaleur sur un milieu à refroidir (air ou eau), appelé source chaude et à la transférer vers un milieu extérieur (eau ou air extérieur) qui, lui, est réchauffé (source froide).

Ce transfert d'énergie est réalisé par l'intermédiaire d'un fluide frigorigène soumis en continu à un cycle thermodynamique de succession de changements d'états vapeur/liquide.

Le cycle comporte les quatre phases suivantes :

- compression : la température et la pression du fluide sous forme gazeuse s'élèvent ;
- condensation : en passant dans un échangeur situé au contact du milieu extérieur (plus froid), le fluide passe à l'état liquide et rejette des calories vers l'extérieur ;
- détente : le fluide sous forme liquide voit sa pression abaissée de même que sa température ;
- évaporation : en passant dans un échangeur situé au contact du milieu à refroidir (plus chaud), le fluide capte des calories et se vaporise.

2.2 Système à absorption

La mise en circulation du fluide frigorigène est assurée lors de la phase de compression. En fonction du moyen utilisé pour augmenter la pression et la température de ce fluide, on peut distinguer deux types de systèmes : les systèmes à compression mécanique et ceux à absorption. On remarque qu'une partie du circuit (condenseur, détendeur, évaporateur) est strictement identique pour les deux systèmes (voir figures ci-dessous).

Avec les systèmes à compression mécanique, la compression est réalisée par un compresseur mécanique mû par un moteur électrique.

Avec les systèmes à absorption, le passage de l'évaporateur vers le condenseur est réalisé par l'association du fluide frigorigène à un autre fluide qualifié d'absorbant. Ce mélange va permettre le passage du fluide frigorigène d'un niveau de basse pression/basse température à un niveau de haute pression/haute température sous l'effet d'un apport de chaleur. Les propriétés de l'absorbant sont (de par son affinité très grande avec le frigorigène) d'absorber des vapeurs de frigorigène à basse pression et de s'en séparer par chauffage à haute pression.

Les autres composants du système sont dans le principe les mêmes qu'en compression.

2.3 Couples frigorigène/absorbant

Les couples de fluides frigorigène/ absorbant utilisés dans les machines à absorption actuelles sont de deux types : eau/bromure de lithium ($H_2O/LiBr$) en solution aqueuse et ammoniac/eau (NH_3/H_2O) dilué. Dans les machines $H_2O/LiBr$, l'eau peut être utilisée comme fluide frigorigène parce qu'elle est maintenue à très basse pression (absolue) d'à peine quelques kPa (1 kPa = 10 mbars absolus). L'eau est un excellent fluide frigorigène de par ses caractéristiques physiques. Ainsi pour une même puissance froid, il y a dix fois moins de fluide frigorigène en circulation dans une machine utilisant de l'eau comme fluide qu'une machine utilisant du R22.

Dans les machines NH_3/H_2O , dont la technique est moins répandue en France, le fluide frigorigène utilisé est l'ammoniac ce qui permet d'obtenir des températures basses en sortie d'échangeur.

C'est sur ce principe de l'absorption que fonctionnent les installations de climatisation au gaz naturel. De par sa simplicité, l'intérêt d'une telle machine est évident. Elle produit du froid et/ou du chaud et ce, sans complications techniques de mise en oeuvre tout en respectant notre environnement.

2.4 Les rendements

En production de froid, pour 1 kWh de gaz naturel, on produit 1 kWh de froid et presque 2 kWh de chaud (à une température comprise entre 37 et 39 °C). La chaleur récupérée dans le condenseur de la machine peut être utilisée pour chauffer l'eau de bassin d'une piscine, pour réchauffer l'eau chaude sanitaire, pour préchauffer de

l'air neuf...

En production de chaud, le rendement est identique à celui d'une chaudière gaz.

3.1 Avant-propos

Depuis plus de vingt ans, les machines commercialisées les plus performantes sont soit des machines eau/bromure de lithium, dites " à double effet ". Le double effet permet de faire passer le coefficient de performance (COP : rapport entre l'énergie frigorifique produite et le débit calorifique au brûleur) d'une moyenne de 0,6 à plus de 1 aux conditions nominales de fonctionnement (COP frigorifique mesuré sur le PCS du gaz naturel). Cette amélioration des rendements est liée à la mise en oeuvre d'un deuxième étage de régénération et d'un échangeur thermique supplémentaire. Le double effet a d'autre part autorisé le mode chauffage en alterné avec le mode froid ou en simultané. Enfin, signalons l'apparition de machines à cycle " triple effet ", expérimentées aux Etats-Unis sur plusieurs prototypes industriels, dont le COP atteint 1,2 à 1,3 aux conditions nominales de fonctionnement.

3.2 Machine à absorption eau/bromure de lithium

La machine double effet eau/ bromure de lithium autorise un fonctionnement en mode froid ou en mode chaud.

CYCLE MODE FROID

Dans le groupe au gaz dit générateur , la solution eau-bromure de lithium est portée à ébullition ; grâce à un apport de chaleur, assuré par un brûleur fonctionnant au gaz naturel, une source chaude via l'énergie solaire ou toute autre forme d'énergie renouvelable, le fluide frigorigène ou eau distillée est ainsi transformé en vapeur et envoyé vers le condenseur. Il reste donc dans le groupe gaz, une solution pauvre en fluide frigorigène et concentrée en bromure de lithium qui va rejoindre l'absorbeur.

Arrivant au condenseur sous forme de vapeur, le fluide frigorigène se condense au contact d'un échangeur ou refroidisseur alimenté par de l'eau refroidie par l'air extérieur et retourne vers l'évaporateur.

La pression régnant à l'intérieur de l'évaporateur (700 Pa) étant inférieure à celle du condenseur, une partie du fluide frigorigène admis va se vaporiser à une température de 5°C environ et refroidir l'eau du circuit d'utilisation circulant dans un faisceau de tubes à l'intérieur de l'évaporateur. Le fluide vaporisé est ensuite admis à l'absorbeur.

Le fluide frigorigène en phase vapeur s'écoule dans l'absorbeur contenant le bromure de lithium . Ce sel qui présente une grande affinité avec la vapeur d'eau (action hygroscopique) va emmagasiner, on dit absorber, le fluide frigorigène. La solution de bromure diluée est alors pompée vers le générateur et le cycle recommence.

CYCLE MODE CHAUD

En isolant simplement l'ensemble condenseur/refroidisseur, la même machine peut fournir de l'eau chaude sur le circuit qui fournissait de l'eau glacée auparavant. L'évaporateur devient condenseur dans ce mode de fonctionnement. Il condense la vapeur produite par le générateur sur le faisceau de tubes de l'échangeur en transférant la chaleur à l'eau circulant à l'intérieur. Le bromure de lithium est ensuite dilué dans le fluide frigorigène puis la solution diluée retourne au générateur terminant ainsi le cycle.

Température de l'eau glacée :

La température en sortie de l'évaporateur est comprise entre 7°C et 12°C, compte tenu de sa surface d'échange et de sa température d'évaporation. Cette solution ne peut donc être utilisée qu'en climatisation "confort" et non en "froid négatif" pour du process.

Température de l'eau chaude :

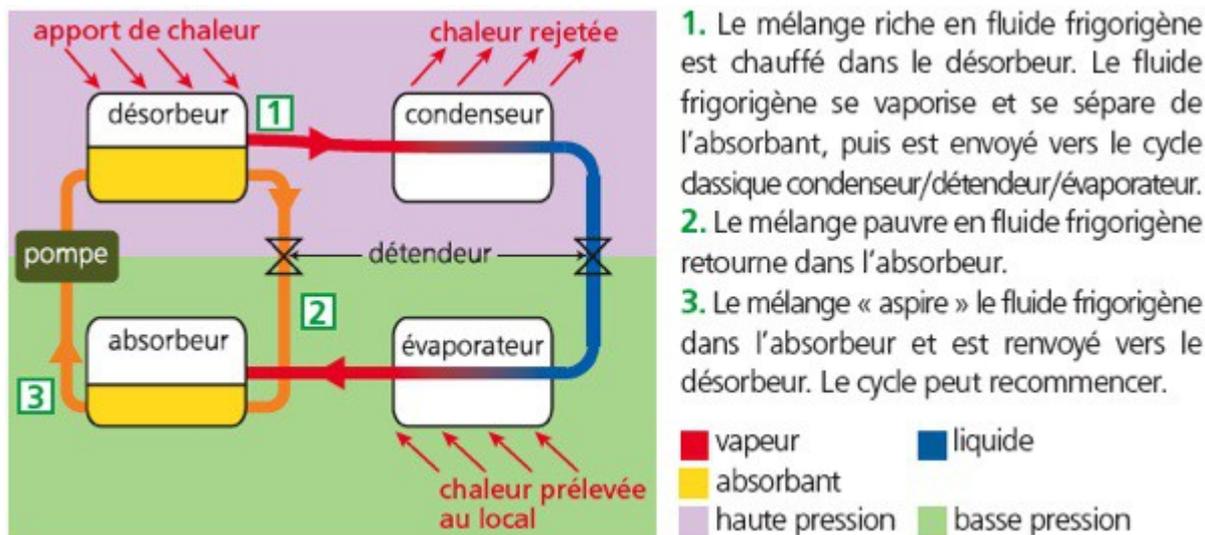
La température en sortie du condenseur est voisine de 55°C, compte tenu de sa surface d'échange et de sa température de condensation. Cette solution ne peut donc être utilisée qu'en chauffage "basse température" ou en "chauffage de base" avec un appoint complémentaire.

Les systèmes fermés : les machines à sorption

Selon l'ADEME, l'état de l'art en matière de systèmes de rafraîchissement utilisant l'énergie solaire fait apparaître deux grandes familles : les **systèmes dits « fermés »** et les **systèmes « ouverts »**. Alors que les systèmes fermés produisent, grâce aux machines à sorption, de l'eau glacée qui est ensuite utilisée pour le refroidissement ou la déshumidification de l'air, les systèmes ouverts refroidissent directement l'air (système DEC).

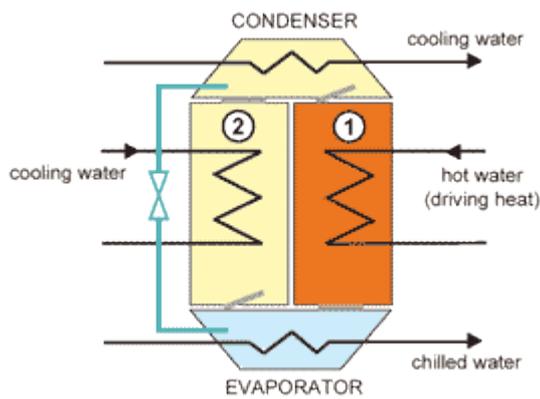
Contrairement à la climatisation électrique traditionnelle qui produit du froid en comprimant un fluide, dans les machines à sorption, la compression mécanique est remplacée par une **compression thermique**. Ces systèmes utilisent également un fluide frigorigène et ses changements de phase (liquide/vapeur) mais provoquent ces changements grâce à un apport de chaleur. Le fluide frigorigène est dans ce cas de l'eau additionnée d'un second composant. Si ce dernier est un liquide, on parle alors d'absorbant et de **machine à absorption**, si c'est un solide poreux, on parle alors d'adsorbant et de **machine à adsorption**.

Schéma de fonctionnement d'une machine à absorption



Dans les machines frigorifiques à absorption utilisées en climatisation, la substance absorbante est généralement le bromure de lithium (LiBr), le fluide réfrigérant, de l'eau. Le couple ammoniac/eau peut également être utilisé. Ce type de machine permet de refroidir de l'eau jusqu'à 7°C environ. La température de l'eau utilisée pour la décomposition de l'eau et de l'absorbant doit être comprise entre 80 et 120°C. Pour les machines à adsorption, le gel de silicium fait le plus souvent office d'adsorbant. La machine est composée de deux compartiments.

Schéma de fonctionnement d'une machine à adsorption.



L'eau chaude dont la température doit être comprise entre 65 à 80 °C permet au fluide réfrigérant de se vaporiser et de se séparer de l'adsorbant dans le premier compartiment avant de rentrer dans le cycle classique condenseur(condenser)/détendeur/évaporation (evaporator) et de s'adsorber dans le second compartiment. Au fur et à mesure, le premier compartiment se vide de fluide frigorigène tandis que le second se remplit. Il suffit ensuite d'inverser le phénomène et ainsi de suite.

Une machine frigorifique est énergétiquement efficace si elle demande peu d'énergie pour fournir une puissance frigorifique donnée. On évalue son efficacité par le calcul du coefficient de performance (COP) : rapport entre la puissance frigorifique produite et la puissance fournie au compresseur. Dans le cas d'une machine frigorifique traditionnelle, la puissance fournie est électrique. Le COP d'une telle machine peut atteindre la valeur de 3 voire plus. Dans le cas d'une machine frigorifique à absorption, le COP thermique tourne autour de 0,7 ; celui d'une machine à adsorption varie entre 0,5 et 0,6.

Ces machines à sorption sont déjà répandues dans le secteur industriel car certains process libèrent une chaleur importante dont il est possible de tirer une puissance frigorifique utile par ailleurs. Dans le secteur du bâtiment, l'idée est de coupler ces machines avec un cogénérateur ou des panneaux solaires. La chaleur nécessaire pour séparer les deux produits proviendrait par conséquent d'un cogénérateur ou de panneaux solaires thermiques. Le défi consiste désormais à réduire la taille et la puissance des machines pour pouvoir les intégrer dans le domaine du bâtiment.

À l'heure actuelle, les systèmes fermés représentent la majorité des installations existantes de rafraîchissement solaire, avec une part prépondérante pour les systèmes à absorption (60 % environ des installations).

La machine froid à absorption :

Sur une machine à froid classique, le fluide frigorigène est transporté par le biais d'un [compresseur](#). Dans le cas de la machine à absorption, on n'utilise pas de [compresseur](#) mais un absorbeur. L'absorbeur est du bromure de lithium (LiBr) dans le cas que je vais vous présenter.

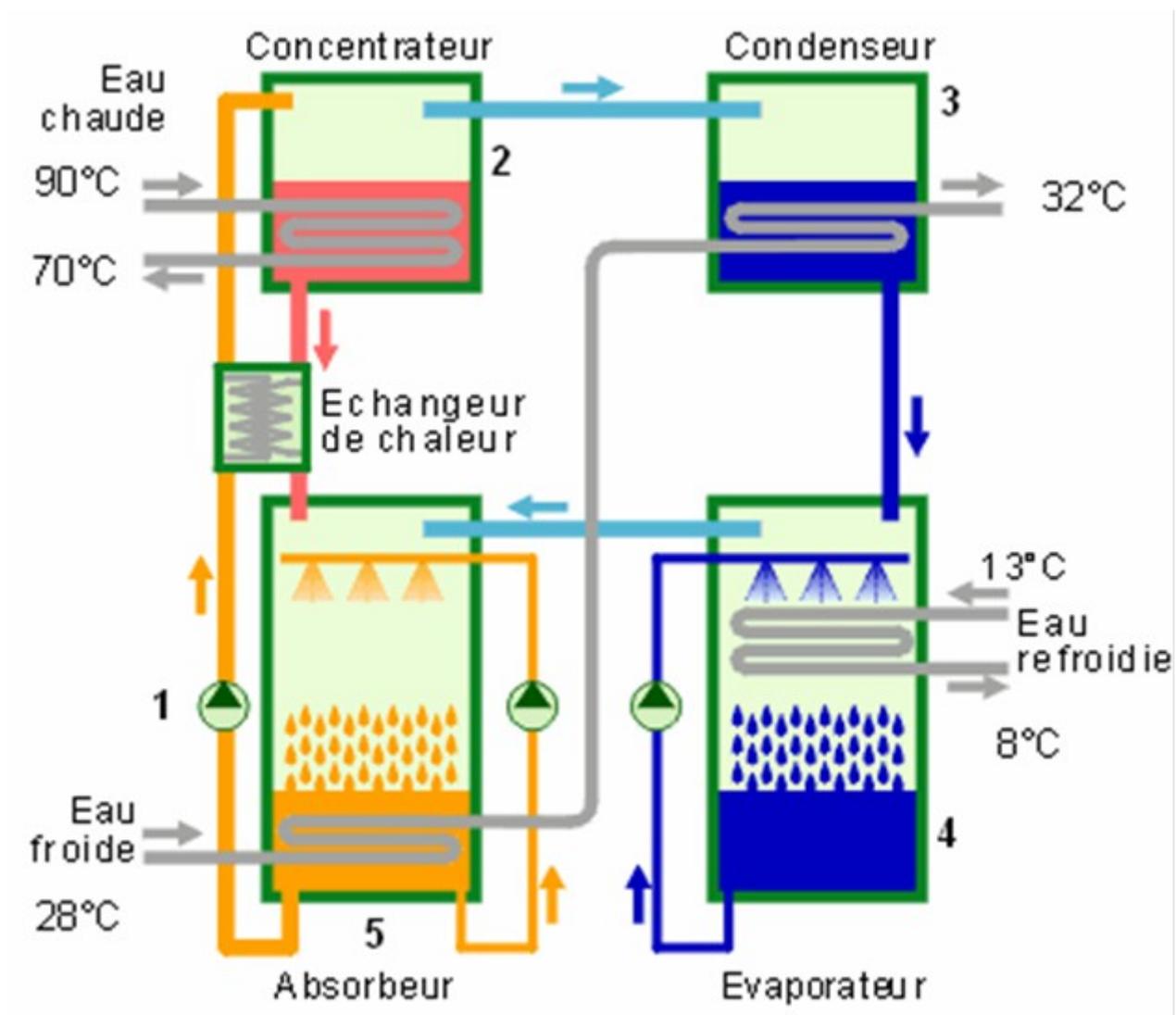
Le fluide frigorigène est de l'eau. L'eau contenue est de l'eau distillée, additionnée d'un inhibeur de corrosion pour limiter l'effet corrosif du LiBr.

Le principe est le suivant : (voir schéma en dessous de l'explication)

1. La pompe 1 transfère la solution d'eau et de bromure de lithium dilué vers l'échangeur de préchauffage.
2. Dans le concentrateur 2, l'eau chaude à 90°C fait bouillir la solution (le vide étant fait dans la machine), on concentre ainsi la solution en bromure de lithium. Cette solution concentrée et chaude redescend vers l'échangeur de préchauffage. La vapeur d'eau migre alors vers le condenseur 3 situé au dessus du générateur.
3. La vapeur générée est condensée par un refroidissement liquide, obtenu via des tours de refroidissement. L'eau est collectée et amenée par gravité vers l'évaporateur 4.
4. L'eau est vaporisée par détente sur l'évaporateur. Le vide dans cette partie de la machine est maintenu à 0,8 kPa. A cette pression, l'eau passe à l'état vapeur à environ 3,9°C, ce qui crée l'effet réfrigérant. La pression est maintenue dans l'évaporateur grâce à l'attraction créée par le bromure de lithium dans l'absorbeur 5.
5. La solution de bromure de lithium concentrée est vaporisée dans l'absorbeur, elle amène l'eau vers l'absorbeur. L'absorption de l'eau par le bromure de lithium est exothermique. La chaleur est évacuée par le circuit de refroidissement.

Les substances anti-corrosion utilisées sont à base de molybdate de lithium, à ce composant on ajoute une solution contenant des chromates et nitrates.

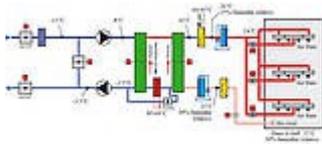
Le schéma ci-après illustre le principe exposé précédemment.



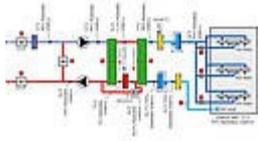
Vous vous demandez sûrement où peut-on trouver ce genre de machine et bien voilà quelques cas d'utilisation :

- Les réfrigérateurs dans les caravanes grâce à la bouteille de gaz.
- Les mini-bars dans les chambres d'hôtel pour éviter le bruit du [compresseur](#).
- Dans les industries tel que les sidérurgies car ils ont souvent de la chaleur mais ils ne savent pas quoi en faire.
- Dans les bâtiments reliés à un réseau de chauffage urbain.

Le refroidissement par absorption-désorption



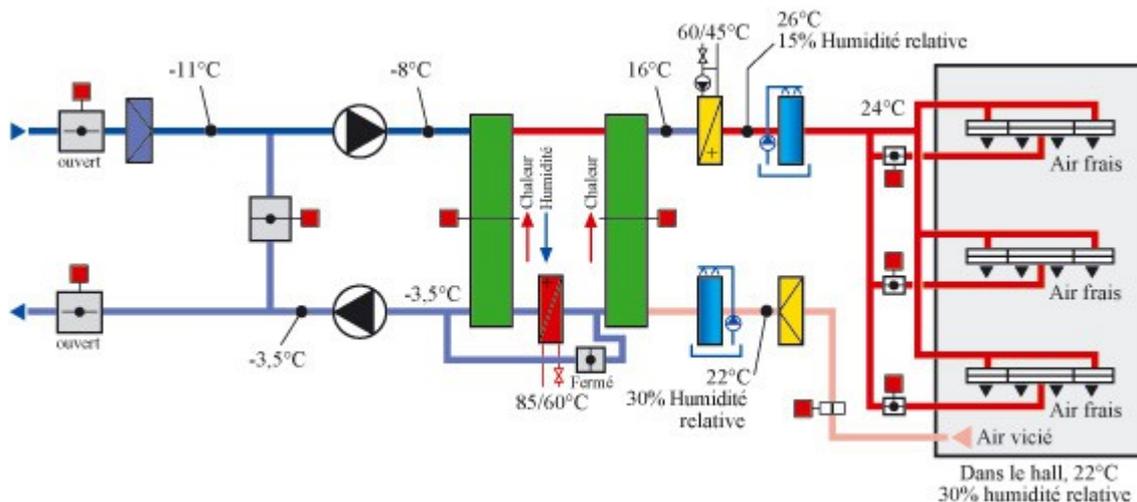
Fonction de refroidissement par absorption-désorption (chauffage).

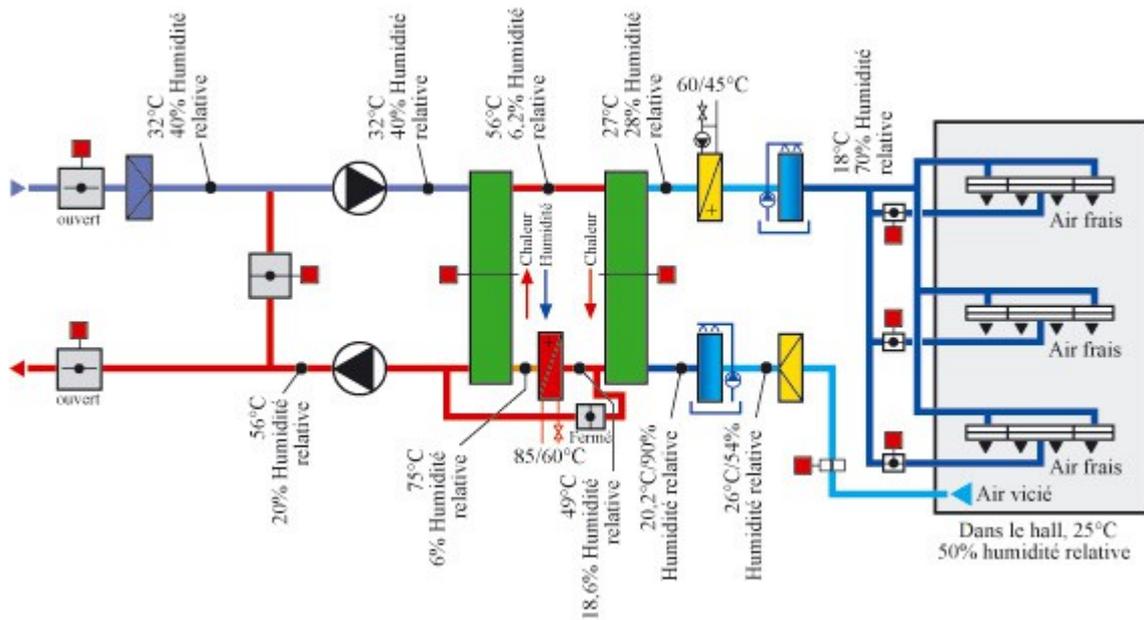


Fonction de refroidissement par absorption-désorption (refroidissement).

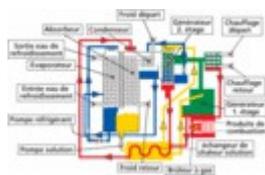
Une autre possibilité est le refroidissement par absorption-désorption: dans la roue à sorption, l'air extérieur fournit une partie de son humidité aux absorbeurs, ce qui fait grimper la température de l'air amené. Une roue thermique non revêtue d'un absorbant refroidit l'air amené. Le potentiel de refroidissement requis est prélevé dans l'air évacué qui passe par l'autre côté de la roue. Cet air a été refroidi auparavant dans un humidificateur. L'air extérieur déshumidifié dans la roue de sorption et refroidi dans la roue thermique est maintenant humidifié jusqu'à la valeur de référence, puis à nouveau refroidi. L'air évacué est chauffé dans un échangeur de chaleur ou dans un brûleur à gaz pour régénérer la roue à sorption, puis enrichi en vapeur, rejeté à l'extérieur. Selon la température extérieure, la température de l'air amené peut atteindre 12 à 19 °C, lorsque l'on dispose de 100% d'air frais.

A une charge de 75%, la climatisation à absorption-désorption présente un rendement de 1. En hiver, l





La machine de froid à absorption



Représentation schématique d'un absorbeur.

Un premier choix se portera donc sur la machine de froid à absorption, qui fonctionne selon le même principe que le réfrigérateur Sibir jadis bien connu en Suisse: « Produire du froid avec du chaud ».

Tout comme la machine de froid à compression, entraînée électriquement, l'absorbeur possède un condenseur sur le côté haute pression et un évaporateur sur le côté basse pression. C'est toutefois un «compresseur thermique», composé d'un absorbeur, d'une pompe à solvants et d'un générateur, qui aspire et comprime les vapeurs du fluide frigorigène. Dans l'absorbant, ce fluide frigorigène est l'eau. Dans l'évaporateur, elle est évaporée par la chaleur extraîte du circuit d'eau froide de la maison. Cette vapeur est ensuite aspirée par le «transporteur» bromure de lithium (une sorte de sel ou de l'ammoniaque pour les petites puissances) dans l'absorbant et ensuite transférée au générateur via une pompe à solvants. La vapeur chauffée par le brûleur à gaz est comprimée dans le générateur, se réchauffe encore davantage puis est refroidie par l'eau froide circulant dans le condenseur. La vapeur se détend, se transforme en eau et retourne à l'évaporateur pour y absorber à nouveau de la chaleur. Dans le générateur, la chaleur a séparé le solvant (bromure de lithium ou ammoniaque)

de la vapeur et le solvant retourne à l'absorbeur pour y recharger la vapeur d'eau provenant de l'évaporateur. Les absorbeurs disponibles sont des appareils à une allure, d'une puissance de 10 à 350 kW, à combustion directe avec un brûleur atmosphérique à gaz. Les appareils encore plus petits sont équipés d'un refroidissement par ventilateur et conviennent pour l'extérieur. Les plus grands appareils sont à 2 allures et possèdent deux circuits parallèles, ce qui augmente leur rendement à 1,15 environ. Les plus grands absorbeurs fonctionnent avec un brûleur à air soufflé à gaz; ils sont souvent à 2 allures et peuvent être livrés avec un échangeur de chaleur séparé pour le chauffage, ce qui permet même les fonctions de refroidissement et de chauffage simultanément (jusqu'à 50% de la puissance pour chaque fonction). En revanche, ils fonctionnent toujours en permanence car ils ne supportent pas les fréquents enclenchements-déclenchements. Les absorbeurs chauffés indirectement (le plus souvent à 1 allure) font généralement partie des installations de couplage chaleur-force et utilisent la chaleur dégagée également pour produire du froid. Ces appareils permettent une meilleure utilisation des installations CCF et augmentent leur rentabilité.

