



Janvier 2015 / 27e Note d'Information sur les technologies du froid

Le refroidissement évaporatif

L'IIF publie régulièrement des Notes d'Information à l'intention des décideurs du monde entier. Ces notes présentent une synthèse des connaissances sur des thèmes clés liés aux technologies du froid et à ses applications. Chaque note propose des axes de développement prioritaires pour l'avenir et expose les recommandations de l'IIF en ce sens.

En raison de son faible coût et de son efficacité, en particulier sous un climat chaud et sec, le froid évaporatif devrait être davantage utilisé. Cette note d'information donne un état de l'art de cette technologie simple et pratique. Le principe de fonctionnement et les divers modes de fonctionnement des systèmes sont expliqués à l'aide de représentations simplifiées. Les potentiels d'économie d'énergie possibles par rapport aux systèmes de refroidissement classiques et les problèmes liés à la consommation d'eau sont mis en évidence. Le conditionnement d'air, l'entreposage des denrées périssables et le pré-refroidissement, qui sont les principales applications du froid évaporatif, sont expliqués. En conclusion, l'IIF fournit quelques recommandations pratiques sur les conditions dans lesquelles cette technologie peut être mise en œuvre.

Cette Note d'Information a été préparée par Renato Lazzarin, Président de la Commission E1 de l'IIF, avec l'aide du siège de l'IIF et révisée par plusieurs experts du réseau de l'IIF.



INTERNATIONAL INSTITUTE OF REFRIGERATION
INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID

www.iifir.org

iif-iir@iifir.org



[#refrigeration](https://twitter.com/refrigeration)

177, boulevard Maiesherbes, 75017 PARIS – France

T: 33 (0) 1 42 27 32 35 – F: 33 (0) 1 47 63 17 98

Introduction

Le principe du refroidissement évaporatif est basé sur le fait que l'évaporation d'un liquide absorbe bien plus de chaleur que la quantité requise pour faire augmenter sa température de quelques degrés. Pour prendre un exemple concret, on peut penser à la sensation de froid que l'on ressent quand on sort d'une piscine en plein air, même par temps chaud, sous l'effet du vent : l'eau présente sur la peau s'évapore, en retirant du corps la chaleur d'évaporation correspondante, ce qui le refroidit.

Ce processus est utilisé, en combinaison avec d'autres, dans les systèmes frigorifiques et de conditionnement d'air « classiques ». On désigne néanmoins par « refroidissement évaporatif » le refroidissement obtenu uniquement grâce à l'évaporation d'eau dans l'air.

Les principaux procédés de refroidissement évaporatif sont : le refroidissement évaporatif direct, le refroidissement indirect et la combinaison des deux. La présente note présente les applications de ces procédés et les conditions dans lesquelles ils peuvent présenter un intérêt technique et économique.

Une description et des explications techniques plus complètes sont diffusées dans une Note Technique sur le refroidissement évaporatif [Lazzarin, 2012] diffusée sur le site Web de l'IIF : www.iifir.org

Principes de fonctionnement

Le **refroidissement évaporatif** fait appel à deux phénomènes importants. D'une part, à température et pression normales, il faut environ 60 fois plus de chaleur pour évaporer une certaine quantité d'eau que pour élever sa température de 10 °C. D'autre part, l'air non saturé en humidité peut absorber une certaine quantité de vapeur d'eau supplémentaire : la chaleur contenue dans l'air est absorbée par l'évaporation d'eau. Ce changement d'état liquide-vapeur provoque simultanément le refroidissement de l'air et de l'eau encore liquide.

Remarque : La quantité de vapeur d'eau que contient l'air saturé augmente plus vite que la température. Le froid évaporatif est donc particulièrement intéressant dans les régions à climat chaud et sec. A contrario, le potentiel de refroidissement évaporatif diminue et tend vers zéro lorsque l'air se rapproche de son point de saturation en humidité. Dans les régions à climat humide, le froid évaporatif peut cependant être utilisé au niveau des condenseurs de systèmes frigorifiques classiques ou des échangeurs de chaleur dans les processus industriels, comme on le verra plus loin.

Refroidissement évaporatif direct. C'est le procédé le plus simple : l'air extérieur passe dans une enceinte où il entre en contact avec de l'eau. Celle-ci est fournie soit par un asperseur, sous forme de fines gouttelettes, soit par un milieu poreux saturé d'eau. L'eau s'évapore dans l'air, ce qui abaisse sa température et augmente son taux d'humidité. Les limitations pratiques des appareils font que l'on ne sature pas l'air à 100 %, mais à quelques pour cents de moins (exemples : les trajets représentés par les flèches 1 et 3 sur les figures 1 et 2). Ce procédé est également appelé « refroidissement adiabatique » par les fabricants, car il n'y a pas d'échange de chaleur autre qu'entre l'air et l'eau avec laquelle il est en contact.

Refroidissement évaporatif indirect : dans ce cas, l'air destiné à refroidir la pièce passe par un échangeur de chaleur qui est lui-même placé dans une enceinte refroidie par évaporation. Comme la quantité de vapeur d'eau dans cet air n'est pas augmentée, l'humidité relative augmente moins que lors du refroidissement direct, à abaissement de température égal. Du fait de la présence d'un échangeur dans le dispositif, l'abaissement de la température réalisé grâce à l'échangeur de chaleur est légèrement moindre qu'avec le refroidissement direct (exemple : le trajet 2 sur les figures 1 et 2).

Système bi-étagé : on peut aussi refroidir l'air successivement de façon indirecte, puis directe (exemple : les trajets 2, puis 3 sur les figures 1 et 2), ce qui permet d'abaisser davantage la température qu'avec un seul des deux procédés mentionnés ci-dessus. A titre d'exemple, un tel système installé dans une zone aride du sud de la Californie avec une température de l'air extérieur à 38,3 °C et une humidité relative de 12 % environ, permet de fournir de l'air à une température inférieure à 13 °C [Jain, 2008]. Le coût de l'équipement (hors pose) pour climatiser 1 500 m² de locaux dans ce contexte est estimé à moins de 10 000 € (environ 5 000 € pour le brumisateur et un peu moins pour l'échangeur de chaleur).

En pratique, on ne peut pas utiliser la totalité du potentiel de refroidissement, en raison des limitations physiques des appareils et des risques de corrosion rencontrés lorsque l'humidité relative est trop élevée. Il s'y ajoute, dans certains cas, des contraintes liées à l'utilisation que l'on veut faire des locaux rafraîchis, contraintes sur lesquelles on reviendra plus loin. L'adjonction d'appareils classiques de refroidissement ou de déshumidification peut donc s'avérer indispensable si l'on veut maîtriser précisément la température et l'humidité.

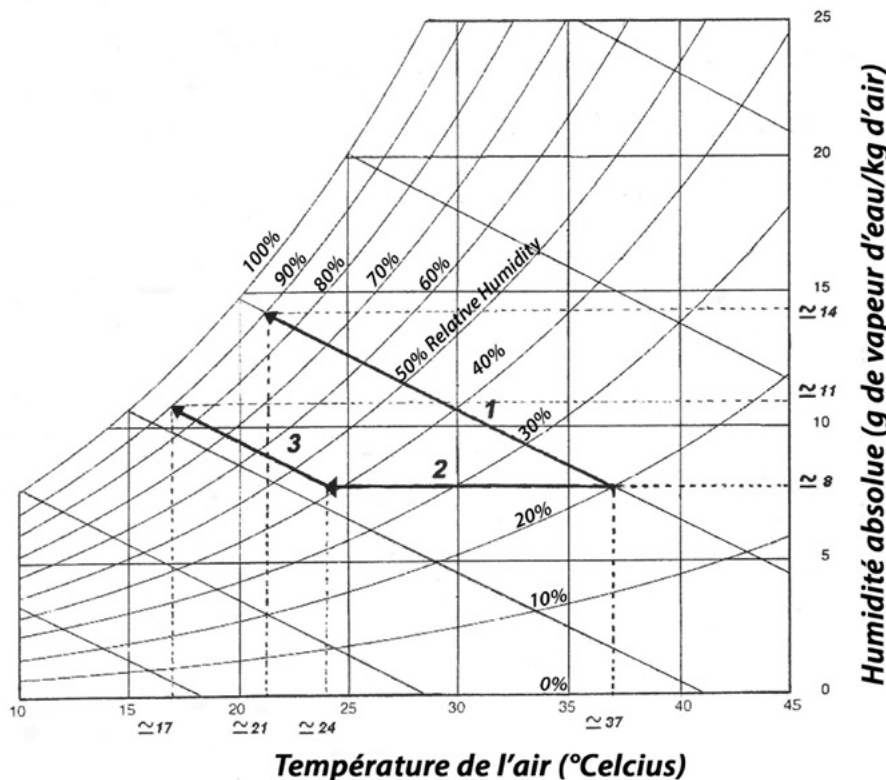
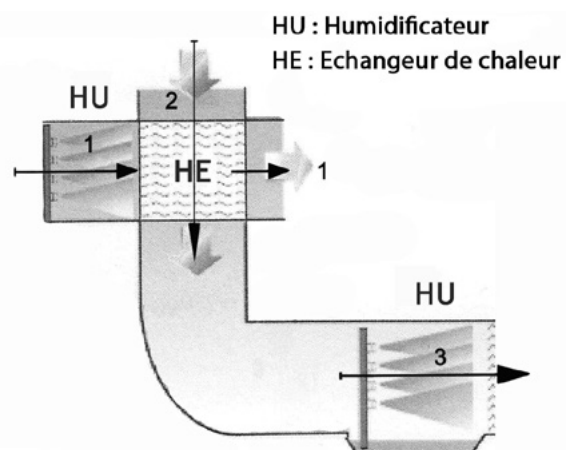


Figure 1 : Représentation des trajets 1, 2 et 3 sur un diagramme psychrométrique simplifié de l'air humide à pression normale (type diagramme de Carrier)

Figure 2 : Représentation des trajets trajets 1, 2 et 3 dans un schéma simplifié d'appareil utilisant le froid évaporatif (les ventilateurs, pompes, filtres et appareils de régulation ne sont pas représentés.)



Trajet 1/refroidissement évaporatif direct : l'air entrant dans l'appareil a une température de 37 °C et une humidité relative (HR) de 20 %, correspondant à une humidité absolue (HA) de 8 g de vapeur d'eau par kg d'air (N.B. tous les chiffres sont arrondis). L'air sort à une température de 21 °C, HA= 14 g/kg ; il est donc à la fois refroidi et humidifié, d'où un déplacement sur un segment de droite oblique sur la figure 1 (refroidissement adiabatique). Son humidité relative est de 90 % (l'air contient 90 % de la vapeur d'eau qu'il contiendrait s'il était saturé en humidité, à la même température de 21 °C).

Trajet 2/refroidissement évaporatif indirect : avec les mêmes conditions initiales, l'air est refroidi dans un échangeur de chaleur, lui-même refroidi par refroidissement direct. L'air n'est pas en contact avec l'eau, son humidité absolue (HA = 8 g/kg) ne change pas au cours du processus. Du fait des limitations de l'échangeur, la température à la sortie est légèrement supérieure à celle obtenue dans le cas précédent (par exemple, 24 °C au lieu de 21 °C).

Trajets 2+3/système bi-étagé : l'air sortant du compartiment à refroidissement indirect (T = 24 °C, HA = 8 g/kg) subit un refroidissement direct (trajet 3) qui abaisse sa température à 17 °C et augmente son humidité absolue à 11 g/kg (HR = 90 %).

Remarque : on peut envoyer dans le premier humidificateur une partie de l'air rafraîchi sortant de l'échangeur, et faire recirculer également la fraction de l'eau non évaporée. On peut ainsi rafraîchir l'air sortant de l'échangeur (trajet 2) jusqu'à une température encore plus basse que dans la figure 1, et cela sans augmenter son humidité absolue (la flèche horizontale 2 sur la figure 1 étant alors prolongée vers la gauche). La partie de l'air non recyclée vers l'humidificateur est dirigée vers le local à rafraîchir. Si nécessaire (pour le confort des occupants en climat très sec par exemple), l'air passe dans un second humidificateur avant d'entrer dans le local [Jain, 2008; Bruno, 2010].

Économies d'énergie et consommation d'eau

En moyenne, la consommation d'énergie d'un appareil à refroidissement évaporatif est environ 4 fois inférieure [Energy.gov, 2012] à celle d'un appareil classique de même puissance frigorifique, mais peut être jusqu'à 10 fois moindre lorsque le climat est très chaud et sec [Herman, 2009 ; Jaber, 2011]. Le coût de fonctionnement global est environ 20 fois moins important que celui d'un appareil classique à compression de vapeur [Lazzarin, 2012].

La consommation d'eau peut être une préoccupation, particulièrement dans les régions arides où le refroidissement évaporatif est le plus avantageux. L'évaporation d'1 m³ d'eau produit un effet frigorifique d'environ 2,5x10⁶ kJ (environ 700 kWh), soit autant de froid qu'environ 230 kWh électriques utilisés par un système de conditionnement d'air « classique », dont le coefficient de performance (COP) serait de 3. Dans la pratique, une fraction (de l'ordre de 20 %) de l'eau est utilisée non pour refroidir l'air mais pour éviter le dépôt de sels minéraux qui résulterait d'une trop forte concentration consécutive à l'évaporation.

La qualité de l'eau doit être surveillée, et l'eau traitée au besoin, par désinfection, filtration ou déminéralisation :

- **pour des raisons sanitaires** : dans les systèmes à recirculation d'eau, le risque de légionellose doit être pris en compte. D'autre part, dans le cas du refroidissement direct de l'air pour des habitations ou des lieux de travail, s'il y a un risque de formation d'aérosol, il ne faut pas que l'eau contienne des agents pathogènes ;
- **pour des raisons techniques** : plus l'eau est chargée en sels minéraux ou en particules en suspension, plus les opérations de « rinçage » évoquées plus haut devront être fréquentes (ce qui augmente la consommation d'eau à puissance frigorifique égale) ; une eau trop chargée peut être inutilisable.

Utilisations du froid évaporatif

Le choix du système de refroidissement (direct, indirect ou bi-étagé, voire multi-étagé, avec ou sans recirculation d'air ou d'eau) est un choix technique et économique qui dépend de la température et de l'humidité de l'air ambiant, et le cas échéant des exigences de température et d'humidité pour les locaux rafraîchis, et de la qualité de l'eau. L'air refroidi par refroidissement direct ne peut être pulsé dans les locaux que si la qualité de l'eau le permet.

1. Conditionnement d'air

L'application principale du froid évaporatif est le conditionnement des locaux dans les régions chaudes et arides. L'humidification de l'air trop sec améliore le confort, jusqu'à un certain point : lorsqu'il fait chaud, la régulation thermique de l'organisme humain repose précisément sur le refroidissement évaporatif (évaporation d'eau par les pores de la peau) et cette régulation ne fonctionne pas bien si l'air est trop humide (transpiration). On considère généralement que les conditions de confort thermique humain sont réunies lorsque la température est comprise entre 20 et 27 °C et l'humidité relative entre 30 et 65-70 % [Lazzarin, 2012]. Toutefois, la définition des conditions de température et d'humidité jugées « confortables » pour l'organisme humain comporte une part de subjectivité. On peut rappeler aussi le rôle de l'habillement, de l'humidité relative et de la vitesse de circulation de l'air (débit de renouvellement de l'air des locaux, ventilateurs) dans la sensation de fraîcheur, ainsi que la température extérieure et le climat de la région. C'est pourquoi il existe plusieurs normes sur ce sujet, par exemple ANSI/ASHRAE Standard 55, EN 15251 et ISO 7730.

Par ailleurs, le conditionnement d'air ne concerne pas que les êtres humains, mais aussi l'élevage : de fortes chaleurs ont un impact sur la santé, la reproduction et la croissance des animaux. En outre, les volailles n'ont pas de régulation thermique par la peau (pas d'évapotranspiration), et une température excessive peut donc leur être fatale.

2. Entreposage de produits périssables

Dans les pays chauds, le froid évaporatif ne permet pas d'atteindre les températures recommandées pour les produits d'origine animale ni pour la plupart des produits d'origine végétale. Toutefois, il peut permettre dans certains cas de ralentir significativement la dégradation de fruits et légumes tropicaux, apportant ainsi un gain appréciable en termes de durée de conservation et de commercialisation.

L'augmentation de l'humidité relative réduit le flétrissement et la perte de poids par évapotranspiration des fruits et légumes, mais un excès d'humidité relative favorise la prolifération d'organismes indésirables, notamment de champignons (botrytis, penicillium...) entraînant la dégradation des produits, voire la production de bio-toxines. Pour la conservation des fruits et légumes, le taux d'humidité recommandé est généralement de 85 à 95 %. Les risques de corrosion de pièces métalliques sont également à prendre en compte.

3. Pré-refroidissement

Lorsque le refroidissement évaporatif ne permet pas d'atteindre les températures voulues, il peut, dans certains cas, être utilisé pour le pré-refroidissement dans des systèmes classiques, de façon à réduire leur consommation d'énergie ainsi que leur dimensionnement, d'où un moindre coût de fonctionnement et d'investissement.

Remarque : les températures les plus élevées sont généralement observées en saison sèche dans des régions à climat continental et éloignées des sources majeures d'humidité; il s'ensuit une forte amplitude thermique journalière, avec des humidités relatives très faibles aux heures chaudes (une situation similaire est celle de régions à climat relativement tempéré mais pouvant subir des épisodes de vent très chaud et sec venant du désert,

comme sur la rive sud de la Méditerranée par exemple). Dans ces régions, c'est donc aux périodes les plus chaudes que le refroidissement évaporatif est le plus avantageux. Ceci est important, car le rendement des appareils classiques diminue au fur et à mesure que la température extérieure augmente. Cette remarque vaut pour tous les systèmes utilisant le froid évaporatif en complément d'un autre procédé de refroidissement. L'intérêt potentiel du froid évaporatif est donc double : d'une part, il permet de réduire la taille des équipements « classiques » fonctionnant sous des conditions habituelles, et d'autre part, il permet de réduire le surdimensionnement de ces appareils qui serait nécessaire pour faire face aux températures les plus élevées.

a. Refroidissement des condenseurs des appareils « classiques » de refroidissement

Dans les systèmes frigorifiques et de conditionnement d'air classiques, la chaleur est évacuée vers le milieu extérieur au niveau du condenseur ; abaisser la température du condenseur avec de l'air ou de l'eau rafraîchie par froid évaporatif permet d'améliorer le rendement de l'appareil. Ce principe est d'ailleurs largement utilisé dans les condenseurs évaporatifs et les condenseurs adiabatiques, y compris dans certains cas sous climat humide.

b. Refroidissement de liquides

Le procédé est semblable à celui du refroidissement indirect décrit plus haut, à ceci près que c'est de l'eau ou un autre liquide qui passe dans l'échangeur (lui-même refroidi par refroidissement évaporatif direct). Le liquide refroidi peut être utilisé pour le conditionnement d'air ou pour évacuer la chaleur produite dans un processus industriel par exemple. Dans ce dernier cas, le froid évaporatif peut présenter un intérêt économique et technique, même dans un climat relativement humide.

Références

Jain, S., 2008. Imitation de la nature : systèmes de refroidissement évaporatifs. ASHRAE Transactions, Volume 114, Partie 2. ASHRAE, Atlanta, États-Unis. Disponible en ligne : <http://www.thefreelibrary.com/Emulating+nature:+evaporative+cooling+systems.-a0201378222>

Bruno, F., 2010. Tests d'un nouveau refroidisseur évaporatif indirect sur site. 9ème Conférence IIF-Gustav Lorentzen sur les fluides actifs naturels (GL2010). Proceedings. Sydney, Australie, Avril 12-14, 2010.

Lazzarin, R., 2012. Technical Note on Evaporative Cooling. Disponible en ligne : http://www.iifir.org/userfiles/file/webfiles/in-depth_files/Evaporative_cooling_Lazzarin_2014_EN.pdf

Energy.gov, 2012. Energy savers: evaporative-coolers. USA Department of Energy. Disponible en ligne: <http://energy.gov/energysaver/articles/evaporative-coolers>

Herman, T., 2009. Le refroidissement évaporatif biétagé rendu facile. RACA Journal, Volume 28, Numéro 7, Septembre 2009.

Jaber, S., et al., 2011. Le froid évaporatif : un système efficace dans la région méditerranéenne. Applied Thermal Engineering, Volume 31, Numéro 14-15, Novembre 2011.



Recommandations

En raison de son faible coût et de son efficacité sous climat chaud et sec, le froid évaporatif devrait être utilisé davantage :

- pour le conditionnement d'air des habitations et des lieux de travail, ce qui constitue l'utilisation la plus développée actuellement,
- pour celui de certains bâtiments d'élevage sous climat chaud et sec,
- pour l'entreposage pour une courte durée de produits supportant pendant quelque temps des températures « moyennes » mais se dégradant rapidement en cas de fortes chaleurs.

La hausse du coût de l'énergie peut aussi augmenter l'intérêt de l'utilisation du froid évaporatif pour le pré-refroidissement et le refroidissement des condenseurs des systèmes frigorifiques classiques et de certains échangeurs de chaleur, sous climat chaud et modérément humide.

L'usage du froid évaporatif suppose cependant que l'eau disponible soit de quantité et de qualité suffisante, et que les problèmes sanitaires soient maîtrisés : risque de développement des légionnelles dans certains systèmes, risques de développement d'agents indésirables ou pathogènes en cas d'humidité excessive dans les locaux.

Les régions dont le climat est le plus favorable à l'application du froid évaporatif se trouvent aussi bien dans des pays développés (Australie, Etats-Unis...) que dans des pays émergents et des pays figurant parmi les moins avancés.

Il est donc important de favoriser des échanges internationaux de connaissances et de technologies relatives au froid évaporatif. L'IIF y contribue, notamment grâce à ses groupes de travail et ses publications.

