

## ECONOMIE D'ENERGIE PAR STOCKAGE DU FROID

Constantin IONESCU<sup>1\*</sup>, Horia NECULA<sup>2</sup>, Adrian BADEA<sup>3</sup>

*Thermal energy storage has recently attracted increasing interest related to the thermal applications such as the cooling and the air-conditioning of the buildings. The energy storage is essential whenever there is a mismatch between the supply and consumption of energy. In the first part of this paper the general concepts concerning cold storage and the situations when the implementation of such system is feasible, are presented. Further, the strategies employed for cold storage are compared. A presentation of the fluids used for the storage of cold with their advantages and disadvantages is also made. Finally, an evaluation of energy saving related to the use of a cold storage system is carried out.*

*Le stockage d'énergie thermique a récemment attiré l'intérêt croissant lié aux applications thermiques telles que le refroidissement et la climatisation des bâtiments. Le stockage d'énergie est essentiel quand il y a une disproportion entre l'alimentation et la consommation de l'énergie. Dans la première partie de ce papier les notions générales concernant le stockage du froid et les situations quand l'implémentation d'un tel système est faisable, sont présentés. Suite, les stratégies employées pour le stockage du froid sont comparés. Une présentation des fluides utilisés pour le stockage de froid avec leurs avantages et inconvénients est aussi faite. Finalement, une évaluation d'économie d'énergie réalisée par l'utilisation d'un système de stockage de froid est réalisée. Economie d'énergie par stockage du froid est belle.*

**Keywords:** thermal energy storage, energy saving, storage strategy, cooling load.

### 1. Introduction

Le stockage de froide est une technologie relative mature qui continue à se développe grâce aux nouveaux recherche dans le domaine des matériaux de stockage d'énergie. Les plus utilisées milieux de stockage du froid sont l'eau, sels eutectiques et glace ; ceux-ci seront présentées détaillées dans le paragraphe 3. Le concept de base de stockage d'énergie en général et de stockage de froide en particulier est d'intercaler un réservoir de stockage entre la production et l'utilisation d'énergie. Le schéma d'un système de production, stockage et l'utilisation du froid est présenté dans la Fig. 1.

---

<sup>1</sup>As., Power Engineering Department, University "Politehnica" of Bucharest, Romania  
(\*Corresponding author)

<sup>2</sup>Conf., Power Engineering Department, University "Politehnica" of Bucharest, Romania

<sup>3</sup>Prof., Power Engineering Department, University "Politehnica" of Bucharest, Romania

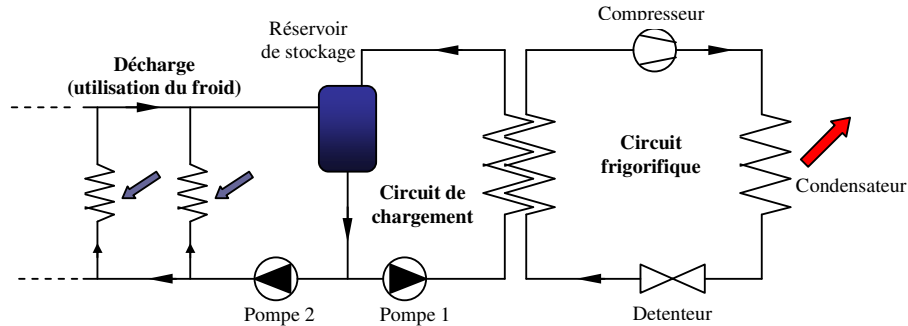


Fig.1 : Système de production-stockage-utilisation du froid

Un tel système est bien connu sur le nom de système de refroidissement indirect. Dans l'évaporateur du circuit frigorifique a lieu le refroidissement/ congélation du matériel de stockage de froide. Par l'aide d'une pompe (pompe 1), le fluide est transporté vers le réservoir de stockage pendant la période d'accumulation du froid (chargement). Pendant la période d'utilisation du froid (déchargement) le fluide est prélevé par la partie basse (le fluide plus froid), dans le cas d'eau et sels eutectiques. Dans le cas de l'utilisation de glace, dans le circuit de décharge circule soit l'eau froide, soit le mélange eau-particules de glace, appelé coulis de glace. Dans le premier cas, le prélèvement du fluide froid se faire comme dans le cas d'eau. Pour le deuxième cas, les particules de glace accumulées à la partie haute du réservoir sont extraites et mélangées avec de l'eau pour obtenir la concentration désirée. Ainsi, le fluide contenant des particules de glace est circulé dans le circuit de décharge.

Dans plusieurs pays, un sommet dans la consommation d'énergie électrique apparaît pendant les après-midi d'été à cause de la demande des systèmes de conditionnement d'air. Pour baisser ce sommet, l'électricité produite pendant la période creuse de nuit, est stocké sous forme d'énergie froide par produisant d'eau froide ou glace. Cette énergie est utilisée pour refroidir l'air dans la journée. Cette technique permet l'utilisation d'un pourcentage plus grande de la charge de base, réduisant ainsi le niveau maximum du sommet de consommation.

Les systèmes de stockage sont faisables dans les situations [1] :

- la charge maximale de refroidissement du bâtiment est beaucoup plus grande que la charge moyenne ;
- la structure a des grandes demande des charges, des charges discontinues, ou un haut écart entre les taux d'énergie entre le pic de consommation et la période creuse ;
- un système de refroidissement existant est augmenté ;
- un réservoir existant est disponible ;

- un pouvoir électrique limité est disponible au site ;
- le stockage du froid est désirable ;
- la distribution d'air froide serait avantageuse.

Les domaines d'utilisation du stockage du froid sont variés mais les plusieurs applications sont pour le conditionnement d'air dans les grands bâtiments et dans l'industrie alimentaire pour la production et préservation des denrées. L'énergie consommée par le système de conditionnement de l'air dans un bâtiment représente 30-40% de l'énergie totale consommé ; l'énergie utilisée par les systèmes de refroidissement dans les centres commerciaux représente 40-70% de l'énergie totale consommée [2].

## 2. Stratégies de stockage

Pour rencontrer la demande de froid pendant les heures de sommet, quelques stratégies sont disponibles. Ainsi, les stratégies de stockage d'énergie thermique sont souvent classifiées comme stockage total ou stockage partiel.

### *Stockage total*

Le système stockage total, aussi connu comme le système de décalage de la charge, minimise le coût de refroidissement d'un bâtiment en décalant l'utilisation de l'énergie des heures du sommet aux heures de la période creuse (Fig. 2).

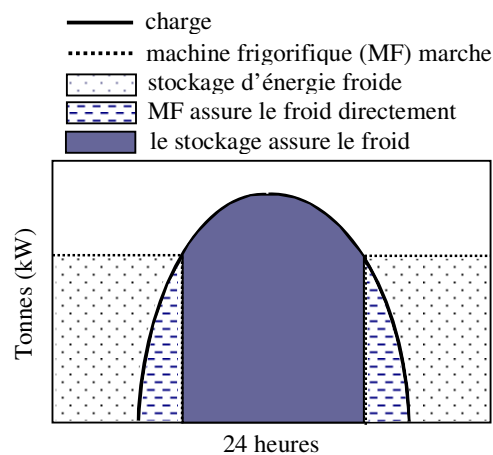


Fig. 2 : Stratégie de stockage total [3]

Le système est typiquement conçu pour fonctionner à la pleine capacité pendant les heures de creuse de nuit pour stocker le froid. Ainsi, l'équipement de

réfrigération ne fonctionne pas pendant les heures de sommet et toutes les charges de refroidissement sont rencontrées du stockage.

Un tel système exige des capacités relativement grandes de réfrigération et de stockage. Le système total de stockage est le plus attrayant quand les charges du sommet sont élevées ou quand la période de sommet est relativement courte. Par l'utilisation de ce système de stockage, la demande d'énergie électrique pour refroidissement pendant le sommet peut être réduit de 80 à 90% comparés à un système de refroidissement conventionnel.

#### *Stockage partiel*

Avec cette stratégie, la capacité de la machine frigorifique est plus petite que la charge demandée. En général, les systèmes de stockage partiel rencontrent une partie de la charge de refroidissement du stockage et une partie directement du machine frigorifique pendant la période de sommet. Les systèmes de stockage partiel peuvent être dimensionnés pour lisser la courbe de charge (*niveler-charge*) ou pour limiter la demande (*limiter-demande*). Ces termes se réfèrent à la quantité d'énergie froide du sommet commuté vers la période creuse.

Un système *niveler-charge* est conçu à travailler avec la machine frigorifique à pleine puissance pendant 24 heures dans les jours de sommet (Fig. 3).

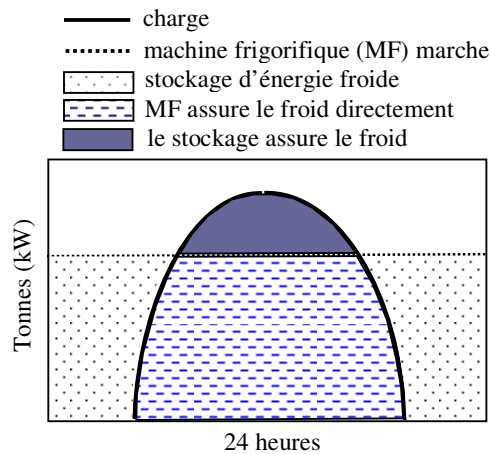


Fig. 3 : Stratégie de stockage partiel niveler-charge [3]

Quand la charge est plus petite que la sortie de la machine frigorifique, l'excès de froid est stockée ; quand la charge dépasse la capacité de la machine frigorifique, le demande supplémentaire est fourni par le stockage. La stratégie niveler-charge est attrayante pour des applications où le sommet de refroidissement est plus grand que la charge moyenne. Ce type de stockage minimise la dimension et le coût de la machine frigorifique et du système de

stockage, mais réalise une économie d'énergie plus petite que le stockage total. Cependant, cette stratégie économise de 40 à 60 % de la demande d'électricité pendant le sommet.

Dans un système *limiter-demande*, la machine frigorifique travaille à une capacité réduite pendant la période de sommet (Fig. 4).

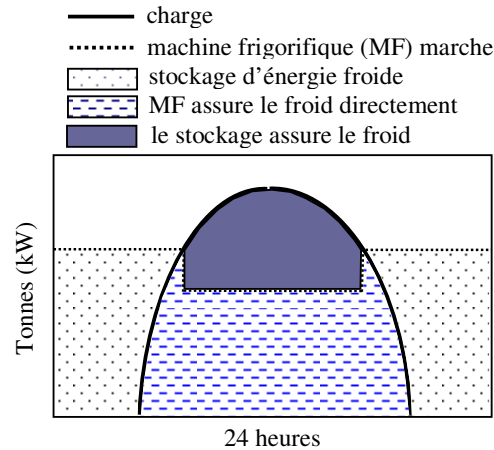


Fig. 4 : Stratégie de stockage partiel limiter-demande [3]

Cette stratégie nécessite des systèmes de control compliqués, tant que la demande de sommet doit être assuré par le stockage. Un appareil de mesure de la demande d'électricité est utilisé dans ce but. Une stratégie limiter-demande est la plus utilisée aux bâtiments avec demandes importantes et des périodes courtes d'occupation qui permet un grand intervalle de stockage. La dimension et coût du système et l'économie d'électricité tendent à tomber entre les autres deux configurations.

Des variations supplémentaires du stockage total où partiel sont possibles par planifier le fonctionnement des multiples machines frigorifiques [4]. Les systèmes de stockage partiel emploient une de deux stratégies de control pour diviser la charge entre le réfrigérateur et le stockage. Une stratégie *réfrigérateur-prioritaire* emploie la machine frigorifique pour assurer directement autant que possible de la charge. Le refroidissement est assuré à partir du stockage seulement quand la charge excède la capacité de réfrigérateur. La stratégie *stockage-prioritaire* emploie autant que possible de la charge du froid stocké, en utilisant la machine frigorifique seulement quand la charge quotidienne excède la capacité totale de refroidissement stockée.

Quelques systèmes emploient des combinaisons de ces stratégies. Par exemple, réfrigérateur-prioritaire pendant les heures de la période creuse de journée, et stockage-prioritaire pendant les heures de sommet.

### 3. Systèmes de stockage

Le stockage du froid se peut faire par différentes moyennes et le milieu de stockage détermine les dimensions du réservoir de stockage, la taille et la configuration du système de climatisation. Les options incluent l'eau refroidie, la glace, et les sels eutectiques. Dans le *Tableau 1* est présenté la comparaison entre les trois milieux de stockage.

*Tableau 1*

**Propriétés des milieux de stockage de froid [1]**

Milieu de stockage	Volume (m <sup>3</sup> /tonne-heure)	Température de stockage (°C)	Température de déstockage (°C)
Eau froide	0,3-0,6	3,9-6,7	5-7,8
Sels eutectiques	0,17	8,3	8,9-10
Glace	0,07-0,09	0	1,1-2,2

#### *Stockage par eau froide*

Le système de stockage par eau froide, CWS (Chilled-Water Storage), utilise la chaleur sensible de l'eau pour stocker l'énergie. Dans ce système, l'eau est emmagasinée dans un réservoir dans des couches stratifié pour un usage ultérieur. Pendant la période de décharge, l'eau refroidie est fournie du fond du réservoir et est retournée au sommet du réservoir aux débits faibles pour minimiser le mélange des couches [5]. La capacité de refroidissement du système dépend de l'écart de température à travers du réservoir stratifié. Cette capacité augmente en emmagasinant l'eau à une température plus bas possible. L'eau refroidie est accumulée pendant la nuit dans un réservoir de stockage et pendant la journée, l'eau refroidie est circulée dans le système de refroidissement pour atteindre le niveau de confort exigé pour les occupants du bâtiment.

#### *Stockage par sels eutectiques*

Les sels eutectiques, connues aussi comme matériaux à changement de phase, utilisent une combinaison des sels anorganiques, l'eau et d'autres éléments pour créer un mélange qui congèle à une température désirée. Le matériel est encapsulé en containers de plastique, qui sont déposés dans le réservoir de stockage, l'eau circulant parmi eux. Les plus utilisés mélanges utilisés, gèlent à une température de 8 degrés environ. Ceci permet l'utilisation des équipements standard de refroidissement dans la période de stockage, mais conduit aux températures hautes de décharge. Suite à cet inconvénient, leur domaine d'utilisation est limité.

#### *Stockage par glace*

Ce type de système utilise la chaleur latente de changement de phase liquide-solide d'eau (334 kJ/kg) pour stocker le froid. La capacité de refroidissement du coulis de glace est de quatre à six fois plus haute que cela d'eau refroidie. Ainsi,

les systèmes à glace offrent la plus grande capacité de stockage mais ils nécessitent le plus complexe équipement de charge et décharge.

Par l'aide des évaporateurs spécial adaptés (générateurs de glace), la glace est produite en utilisant des solutions d'eau glycolée ou saumure. Les générateurs de glace sont classifiés comme statique ou dynamique [6]. Dans les types statiques, la glace produite adhère à la surface de refroidissement et forme une couche de glace dessus ; dans les types dynamiques, la glace est produite sur une surface puis enlevée par un procédé mécanique (raclage, brossage, lit fluidisé). En état de recherche existent des autres types de production du coulis de glace : par pulvérisation d'eau, par vibration ultrasonique, etc.

#### 4. Evaluation d'économie d'énergie

Le coût de demande est l'élément principal en détermination d'économicité d'un système de stockage d'énergie thermique. L'économie d'énergie peut être réalisée, en particulier dans les nouvelles constructions ou dans les grands projets de rénovation, mais il représente un petit pourcentage dans l'économie de frais d'exploitation. En fait, la consommation d'énergie peut augmenter et encore tenir compte d'un projet économiquement viable.

Pour déterminer la faisabilité économique, des données précises de charge de refroidissement de la machine frigorifique existante sont toujours les meilleures. Si les données ne sont pas disponibles, considérées non fiables ou incomplètes, ou si les données ont été collectées seulement une période de temps courte, un modèle horaire de simulation numérique doit être développé par du personnel professionnel habilité. Des données disponibles, même durant une période courte, peuvent être employées pour aider à calibrer le modèle de simulation du bâtiment et à améliorer sa précision.

L'équation (1) peut être employée pour l'estimation d'économie de demande des systèmes de stockage d'énergie thermique. Tandis que la consommation d'énergie peut augmenter ou diminuer, le changement a généralement seulement un impact mineur sur l'économie du projet. La période de temps quand l'énergie est consommée a un impact significatif ; par exemple, la réduction de demande du sommet ou la substitution de l'énergie chère du sommet avec le moins chère énergie du creux. L'économie de demande doit être calculée pour chaque mois d'opération de la machine frigorifique.

$$kW_{\text{économie}} = (\neq \text{tonnes})_{\text{déplacées}} \times (kW / \text{tonne})_{\text{performance MF}} \quad (1)$$

L'énergie déplacée vers la période creuse est plus difficile de calculer sans données mesurées ou une simulation numérique horaire. Une évaluation grossière peut être calculée par l'aide de l'équation (2).

$$kW_{\text{déplacées}} = (\neq \text{tonnes})_{\text{déplacées}} \times (kW / \text{tonne})_{\text{performance MF}} \times (\neq \text{heures})_{\text{sommet}} \times \varepsilon \quad (2)$$

où  $\varepsilon$  représente le facteur de forme de la charge. Ce facteur multiplicateur est nécessaire parce que la charge de refroidissement n'est pas constante.

Ce facteur est utilisé seulement durant la période de sommet (le moment quand la charge de refroidissement sera déplacée) et pour la charge de refroidissement maximale pour ce jour. Les facteurs typiques du facteur de forme de la charge sont dans la gamme de 60 à 90 % pour une variété de types de bâtiment et de climats. L'énergie annuelle déplacée est la somme d'énergie quotidienne déplacée.

En ce moment, une évaluation peut être faite en utilisant une charge de refroidissement moyenne pour chaque mois et le nombre de jours de refroidissement par mois, additionnant après les totaux mensuels.

#### 4. Conclusions

Les systèmes avec le stockage du froid décalent toute ou une partie de la demande d'électricité du sommet aux heures de la période de creuse, réduisant ainsi les coûts avec l'énergie de refroidissement. Par l'utilisation de ce système dans un bâtiment de bureaux, la demande d'énergie électrique pour refroidissement pendant le sommet peut être réduit jusqu'à 90 % comparés à un système de refroidissement conventionnel. Le stockage du froid est une technologie prometteuse qui a évolué beaucoup dans les derniers années, grâce aux fluides diphasiques qui ont des capacités de stockage d'énergie beaucoup plus élevées que les fluides monophasiques. Pour évaluer la faisabilité économique d'un tel système, les données de charge de refroidissement de la machine frigorifique existante sont nécessaires. Si les données ne sont pas disponibles, un modèle horaire de simulation numérique doit être développé par de personnel professionnel habilité.

#### REFERENCES

- [1]. \*\*\* [http://www.uppco.com/business/eba\\_28.asp](http://www.uppco.com/business/eba_28.asp)
- [2]. \*\*\* <http://www.iifiir.org/2encominformations.php>
- [3]. *Pacific Northwest National Laboratory*, Thermal Energy Storage for Space Cooling – Federal Energy Management Program DOE/EE-0241, U.S. Department of Energy, Dec. 2000
- [4]. *Pacific Gas and Electric Company*. Thermal Energy Storage Strategies for Commercial HVAC Systems, PG&E Energy Efficiency Information “Thermal Energy Storage”, May 1997
- [5]. *S. M. Hasnain, N. M. Alabbadi*. Need for thermal-storage air-conditioning in Saudi Arabia, *Applied Energy*, vol. 65, 2000, pp. 153-164
- [6]. *A. Saito*. Recent advances in research on cold thermal energy storage, *Int. Journal of Refrigeration*, vol. 25, 2002, pp. 177-189