

SÉRIE
DE LA GESTION
DE L'ÉNERGIE

19

À L'INTENTION
DES INDUSTRIES,
COMMERCES
ET INSTITUTIONS

Accumulation thermique

This document was produced
by scanning the original publication.

Ce document est le produit d'une
numérisation par balayage
de la publication originale.

TJ
163.4
.C2
A614
no.019
1987
C-2

Energy, Mines et
Resources Canada

Energy, Mines and
Resources Canada

Canada

PRÉFACE

L'art et la science de la gestion de l'énergie ont accompli des progrès remarquables au cours de la dernière décennie. La gestion de l'énergie est devenue une discipline sérieuse dans le cadre du processus de gestion de la plupart des entreprises qui connaissent le succès.

D'abord, au début des années 70, on a mis sur pied des programmes d'économie d'énergie afin de réduire la menace de pénurie d'énergie que pesait sur le Canada, de même que la dépendance du pays à l'endroit du pétrole étranger. Toutefois, la hausse vertigineuse des prix n'a pas tardé à donner une signification nouvelle à l'expression «économie d'énergie»: réduire le coût de l'énergie.

Nombre d'industries, de commerces et d'organismes publics ont relevé le défi et abaissé les coûts d'énergie jusque dans une proportion de 50%. On est ainsi arrivé à utiliser l'énergie de façon rationnelle, grâce à des mesures telles que des programmes d'information à l'intention du personnel, des moyens d'entretien plus à point, la simple élimination du gaspillage, et en mettant de l'avant des projets aptes à moderniser ou améliorer les installations et l'équipement.

Pour en arriver maintenant à économiser d'avantage l'énergie, il importe de mieux connaître la technologie et ses applications en plus d'avoir recours à des appareils à haut rendement énergétique.

A la demande du Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne, du Programme des groupes de travail sur la gestion de l'énergie dans les secteurs commercial et institutionnel, et d'associations professionnelles et commerciales intéressées, la Division de l'énergie industrielle du ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources a élaboré une série de modules techniques portant sur la gestion de l'énergie.

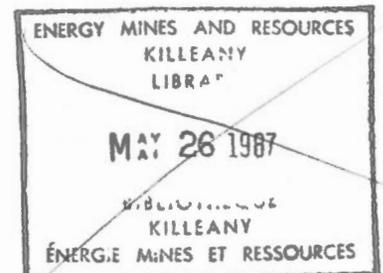
Ces manuels aideront les gestionnaires et le personnel d'exploitation à découvrir les possibilités de gestion de l'énergie dans leur cadre de travail. On y trouve une quantité de renseignements pratiques, notamment des équations mathématiques, des renseignements généraux sur des techniques éprouvées, ainsi que des exemples concrets d'économie d'énergie.

Pour obtenir de plus amples renseignements concernant les modules figurant dans la liste qui suit ou la documentation utilisée dans le cadre des ateliers, y compris les études de cas, veuillez écrire à l'adresse suivante:

La Division de la gestion de l'énergie dans les
entreprises et dans le secteur gouvernemental
Direction des économies d'énergie
Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources
580, rue Booth
Ottawa, Ontario
K1A 0E4

Gestion de l'énergie et participation des employés
Évaluation de la consommation
Analyse financière énergétique
Compatibilité de la gestion énergétique
Récupération de la chaleur perdue
Isolation thermique des équipements
Éclairage
Électricité
Moteurs électriques économiseurs d'énergie
Combustion
Appareillage de chaufferie
Fours, sécheurs et fours de cuisson
Systèmes à vapeur et à condensat

Chauffage et refroidissement énergétique
(Vapeur et eau)
Conditionnement de l'air
Refroidissement et pompes à chaleur
Réseaux de distribution d'eau et d'air comprimé
Ventilateurs et pompes
Compresseurs et turbines
Mesures et contrôles
Régulation automatique
Manutention des matériaux et transport sur place
Point de vue architectural
Accumulation thermique



TJ
163.4
C2
A614
NO.019
1987
C2

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1987

En vente au Canada par l'entremise des

Librairies associées
et autres libraires

ou par la poste auprès du

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnement et Services Canada
Ottawa (Canada) K1A 0S9

N° de catalogue M91-6/19F

au Canada: \$4.00

ISBN 0-662-93341-9

à l'étranger: \$4.80

Prix sujet à changement sans préavis

Tous droits réservés. On ne peut reproduire aucune partie du présent ouvrage, sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit (électronique, mécanique, photographique) ni en faire un enregistrement sur support magnétique ou autre pour fins de dépistage ou après diffusion, sans autorisation écrite préalable des Services d'édition, Centre d'édition du gouvernement du Canada, Ottawa, Canada K1A 0S9.



TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
Objectif	1
Contenu	1
NOTIONS DE BASE	3
Termes et définitions	3
Objectifs de l'accumulation thermique	4
Utilisation de l'énergie gaspillée ou excédentaire	5
Réduction de la prime de puissance	6
Différer l'achat d'équipements	6
Chaleur sensible et chaleur latente	8
Calculs de base	8
Calculs relatifs à l'accumulation de chaleur sensible	8
Calculs relatifs à l'accumulation thermique avec changement d'état	9
Autres facteurs	10
Consommation énergétique des systèmes de chauffage, de refroidissement et de pompes à chaleur	10
Limites du système de stockage d'énergie	10
Profils de charge thermique	11
Optimisation des systèmes classiques	11
Analyse énergétique	11
Résumé	12
APPAREILLAGE	13
Milieux thermiques	13
Accumulation de chaleur sensible	13
Milieux liquides	13
Mélange et perte de chaleur dans un milieu liquide	13
Milieu solide	17
Milieu thermique à changement de phase	18
Étangs et nappes aquifères	19
Systèmes de stockage d'énergie types	20
Accumulation de chaleur et de froid obtenue par refroidisseur	20
Accumulation de glace	21
Récupération de chaleur par accumulation thermique	23

Appareils de régulation	24
POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE	25
Avant d'étudier les possibilités d'accumulation thermique . . .	25
Possibilités de maintenance	25
Possibilités d'amélioration de coût modique	26
Exemples concrets d'amélioration de coût modique	26
1. Exploiter les possibilités d'accumulation thermique de la charpente du bâtiment.	26
2. Accumulation thermique provenant de l'équipement et des produits.	27
3. Accumulation thermique provenant de réseaux de tuyauteries.	27
4. Élever le point de consigne de température d'un réservoir.	29
Possibilités de rénovation	30
Exemples concrets de possibilités de rénovation	30
1. Systèmes à eau sous pression	30
2. Accumulation de l'eau usée	32
3. Réduction de la prime de puissance	32
4. Agrandissement d'un bâtiment	33

ANNEXES

A	Glossaire
B	Tables
C	Conversions courantes
D	Feuilles de travail

INTRODUCTION



On entend par accumulation thermique ou stockage d'énergie, la mise en réserve d'une quantité d'énergie de chauffage ou de refroidissement jusqu'au moment de son utilisation. La chaleur excédentaire générée dans un bâtiment pendant le jour peut, par exemple, être emmagasinée pour réchauffer ce dernier la nuit alors que la charge thermique est habituellement plus grande. Ce module examinera les facteurs qui favorisent le stockage d'énergie dans les bâtiments commerciaux, les installations industrielles et les immeubles de caractère public aidant ainsi les propriétaires d'immeubles et les opérateurs de systèmes dans l'analyse des possibilités de conserver de l'énergie et de réduire leurs coûts énergétiques.

Objectif

L'objectif du présent module se résume comme suit:

- Déterminer les principaux avantages de l'accumulation thermique.
- Examiner les sources potentielles d'énergie thermique peu coûteuses ainsi que les techniques et l'équipement utilisés pour mettre cette énergie en réserve.
- Exposer des méthodes de calcul permettant l'évaluation préliminaire des possibilités d'accumulation thermique.
- Fixer des paramètres généraux nécessaires au bon fonctionnement des systèmes de stockage d'énergie.
- Expliquer, à l'aide de feuilles de travail et d'exemples, les méthodes à suivre pour évaluer les possibilités d'accumulation thermique.

Contenu

Le présent module comprend les chapitres suivants:

- Le chapitre *Notions de base* décrit les principaux paramètres d'un système de stockage d'énergie, examine les possibilités de stocker de l'énergie et expose des équations de base pour aider l'utilisateur à dimensionner l'équipement.
- Le chapitre *Appareillage* étudie les composants de base utilisés dans les systèmes de stockage d'énergie et présente un certain nombre de systèmes types.
- Le chapitre *Possibilités de gestion de l'énergie* présente une série de possibilités pour les systèmes de stockage d'énergie. Un certain nombre d'exemples concrets combinés à des feuilles de travail sont étudiés pour aider l'utilisateur à évaluer les possibilités d'une installation.
- Les *Annexes* réunissent un glossaire, des tables de conversion, des tables et des feuilles de travail.



NOTIONS DE BASE



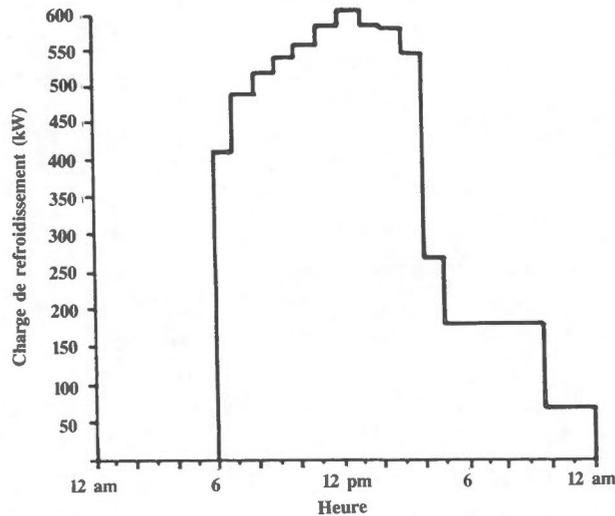
Le chauffe-eau domestique est sans doute l'exemple d'accumulation thermique le plus connu. L'eau froide du réservoir est chauffée lentement et maintenue à la température désirée jusqu'au moment de son utilisation. L'eau chaude est souvent prélevée plus rapidement qu'elle n'est produite, réduisant ainsi la réserve.

- L'eau du réservoir est appelée *milieu thermique*. C'est la substance qui, en fait, emmagasine ou contient l'énergie thermique ou calorifique. Le réservoir en soit n'accumule aucune énergie thermique, il ne fait qu'emmagasiner l'eau.
- Lorsque l'eau est chauffée et que la température s'élève dans le réservoir, le système de stockage d'énergie est *chargé*. Inversement, lorsque l'eau chaude est prélevée et remplacée par de l'eau froide, le système de stockage d'énergie est *déchargé*.
- On obtient de l'*énergie thermique (chaleur)* en convertissant une autre forme d'énergie, comme l'électricité, en chaleur. Le gaz naturel, le gaz propane, le mazout, le bois et le charbon peuvent tous être convertis en énergie thermique.
- La *charge thermique*, qui représente la quantité d'eau chaude exigée, est directement fonction des besoins de l'utilisateur, que l'eau soit chauffée lentement ou rapidement. En effet, même si les petits chauffe-eau réchauffent l'eau plus lentement que les gros, la quantité totale de chaleur utilisée est la même.
- Une fois le réservoir rempli, le maintien de la température de l'eau n'exige que très peu d'énergie: l'énergie ajoutée ne fait que compenser la déperdition de chaleur de l'enveloppe du réservoir.
- La *capacité thermique* du réservoir augmente en fonction des dimensions de l'appareil et de la température de l'eau chaude.

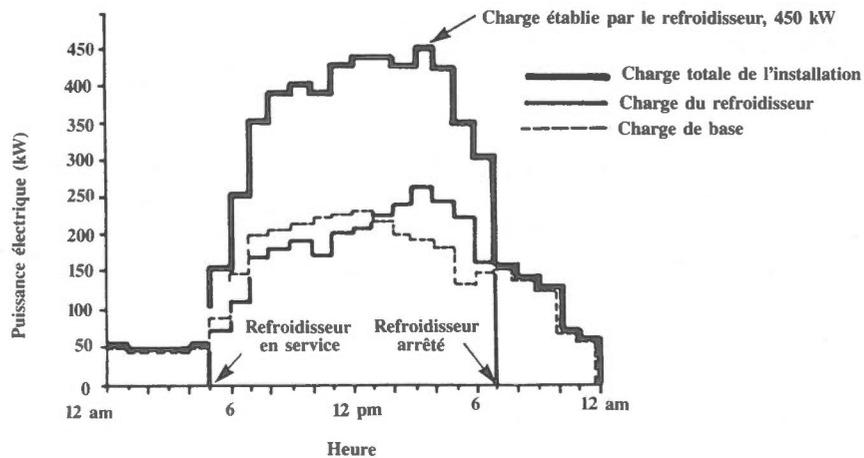
Avant d'examiner les caractéristiques des systèmes de stockage d'énergie et leurs applications, il est bon de connaître quelques termes et définitions.

Termes et définitions

- *Consommation électrique et prime de puissance* – Les compagnies d'électricité facturent habituellement l'électricité selon la *consommation* et la *puissance appelée*. La consommation est l'énergie électrique utilisée pendant une période déterminée et est facturée en dollars par kilowatt-heure (\$/kWh). La puissance appelée est le taux maximal d'énergie consommée pendant une courte période. Le tarif de la prime de puissance est calculé en dollars par kilowatt (\$/kW), en fonction du plus grand appel de puissance du mois. Par exemple, si la puissance maximale appelée pour un mois de facturation est de 150 kW et que le tarif est de 3\$ par kW, la prime de puissance pour le mois sera de 450\$. La prime de puissance est habituellement calculée chaque mois selon la demande maximale de ce mois et peut représenter la plus grande partie d'une facture d'électricité. Se référer au Module 3 intitulé «Électricité.»
- *Délestage* – Cette technique consiste à couper manuellement ou automatiquement, selon un ordre prioritaire, l'alimentation de certains équipements électriques, lorsque l'appel de puissance électrique atteint un seuil déterminé, pour diminuer les charges de pointe de l'installation. Pour de plus amples renseignements, se référer au Module 3 intitulé «Électricité.»
- *Profils de charge* – Diagramme ou graphique, sur lequel la charge est tracée en fonction du temps, très utile dans l'évaluation des possibilités d'accumulation thermique. La figure 1 montre un *profil de charge de refroidissement* type représentant les besoins en refroidissement à différents moments de la journée. D'autres courbes peuvent être tracées pour illustrer les besoins en chauffage, en électricité, en gaz ou autres combustibles en fonction du temps. Ces courbes peuvent représenter la charge d'un seul système ou appareil ou de plusieurs systèmes (les charges sont alors superposées). La figure 2 montre les charges électriques de base et les charges de refroidissement d'une installation: la somme des deux charges correspond au profil de la charge totale. Les profils varient selon le taux d'occupation, la commutation du système d'éclairage et d'autres appareils électriques et les conditions extérieures.



Profil de charge de refroidissement type
Figure 1



Profil de charge électrique, système classique
Figure 2

Objectifs de l'accumulation thermique

L'accumulation thermique a pour objectif principal l'économie d'argent. On peut réaliser ces économies de plusieurs façons.

- On peut réduire la «consommation» énergétique en stockant de l'énergie thermique gaspillée ou excédentaire pour son utilisation ultérieure. L'emmagasiner de l'énergie solaire «gratuite» captée le jour pour réchauffer l'installation la nuit en est un exemple.
- On peut réduire la puissance électrique appelée en accumulant de l'énergie thermique pendant les périodes creuses pour satisfaire la demande aux périodes de pointe. On peut donner comme exemple un refroidisseur électrique chargeant un système de stockage d'eau glacée la nuit, pour réduire la puissance maximale appelée qui survient habituellement le jour.
- On peut différer l'achat d'équipements de chauffage ou de refroidissement additionnels et réduire la dimension de l'équipement dans les nouvelles installations en chargeant un système de stockage d'énergie lorsque les charges thermiques sont faibles et en prélevant l'énergie accumulée pour pallier les pointes de charges dépassant la capacité thermique de l'équipement.

Utilisation de l'énergie gaspillée ou excédentaire

Lorsque de l'énergie thermique est rejetée, il est recommandé d'étudier les façons de récupérer cette énergie pour une utilisation immédiate ou future. La température du flux thermique perdu influence toutefois la possibilité de récupérer la chaleur. Par exemple, on peut utiliser l'eau tiède rejetée à l'égout pour préchauffer l'eau d'appoint d'un procédé, mais non pour chauffer une pièce.

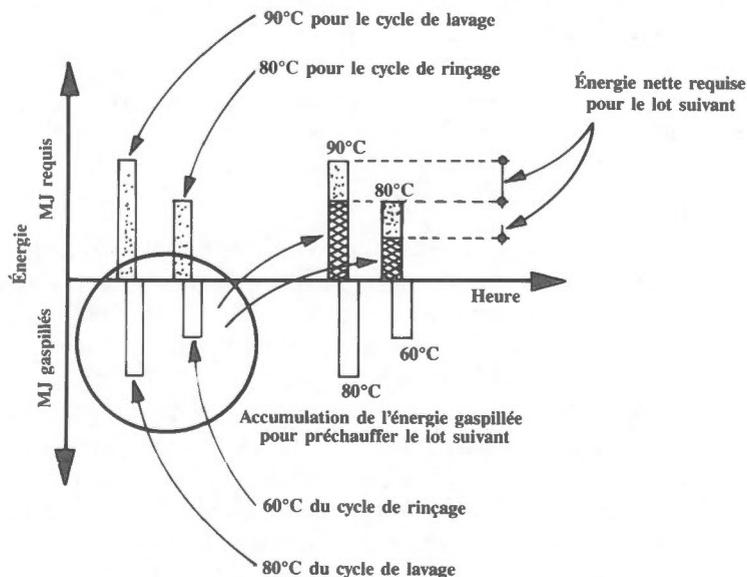
Il existe plusieurs sources d'approvisionnement en énergie.

- L'eau chaude ou froide évacuée à l'égout.
- Les gaz de combustion.
- Les gaz d'échappement.
- Les produits ou rebuts chauds (ou froids) ou usés.
- La chaleur captée par des panneaux solaires.
- L'énergie thermique provenant du sol.
- La surchauffe et chaleur de condensation rejetée par l'équipement de réfrigération. Se référer au Module 11 intitulé «Refroidissement et pompes à chaleur»; les condenseurs refroidis à l'eau offrent souvent d'excellentes possibilités de diminuer les coûts de chauffage.
- Le froid produit par l'évaporateur d'un système de pompe à chaleur. Lorsqu'une pompe à chaleur fonctionne en mode de chauffage, elle extrait de la chaleur au niveau de l'évaporateur. Le refroidissement qui en résulte peut être emmagasiné pour refroidir un procédé ou une installation.

On peut utiliser l'énergie gaspillée dans des procédés *continus* pour chauffer ou refroidir directement des produits ou des procédés. Dans les procédés *en lots*, il faut par contre, mettre l'énergie thermique gaspillée ou excédentaire en réserve jusqu'au moment de son utilisation. On peut également augmenter la quantité d'énergie à l'aide des pompes à chaleur.

Par exemple, l'eau chaude utilisée dans une usine de textiles pour les procédés de lavage et de rinçage est évacuée à l'égout après chaque cycle (figure 3). On peut réaliser des économies en installant un réservoir distinct pour le stockage de l'eau chaude usée des cycles de lavage et de rinçage jusqu'au moment de son utilisation directe ou pour préchauffer l'eau d'appoint du cycle suivant du procédé. Les coûts énergétiques sont ainsi réduits puisque l'installation consomme moins d'énergie pour chauffer l'eau de lavage et de rinçage. Ce principe s'applique à plusieurs systèmes de *récupération de chaleur*.

Les systèmes de chauffage solaire nécessitent une accumulation thermique pour emmagasiner de l'énergie solaire «gratuite», sous forme de chaleur jusqu'au moment de son utilisation.



Exemple d'un procédé par lots
Figure 3

Réduction de la prime de puissance

L'objectif principal de la plupart des systèmes de stockage d'énergie est de réduire la puissance maximale appelée et par conséquent, diminuer la prime de puissance électrique (frais). Pour y arriver, il faut couper ou limiter l'alimentation électrique de certains appareils de chauffage ou de refroidissement pendant les périodes de pointe d'une installation (délestage). Les appareils fonctionnent avant la période de pointe (par exemple la nuit) pour charger les systèmes de stockage d'énergie. Pendant la période de pointe, l'équipement de chauffage et de refroidissement est hors tension et la chaleur ou le froid en réserve satisfait la demande. Le fonctionnement d'autres équipements électriques devrait également être limité, même si on ne peut en accumuler l'énergie (ex. l'éclairage).

Si une installation possède un profil de charge électrique comprenant d'importantes pointes de charge, on devrait sérieusement examiner la possibilité de stocker de l'énergie. Des profils de charges électriques et thermiques devraient être tracés pour évaluer la possibilité de réduire la prime de puissance électrique. Dans la figure 2, la charge de pointe de l'installation est survenue lorsque la capacité du refroidisseur a atteint son maximum en fin d'après-midi. Si le refroidisseur pouvait fonctionner comme dans la figure 4, la puissance maximale appelée serait réduite de 125 kW. Les courbes de charge thermique du refroidisseur de la figure 5 démontrent l'avantage de stocker de l'énergie thermique pendant les heures creuses pour satisfaire la demande pendant les heures de travail. Les figures montrent également que le refroidisseur peut fonctionner pendant les heures de travail et réduire quand même les charges de pointe de l'ensemble de l'installation.

On peut couper l'alimentation électrique de l'équipement de chauffage ou de refroidissement ou installer un limiteur de puissance pour réduire la puissance appelée pendant les périodes de pointe. Plusieurs types d'équipements peuvent être mis sous et hors tension en fonction des systèmes de stockage d'énergie:

- Les systèmes de chauffage et de refroidissement du bâtiment.
- Les systèmes de chauffage d'eau potable.
- Les systèmes de chauffage et de refroidissement des procédés.
- Les systèmes de réfrigération.
- Les systèmes de fonte de la neige.
- Les systèmes de séchage.
- Les systèmes de production de glace.

Contrairement aux régions où le coût de l'électricité est élevé, les primes de puissance peu élevées et les taux de consommation fixes dans la plupart des régions du Canada n'encouragent pas le stockage d'énergie. Plusieurs fournisseurs d'énergie canadiens ont mis sur pied des projets pilotes pour étudier l'avantage d'une échelle de tarifs établie en fonction du moment de la journée. Selon ce système, le coût de la consommation, la prime de puissance ou les deux, varieraient selon l'heure de jour. L'électricité coûterait plus cher durant la *période de pointe du fournisseur* et moins cher la nuit ou les fins de semaine. La mise en application de ce système augmenterait sans aucun doute les possibilités d'accumulation thermique. En outre, il y aurait peut-être possibilité de négocier un taux inférieur avec la compagnie d'électricité pour utiliser l'énergie hors pointe.

Différer l'achat d'équipements

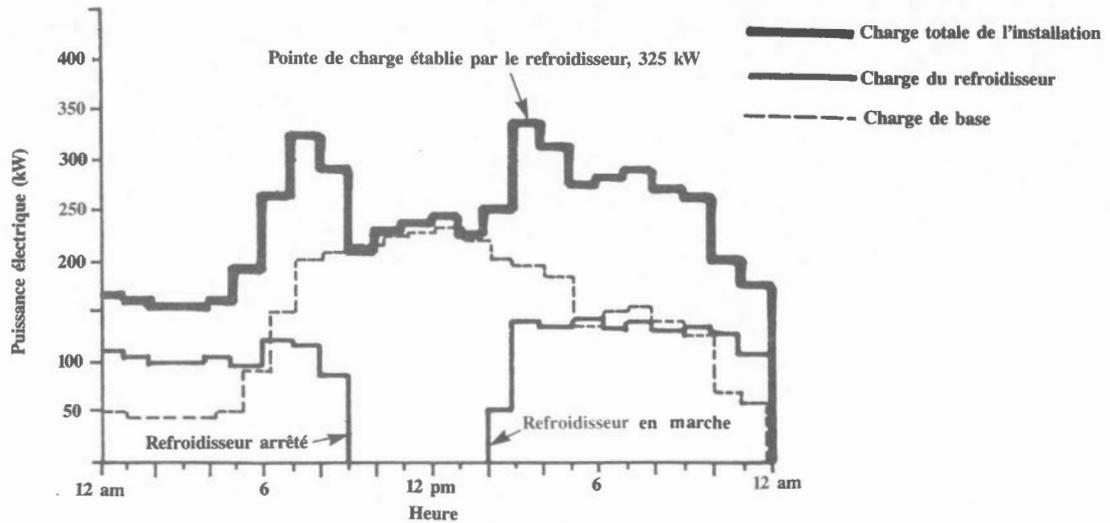
On choisit habituellement la capacité de l'équipement de chauffage et de refroidissement en fonction de la charge de conception alors que les besoins en chauffage ou en refroidissement approchent une valeur maximale. Comme il s'agit de charges de courte durée, la capacité de l'équipement est souvent surdimensionnée par rapport à la demande moyenne. L'énergie que représente la différence entre les charges thermiques moyenne et de pointe, combinée au stockage d'énergie possible, est suffisamment importante pour différer l'achat d'équipements en vue de moderniser une installation ou pour réduire la dimension de l'équipement d'une nouvelle installation.

Prenons par exemple un bâtiment dont les charges de refroidissement moyenne et de pointe sont de 500 et 650 kW respectivement. La capacité du refroidisseur existant est de 750 kW. L'agrandissement proposé des lieux élèverait la charge de refroidissement moyenne à 700 kW, et celle de pointe à 850 kW. L'équipement existant pourrait satisfaire la demande de la nouvelle charge moyenne mais non à celle de pointe. Selon l'approche classique, l'installation nécessiterait un nouveau refroidisseur d'une capacité de 100 kW.

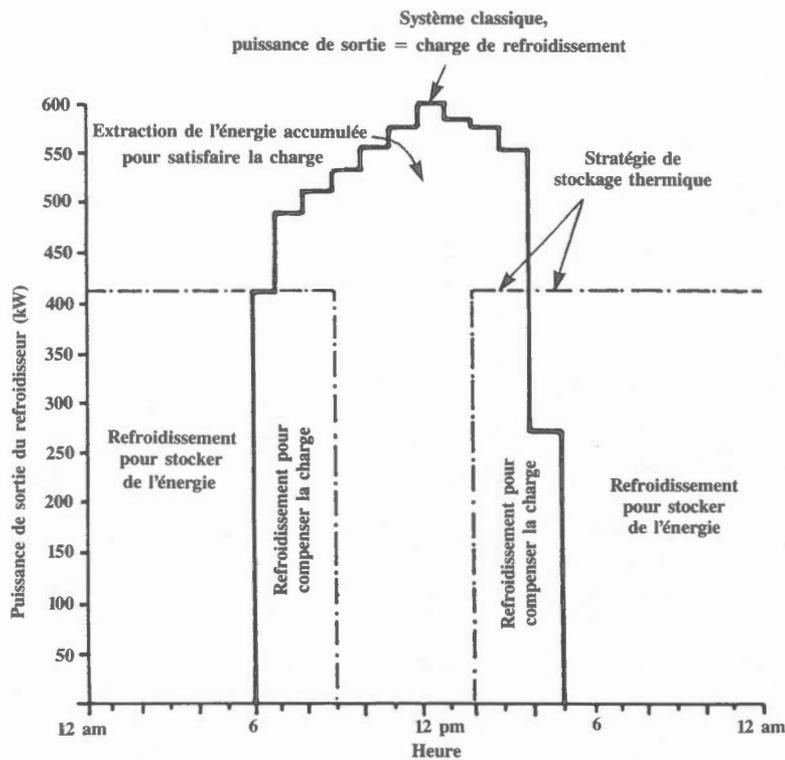
Au lieu d'acheter un nouveau refroidisseur, un système de stockage d'énergie pourrait satisfaire la demande de la charge de refroidissement de pointe. Pendant les heures creuses, alors que la charge thermique exige peu du refroidisseur existant, ce dernier fonctionnerait pour maintenir les conditions ambiantes ou de procédés et sa capacité excédentaire serait utilisée pour charger le système de stockage d'eau glacée. Lorsque le refroidisseur ne pourrait plus suffire à la demande de la charge de refroidissement, le système fournirait l'eau glacée accumulée.

Les avantages représentent des économies de mise de fonds et une réduction des coûts d'exploitation. En effet, ces derniers sont réduits parce que les charges de pointe sont limitées pour ne fournir que l'énergie nécessaire à 750 kW de refroidissement au lieu de 850, et parce qu'il y a moins d'équipement à entretenir. La consommation électrique annuelle de refroidissement augmenterait et serait proportionnelle aux nouvelles charges de refroidissement.

Cette technique est également appliquée dans les nouvelles installations où la capacité de l'équipement thermique est choisie selon les conditions moyennes au lieu des conditions de pointe.



Fonctionnement révisé du refroidisseur
Figure 4



Profil de charge thermique (puissance de sortie du refroidisseur)
Figure 5

Chaleur sensible et chaleur latente

Lorsque de l'énergie thermique est ajoutée à une substance ou en est extraite, il y a variation de température de la substance ou cette dernière change d'état.

Lorsque l'énergie thermique est associée à une variation de température, on parle de *chaleur sensible*. La quantité d'énergie est fonction de la variation de température, de la quantité de substance et de la *chaleur spécifique* de la substance exprimée en kJ/(kg.°C).

Lorsque l'énergie thermique est associée à un changement d'état (ou de phase) on parle de *chaleur latente*. Lorsque la substance passe de l'état gazeux à l'état liquide (vapeur à eau par exemple), il y a extraction de *chaleur latente de condensation*. La chaleur latente de condensation est généralement fonction des propriétés, de la température et de la pression de la substance. Lorsque la substance passe de l'état liquide à l'état solide (eau à glace par exemple), il y a extraction de *chaleur latente de fusion*. La chaleur de fusion dépend des propriétés et de la température de la substance et est, à toute fin pratique, indépendante de la pression. Les deux valeurs s'expriment en kJ/kg. Dans la plupart des systèmes de stockage d'énergie, l'énergie thermique est stockée sous forme de *chaleur sensible* ou de *chaleur latente de fusion*.

On accumule de la chaleur sensible en augmentant (ou en abaissant) la température du milieu thermique. Un thermos d'eau chaude est un exemple simple. L'eau chauffée à température élevée accumulera plus d'énergie thermique que si elle est chauffée à basse température.

Un bloc de glace est un exemple d'accumulation thermique basé sur un changement d'état. On extrait de la chaleur de l'eau jusqu'au point de congélation. Plus tard, à mesure que fond la glace, la chaleur est absorbée par celle-ci et on refroidit l'environnement.

Les systèmes d'accumulation thermique avec changement d'état sont plus compacts que les systèmes de stockage de chaleur sensible et accumulent généralement environ 10 fois plus d'énergie par unité de volume. Par exemple, la congélation d'un kilogramme d'eau stocke environ 334 kJ de froid sous forme de glace à 0°C. La fusion de la glace extrait les 334 kJ de l'environnement. Il faudrait refroidir environ 10 kg d'eau de 5°C pour accumuler la même quantité d'énergie thermique.

Calculs de base

Il faut effectuer certains calculs pour faire une première évaluation des possibilités de stockage thermique pour une installation.

Calculs relatifs à l'accumulation de chaleur sensible

La quantité de chaleur pouvant être accumulée dans un liquide ou un solide par élévation de température peut être calculée par l'équation suivante.

$$E = \frac{M \times cp \times DT}{1\ 000}$$

où, E = énergie thermique accumulée (MJ)

M = masse du milieu thermique (kg)

cp = chaleur spécifique à la température moyenne [(kJ/(kg.°C)]

DT = variation de température du milieu thermique (°C).

1 000 = conversion de kJ à MJ

On peut calculer le volume du milieu thermique nécessaire pour contenir une quantité donnée d'énergie thermique.

$$V = \frac{M}{d}$$

où, V = volume (m³)

d = masse volumique (kg/m³).

Le volume peut également s'exprimer par l'équation suivante:

$$V = \frac{E \times 1000}{d \times c_p \times DT}$$

On retrouve la liste des valeurs de la chaleur spécifique et de la masse volumique d'un certain nombre de substances courantes dans la table 1.

On peut également calculer le volume d'un milieu thermique pour une accumulation thermique donnée à l'aide des données de la table 2.

La méthode empirique est la meilleure façon de déterminer les possibilités d'accumulation thermique d'une installation. Règle générale, la quantité d'énergie pouvant être accumulée dans un espace industriel type dont la variation de température est de 3°C, est d'environ 0,370 MJ/m². Dans un espace de bureaux dont la variation de température est de 2°C, on peut accumuler environ 0,250 MJ/m².

On peut modifier l'équation $E = \frac{M \times c_p \times DT}{1000}$ pour le stockage de la chaleur sensible:

$$E = 0,370 \times A \text{ (espace industriel type) ou}$$

$$E = 0,250 \times A \text{ (espace de bureaux type)}$$

où, E = énergie thermique accumulée (MJ)

A = surface du bâtiment ou de plancher (m²)

Il faut noter que seule la couche superficielle d'une dalle de béton échange activement ou accumulera de la chaleur lors des cycles journaliers. Même des dalles épaisses ne peuvent stocker beaucoup de chaleur, à cause des cycles trop courts.

Calculs relatifs à l'accumulation thermique avec changement d'état.

Lorsqu'on examine les possibilités d'accumulation thermique avec changement d'état, le volume approximatif du milieu thermique s'obtient à partir de la table 2 ou par des calculs.

$$E = M \times (\text{chaleur latente de fusion})$$

où, E = énergie thermique accumulée (MJ)

M = masse du milieu thermique à phase changeante (kg).

Chaleur latente de fusion = quantité de chaleur requise pour la fusion ou la congélation de la substance (kJ/kg)

$$\text{où, } M = \frac{E \times 1000}{\text{Chaleur latente de fusion}}$$

Autres facteurs

La rentabilité d'un système de stockage d'énergie est fonction d'autres facteurs, soit:

- La consommation énergétique des systèmes de chauffage, de refroidissement et de pompes à chaleur.
- Les limites du système de stockage d'énergie.
- Les profils de charge thermique.
- L'optimisation des systèmes classiques.

Consommation énergétique des systèmes de chauffage, de refroidissement et de pompes à chaleur

L'électricité se convertit en énergie thermique par le biais de résistances électriques ou de dispositifs mécaniques. Dans les systèmes de chauffage par résistance, chaque kWh d'électricité est convertit en un kWh (3,60 MJ) de chaleur, et on obtient un rendement de conversion de 100%. Les plinthes de chauffage électrique, les chauffe-eau électriques et les systèmes de chauffage des dalles en sont des exemples types.

Lorsqu'on utilise des systèmes de refroidissement et (ou) des pompes à chaleur pour produire du chauffage et (ou) du refroidissement, le rendement de conversion ou le coefficient de performance (COP) est supérieur à 100%. Toutefois un rejet thermique est nécessaire pour obtenir ce résultat. (Se référer au Module 11 intitulé «Réfrigération et pompes à chaleur»). Le COP des systèmes types est d'environ 3,5 et chaque kWh d'alimentation électrique de l'équipement produit environ 3,5 kWh de chauffage ou de refroidissement. L'alimentation électrique d'un système de refroidissement générant du chauffage ou du refroidissement à un taux de 350 kW est de 100 kW, obtenue en divisant 350 par 3,5 (COP). Il s'agit d'un facteur important lorsqu'on étudie la possibilité d'installer un système de stockage d'énergie pour réduire la puissance appelée. Si le pouvoir calorifique du flux thermique perdu est élevé et qu'il y a une demande de chauffage ailleurs dans le bâtiment, des échangeurs de chaleur peuvent être installés pour transférer la chaleur et augmenter le COP du système, ce qui réalise des économies d'énergie.

Lorsqu'on envisage la conversion d'un système existant en un système de stockage d'énergie, il faut obtenir le COP réel de l'équipement auprès du fournisseur. Lorsqu'il est impossible d'obtenir cette information, on peut déterminer la consommation énergétique des systèmes de pompe à chaleur et de refroidissement en considérant un COP de 3,5. Les systèmes ayant un COP entre 10 et 20 existent mais ne sont pas courants.

La consommation énergétique par unité de capacité d'un système de *refroidissement* augmente en fonction de l'abaissement de la température du côté froid (évaporateur) et l'élévation de la température du côté chaud (condenseur). Ainsi, la production de glace à 0°C demande plus d'énergie que la production d'eau glacée à 4°C. Inversement, la production d'eau chaude à 50°C nécessite plus de puissance de refroidissement qu'à 35°C. On ne tient pas compte de ces effets dans le présent module, parce que l'écart est habituellement inférieur à 3% lorsque le COP approche 3,5.

Limites du système de stockage d'énergie

Il existe plusieurs types de systèmes de stockage d'énergie selon leur capacité d'accumuler de l'énergie pour quelques heures ou à long terme. Le stockage de l'énergie solaire pendant l'été pour le chauffage de l'installation en hiver est un exemple d'accumulation à long terme. Un certain nombre de restrictions pratiques limitent normalement le stockage à quelques heures ou à un maximum de quelques jours. Les principales restrictions sont le manque d'espace et la mise de fonds.

Prenons par exemple un bâtiment ou un procédé exigeant 1 000 kW de refroidissement fonctionnant à pleine capacité durant 900 heures. L'énergie de refroidissement annuelle minimale devant être emmagasinée est de $900 \times 1\,000 = 900\,000$ kWh. Si la glace est utilisée comme milieu thermique, il faut selon la table 2, environ 3 litres de glace (environ 3 kg) pour stocker 1 mégajoule de froid.

$$\text{Glace requise} = 3 \text{ L/MJ} \times 900\,000 \text{ kWh} \times 3,6 \text{ MJ/kWh}$$

$$= 9\,720\,000 \text{ litres}$$

$$\text{ou} = \frac{9,72 \times 10^6 \text{ L}}{1\,000 \text{ L/m}^3}$$

$$= 9\,720 \text{ m}^3$$

En supposant des «réservoirs parfaits» sans *perte de chaleur* ni «marge de sécurité», un réservoir de deux mètres de profondeur couvrirait une surface des dimensions d'un terrain de football. Un système de stockage d'eau représenterait une surface au moins 10 fois plus grande. Les coûts de ces systèmes sont inabornables. En raison des pertes d'énergie, de l'impossibilité d'utiliser toute l'énergie thermique accumulée et de la nécessité d'assurer une certaine marge de sécurité, le plus petit système peut être 25% plus grand que les volumes de la table 2.

Profils de charge thermique

Lorsque les charges thermiques varient, il y a possibilité d'accumulation thermique pour satisfaire une demande ultérieure.

Les profils de charge de plusieurs bâtiments et installations favorisent l'accumulation thermique. Les bâtiments administratifs dont la demande en refroidissement est faible la nuit et le matin et élevée en fin d'après-midi présentent les meilleures possibilités de stockage d'énergie. Les systèmes de conditionnement d'air de ces bâtiments sont souvent arrêtés la nuit. Les charges partielles diurnes combinées à l'arrêt des systèmes la nuit représentent 15 à 20 heures quotidiennement durant lesquelles un système de stockage d'eau glacée pourrait être chargé pour satisfaire la demande au moment des pointes.

Les hôtels, les hôpitaux et les usines fonctionnant 24 heures sur 24 ne présentent pas d'aussi bonnes possibilités d'accumulation thermique car leurs profils de charge sont plus linéaires. Il y a moins de temps pour charger le système entre les longues périodes de pointe de refroidissement. Toutefois, ces installations se prêtent bien aux systèmes d'accumulation thermique partiels et limiteurs de pointe. Par exemple, un refroidisseur peut satisfaire la demande de la charge thermique de base et les pointes peuvent être réduites en combinant le refroidisseur et un système de stockage d'énergie. Dans ce cas, le refroidisseur demanderait moins de puissance électrique. On peut maximiser l'investissement en choisissant l'équipement avec soin et en utilisant la chaleur du compresseur pour préchauffer l'eau chaude domestique ou de procédé.

Le climat affecte le profil de charge thermique d'un bâtiment et devient un facteur important lorsqu'il s'agit de déterminer la rentabilité du système de stockage d'énergie. Pour que le stockage du froid soit rentable, le profil d'été doit inclure un nombre limité de jours de pointe et, si possible, de grandes variations de température sur une période de 24 heures. Pour que le stockage de la chaleur soit rentable, on exige habituellement un minimum de 2 200 degrés-jour au-dessous de 18°C. La plupart des régions du Canada répondent à ces exigences.

Optimisation des systèmes classiques

Les systèmes de chauffage et de refroidissement existants devraient être modernisés et bien entretenus pour réduire les inefficacités avant de considérer l'installation d'un système de stockage d'énergie. Lorsqu'on examine un système classique, il faut étudier la possibilité de récupérer l'énergie rejetée ou gaspillée, par exemple l'énergie contenue dans les gaz de combustion d'une chaudière.

On pourrait aussi envisager la possibilité de convertir les procédés par lots en procédés continus pour utiliser directement la chaleur récupérée sans stockage intermédiaire. On obtient alors une plus grande récupération de chaleur sans perte de chaleur de réserve tout en économisant sur la mise de fonds.

Analyse énergétique

Il existe un certain nombre de Possibilités de gestion de l'énergie utilisant les concepts de l'accumulation thermique dans les installations industrielles, les bâtiments commerciaux et les immeubles de caractère public. Plusieurs de ces possibilités peuvent être identifiées lors d'une *analyse au passage* de l'installation. Il est souvent plus avantageux d'affecter à cette tâche une personne de l'extérieur spécialiste en gestion de l'énergie. Toutefois, ce type d'analyse identifierait probablement des possibilités reliées à l'état et au fonctionnement du système de chauffage et de refroidissement existant. Il faut effectuer une analyse détaillée pour déterminer s'il y a possibilité d'installer un système de stockage d'énergie.

Les questions suivantes peuvent être analysées pour évaluer la viabilité d'un tel système.

- Quelle est la puissance appelée et les frais de consommation électrique de l'installation?
- Le profil de puissance demandée comporte-t-il des pointes?
- La prime de puissance constitue-t-elle la majeure partie de la facture d'électricité?
- L'équipement de chauffage ou de refroidissement électrique fonctionne-t-il pendant la période de pointe? Peut-il être arrêté?
- Gaspille-t-on de l'énergie thermique?
- Certains procédés ou produits demandent-ils du refroidissement alors que d'autres demandent du chauffage à des moments différents?

On accumule ces données pour effectuer une *analyse de diagnostic* et déterminer, à l'aide de calculs, les conditions d'exploitation existantes, les possibilités de réduction énergétique et les économies d'argent. Après avoir déterminé l'investissement, on peut effectuer des calculs pour déterminer la rentabilité du projet.

Les possibilités de gestion de l'énergie se divisent en trois catégories.

- *Les possibilités de maintenance* sont des initiatives de gestion de l'énergie exécutées *de façon périodique, au moins une fois par année*. La réparation des fuites et les programmes d'entretien préventif pour éviter la détérioration des systèmes existants en sont des exemples.
- *Les possibilités d'amélioration de coût modique* sont des initiatives de gestion de l'énergie *réalisées en une seule fois et dont le coût n'est pas élevé*. La révision des programmes de fonctionnement, l'utilisation de réservoirs de stockage existants pour stocker l'énergie, la modification des appareils de commandes pour permettre un préchauffage ou un prérefroidissement suivi d'un délestage, et l'installation de réservoirs pour récupérer l'eau chaude usée en sont des exemples.
- *Les possibilités de rénovation* sont des initiatives de gestion de l'énergie *réalisées en une seule fois et dont le coût est important*. L'installation de systèmes de fabrication de glace et de trémies accumulant l'énergie de refroidissement ou de systèmes de stockage d'eau chaude/glacée combinés à un refroidisseur à récupération de chaleur en sont des exemples.

Il faut noter que les différences entre les Possibilités de coût modique et de rénovation sont habituellement fonction de l'importance, du type et de la politique financière de l'entreprise.

Résumé

On peut réaliser de grandes économies d'énergie et d'argent en tirant avantage du stockage d'énergie thermique lorsque les techniques suivantes peuvent être appliquées.

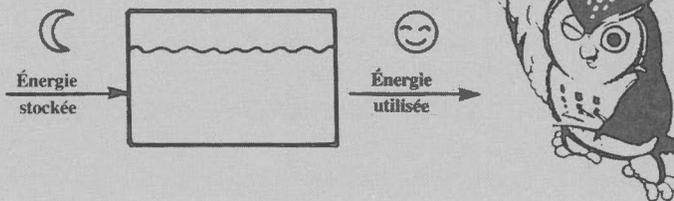
- *Utiliser la chaleur excédentaire ou l'énergie gaspillée* en accumulant l'énergie thermique qui n'a pas d'utilisation immédiate. Plus tard, lorsqu'il y a une demande en chauffage ou en refroidissement, prélever l'énergie accumulée pour réduire la consommation énergétique de l'installation.
- *Réduire la prime de puissance électrique* en faisant fonctionner certains équipements électriques pendant les périodes creuses pour charger un système de stockage d'énergie. Cette énergie thermique accumulée est alors utilisée pendant les périodes de pointe pour réduire les charges de pointe.
- *Éviter l'achat d'équipements de chauffage ou de refroidissement* en puisant l'énergie de chauffage ou de refroidissement supplémentaire de la réserve d'énergie accumulée pour satisfaire les charges de pointe de l'installation ou du procédé. Faire fonctionner le système de chauffage ou de refroidissement existant pour charger le système de stockage d'énergie pendant les périodes creuses.

Plusieurs paramètres influencent la viabilité d'un projet d'accumulation thermique:

- Les charges thermiques de l'installation.
- Les profils de charges électriques et thermiques.
- La disponibilité de l'énergie thermique perdue ou excédentaire.
- La facture d'électricité et la prime de puissance.
- Le type d'équipement générateur d'énergie thermique.
- Le type et le taux d'occupation de l'installation.

Lorsqu'on envisage l'installation d'un système de stockage d'énergie plus complexe, tel que détaillé plus loin dans le module, les possibilités de stockage d'énergie doivent être évaluées par un spécialiste.

APPAREILLAGE



Les composants les plus communs des systèmes de stockage d'énergie (pompes, tuyauterie, vannes de réglage, refroidisseurs) sont traités dans d'autres modules de la série. Seuls les milieux thermiques, les réservoirs et l'équipement solidaire de ces systèmes, ainsi que quelques systèmes caractéristiques des grandes installations d'accumulation thermique sont brièvement décrits dans le présent module.

Milieux thermiques

Le principe de base des milieux d'accumulation de chaleur sensible et de chaleur latente de fusion a été exposé dans les Notions de base. Les tables 1 et 2 donnent la liste des principales caractéristiques des matériaux de construction et des milieux thermiques les plus courants.

Le milieu thermique doit être choisi en fonction d'un certain nombre de facteurs.

- *Volume* – Quel est l'espace disponible pour stocker l'énergie?
- *Température* – À quelle échelle de température de service doit fonctionner le système? Sera-t-il utilisé pour le chauffage, le refroidissement ou les deux?
- *Durée de vie* – L'usage répétitif et la contamination peuvent-ils réduire l'efficacité du milieu thermique?
- *Perte d'énergie* – Peut-il y avoir perte d'énergie accumulée à cause des propriétés du milieu thermique?

L'eau, qui peut être utilisée autant pour le chauffage que pour le refroidissement, est le milieu d'accumulation de chaleur sensible le plus pratique en raison de son coût peu élevé, de sa grande capacité de stockage thermique, de sa non toxicité, de sa longue durée de vie et de sa facilité de manutention.

Lorsque l'eau est utilisée comme milieu à changement d'état, elle est idéale pour les mêmes raisons. Les systèmes de fabrication de glace accumulent principalement la chaleur latente; en effet, l'accumulation de la chaleur sensible durant les phases solides et liquides ne comptent que pour une fraction de la capacité totale.

Il existe d'autres substances à changement d'état mais la toxicité, le coût, la capacité de stockage et les pertes d'énergie du milieu thermique doivent être examinés attentivement au préalable. Par exemple, le sel de Glauber se détériore avec l'âge et perd sa capacité de stocker de l'énergie.

Les milieux thermiques solides accumulant de la chaleur sensible sont très courants. L'utilisation de la masse thermique d'un bâtiment ou d'un produit pour le préchauffage ou le prérefroidissement de ces derniers en est un exemple. La chaleur sensible est stockée pour une courte durée afin d'arrêter l'équipement électrique et de réduire la puissance appelée. L'utilisation de la dalle de plancher d'une serre ou d'un solarium pour accumuler la chaleur solaire le jour et la distribuer le soir en est un autre exemple.

Accumulation de chaleur sensible

Les milieux thermiques liquides et solides peuvent être utilisés dans les systèmes d'accumulation de chaleur sensible.

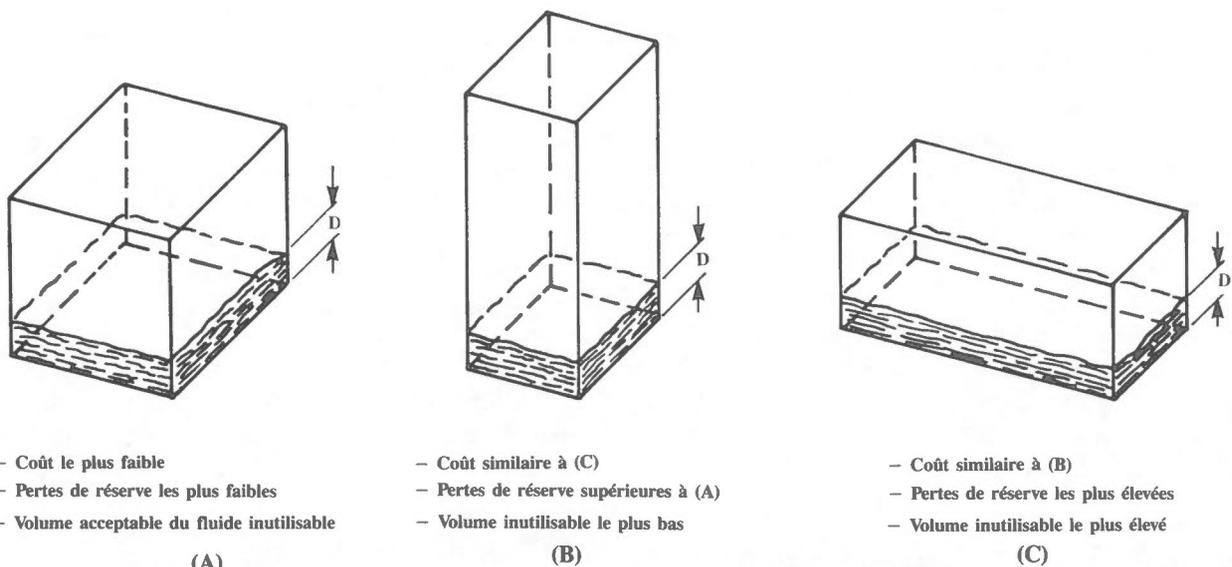
Milieux liquides

Un liquide servant à l'accumulation de la chaleur sensible doit être emmagasiné dans des réservoirs. Plusieurs modèles de réservoirs sont offerts sur le marché et les réservoirs classiques peuvent être utilisés s'ils sont bien entretenus. Les matériaux les plus courants sont l'acier, le béton et le fibre de verre.

Le choix d'un réservoir est fonction de plusieurs facteurs.

- *Emplacement et dimensions* – Est-ce que le réservoir doit être installé sur le sol, enfoui dans un sous-sol, un garage de stationnement ou à l'étage supérieur d'un bâtiment? Les dimensions et les spécifications de pompage sont des facteurs prépondérants à la prise de décision.
- *Nouvelle installation ou installation existante* – Si les réservoirs doivent être installés dans des installations existantes, peuvent-ils être préfabriqués ou doivent-ils être montés sur les lieux?

- *Dilatation thermique* – Il faut prévoir de l'espace pour la dilatation et la contraction du milieu thermique et du réservoir en fonction de la gamme de température de service.
- *Raccords de tuyauterie* – Si un grand nombre de raccords doivent être submergés, leur installation sera-t-elle difficile à effectuer et leur étanchéité difficile à assurer?
- *Corrosion* – S'ils ne sont pas bien entretenus, à la longue, les réservoirs en acier ou en d'autres métaux se corrodent ou se détériorent. Les garnitures, les revêtements, le traitement chimique et tout autre moyen de protection contre la corrosion doivent faire l'objet d'un examen attentif.
- *Agents d'étanchéité* – Certains matériaux comme le béton sont poreux et nécessitent de bons agents d'étanchéité. Les propriétés des garnitures et des revêtements doivent être compatibles avec celles des autres matériaux du système.
- *Température de service* – Certains matériaux de fabrication des garnitures, les agents d'étanchéité et d'autres composants ne tolèrent pas certaines températures quoique la plupart des matériaux se prêtent bien aux applications à l'eau refroidie et chauffée, d'autres doivent être choisis pour leur résistance à la chaleur et au froid extrêmes.
- *Forme du réservoir* – La forme du réservoir influence les coûts et le rendement des systèmes de stockage d'énergie. Les réservoirs «cubiques» sont en général moins chers que les réservoirs «rectangulaires», par contre les réservoirs rectangulaires de type «vertical» peuvent être plus efficaces (figure 6). Les réservoirs standard sont toujours moins chers que ceux fabriqués sur mesure.
- *Réservoirs usagés* – Il est possible d'acheter des réservoirs usagés ou d'utiliser des réservoirs disponibles sur place. Les réservoirs doivent être nettoyés pour éviter toute contamination du milieu thermique.

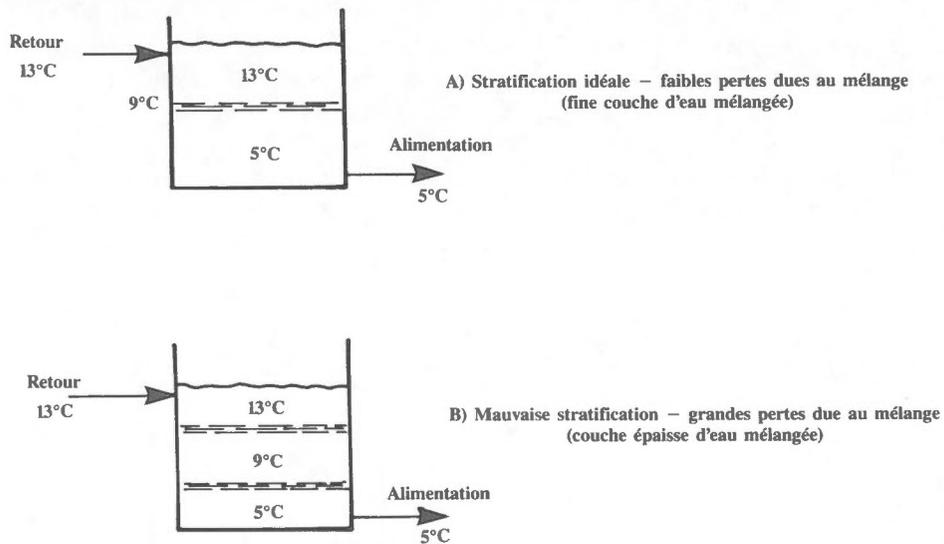


NOTE: La profondeur inutilisable (D) est identique dans tous les réservoirs.

Formes de réservoir
Figure 6

Mélange et perte de chaleur dans un milieu liquide

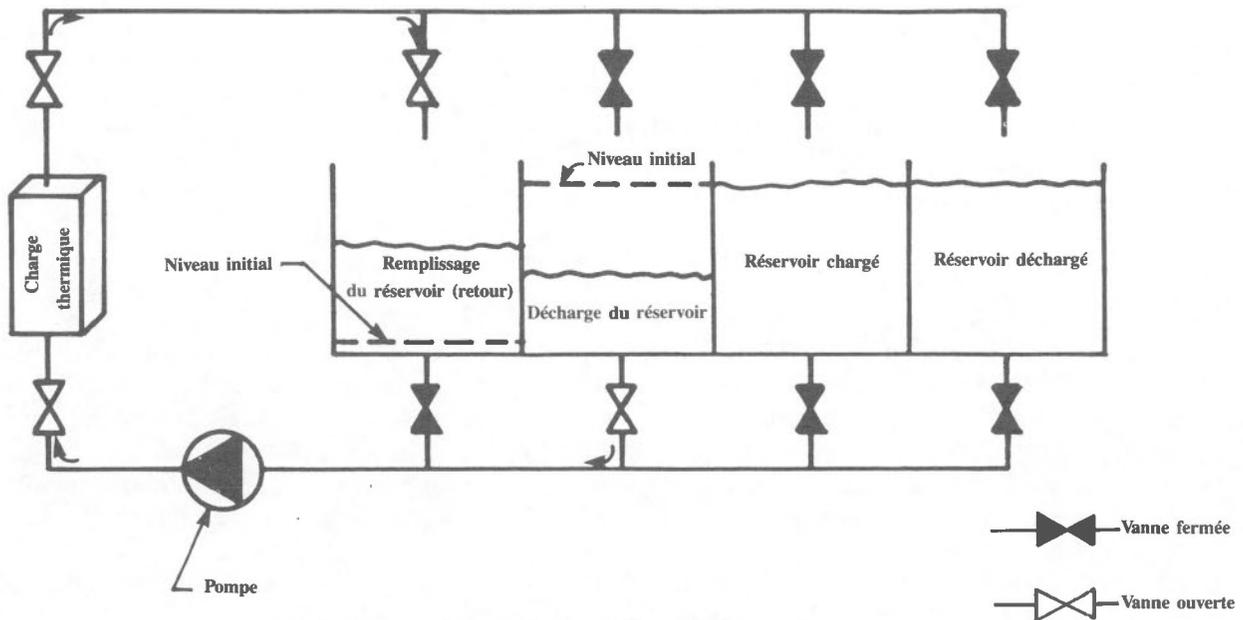
On peut augmenter la capacité d'accumulation thermique d'un réservoir en installant des dispositifs qui empêchent le débit de retour de se mélanger avec le fluide dans le réservoir. S'il y a mélange, la température du milieu thermique peut ne pas être appropriée pour l'application. Prenons par exemple un réservoir d'eau glacée rempli en parties égales d'eau d'alimentation de 5°C et d'eau de retour de 13°C provenant du système de refroidissement (figure 7). Si ces deux sources d'eau se mélangeaient, l'eau à 9°C qui en résulterait serait probablement trop chaude pour le conditionnement de l'air.



Stratification dans les réservoirs de stockage d'énergie
Figure 7

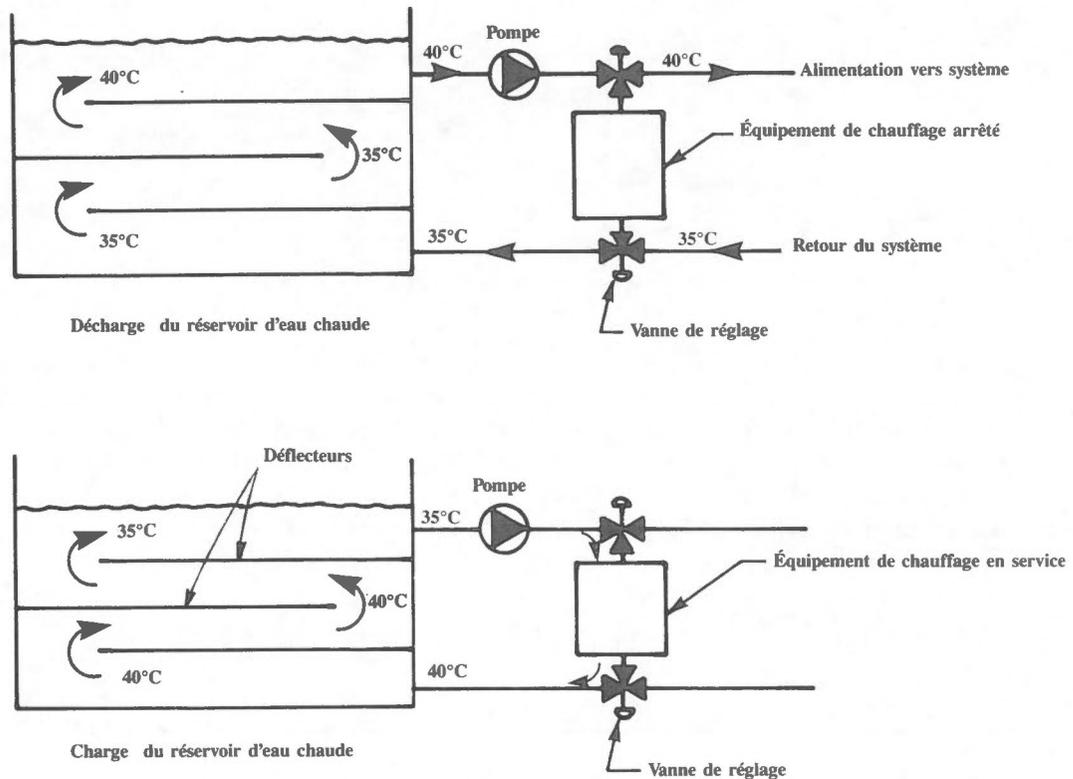
Il existe une variété de techniques qui empêchent les mélanges.

Des *réservoirs multiples* sont utilisés pour séparer l'eau d'alimentation de l'eau de retour (figure 8). Lorsque l'eau est pompée et distribuée, elle est retournée à un réservoir vide pour éviter tout mélange. Quoique cette méthode soit simple et fiable, il y a encore des pertes parce qu'une certaine quantité d'eau doit demeurer dans le fond de chaque réservoir pour assurer la submersion de l'entrée de la pompe. On peut réduire ce volume d'eau en utilisant des réservoirs plus hauts et plus étroits ou en installant un drain au fond de chaque réservoir. Le volume total à l'intérieur des réservoirs doit être augmenté pour tenir compte d'un réservoir vide.



Système à réservoirs multiples
(déchargement de l'énergie accumulée)
Figure 8

Des *défecteurs* installés dans un réservoir dirigent le débit d'eau à travers un système de canalisations (figure 9). Puisque les déflecteurs transforment le réservoir en un long tuyau, les interfaces entre l'eau de retour et l'eau d'alimentation sont réduites au minimum. Cette figure montre également comment un réservoir d'eau chaude muni de déflecteurs est chargé et déchargé. Lorsqu'il est déchargé, l'eau à 35°C est introduite dans le fond du réservoir et déplace l'eau à 40°C pompée dans le système. Lorsqu'il est rechargé, l'eau à 35°C, provenant de la partie supérieure du réservoir, traverse un dispositif de chauffage pour augmenter la température de l'eau à 40°C avant de retourner au réservoir. Cette opération se poursuit jusqu'à ce que le réservoir soit complètement rempli d'eau chauffée à 40°C.



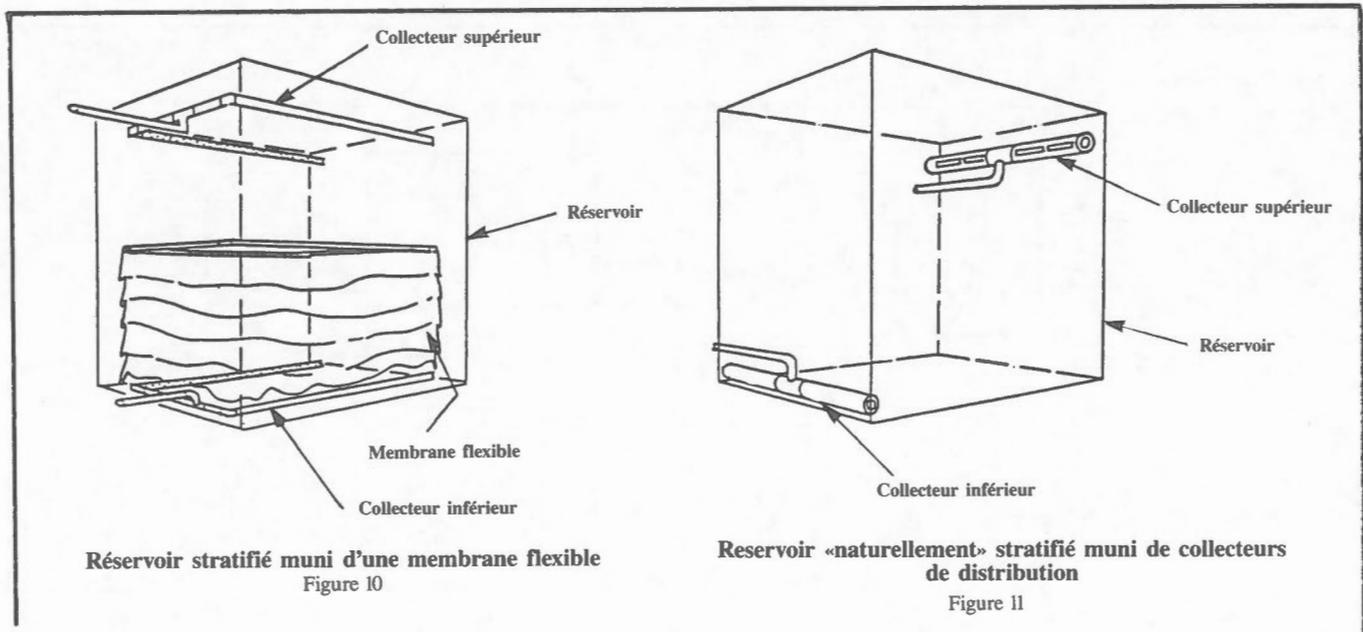
Réservoir muni de déflecteurs qui séparent les débits de retour et d'alimentation

Figure 9

Une *membrane flexible* installée dans le réservoir sépare l'eau d'alimentation de l'eau de retour. La membrane se déplace de haut en bas à mesure que change le niveau d'eau de retour (figure 10). La membrane perd une très faible quantité de chaleur et toute possibilité de mélange est éliminée. Il faut toutefois éviter que la membrane ne soit aspirée par la pompe, et par conséquent soit endommagée, ou qu'elle endommage la pompe. Pour éviter cette situation, une petite quantité d'eau doit demeurer au fond du réservoir, ce qui gaspille une partie de l'énergie accumulée.

Des *collecteurs d'admission et de sortie uniformes* (figure 11) placés près du fond et dans la partie supérieure du réservoir assurent une stratification à l'intérieur même du milieu thermique. Une telle stratification est plus efficace lorsque l'eau est chaude plutôt que glacée à cause de la plus grande différence de température entre l'eau d'alimentation et l'eau de retour.

Les pertes ou les gains de chaleur diminuent la quantité d'énergie accumulée. La perte de chaleur du réservoir est fonction de la différence de température entre le contenu du réservoir et la température ambiante, du coefficient d'isolation des parois du réservoir et du temps. Les réservoirs en acier et en fibre de verre doivent être isolés pour contrôler les pertes de chaleur. Comme le coefficient de transmission de chaleur des réservoirs en béton est plus faible, il est possible que ceux-ci ne requièrent aucune isolation. Chaque cas doit faire l'objet d'une analyse pour déterminer l'épaisseur d'isolant la plus économique. Se référer au Module 1 intitulé «Isolation thermique des équipements».

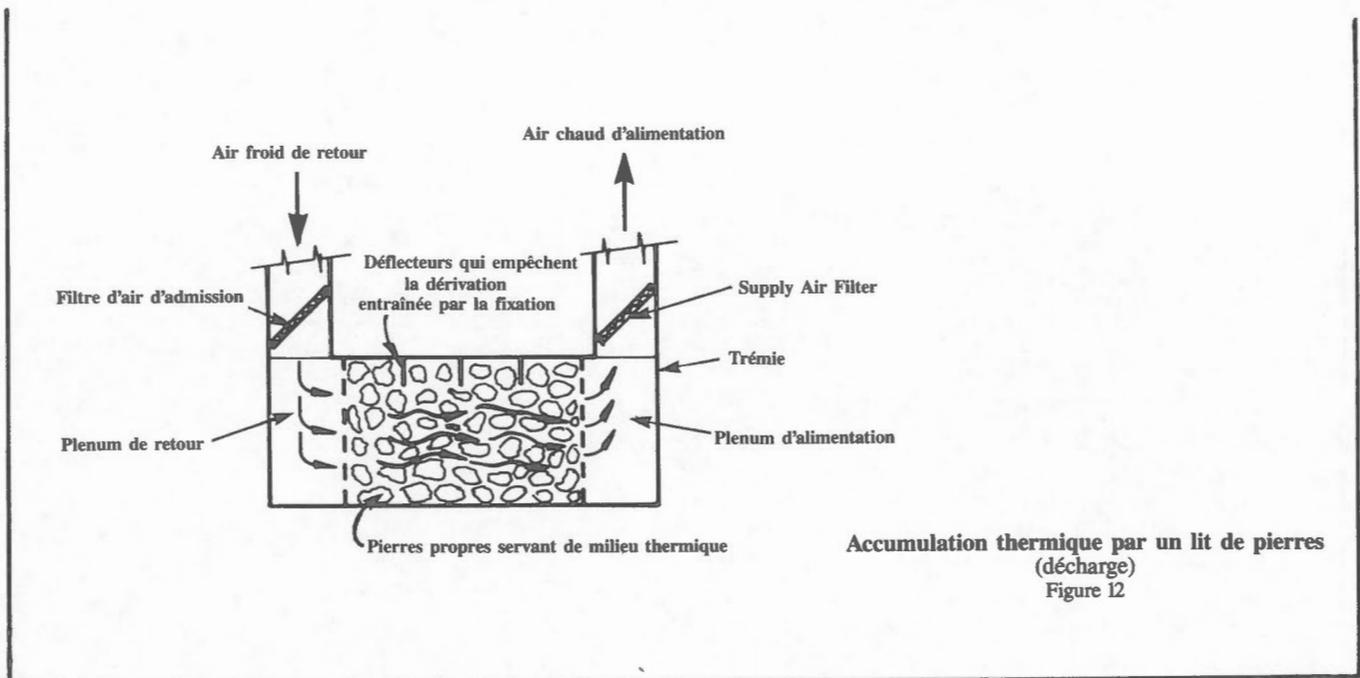


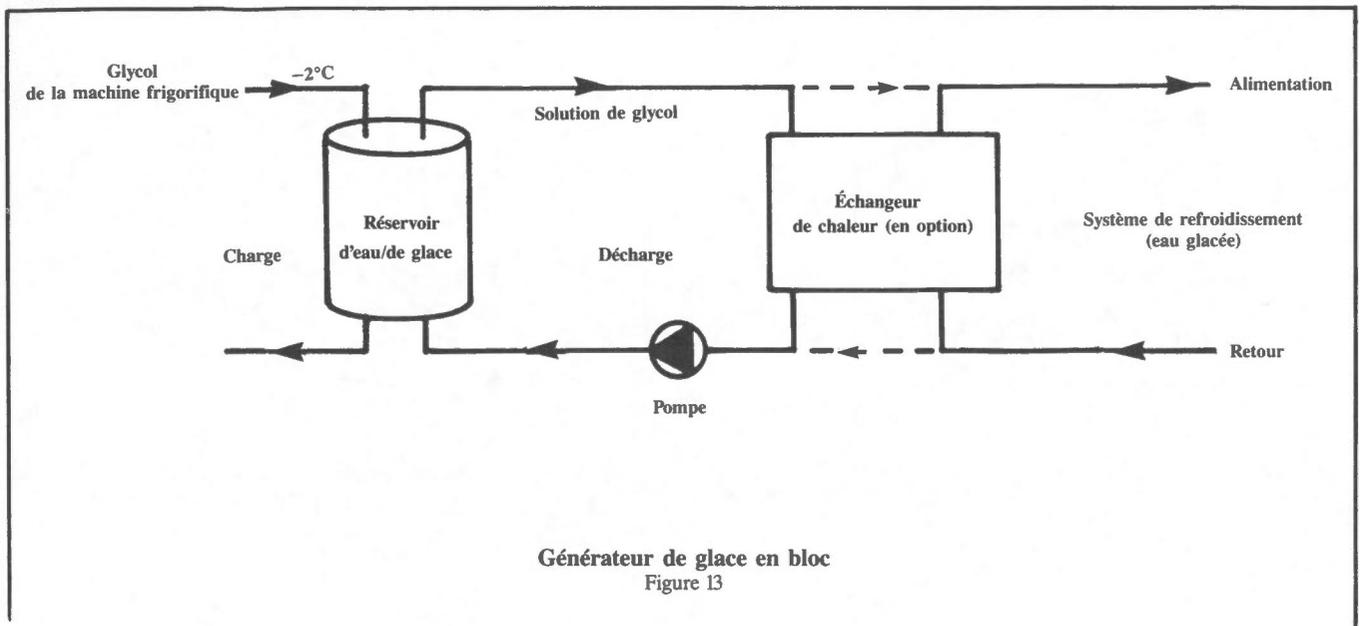
Milieu solide

Les lits de pierres et la charpente d'un bâtiment sont des exemples de milieux thermiques solides.

Les lits de pierres consistent en de grands contenants de gravier propre à travers lesquels circule un fluide caloporteur, comme l'air chaud d'un système de chauffage solaire. L'air de retour plus froid du bâtiment circule alors à travers le lit pour extraire l'énergie thermique du milieu et chauffer l'environnement (figure 12).

La charpente d'un bâtiment accumule efficacement de l'énergie thermique. En effet, lorsqu'un espace est préchauffé ou prérefroidi, de l'énergie thermique est «absorbée» dans les planchers, les murs, le plafond et les autres éléments de construction. Lorsque l'équipement est arrêté pendant une pointe de charge électrique ou si l'équipement ne suffit pas à la demande, cette énergie accumulée est retournée à l'espace. On permet à la température du bâtiment de varier pendant la charge et la décharge pour économiser l'énergie. Cette «variation de température» est limitée à 2°C dans un bureau ou un environnement commercial et à environ 3°C dans une usine, pour réduire les risques de plaintes par les occupants. Lorsqu'on préchauffe ou prérefroidit un bâtiment, on peut réduire les exigences, par conséquent la capacité thermique de l'équipement et la demande électrique. Cette technique est très courante dans les cinémas où les pointes de charge sont habituellement de courte durée.



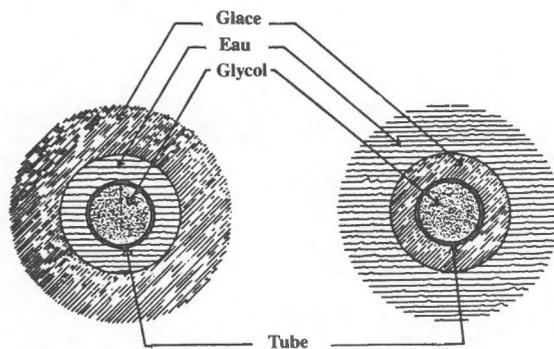


Milieu thermique à changement de phase

Dans la plupart des systèmes d'accumulation thermique avec changement de phase ou d'état, on utilise l'eau comme milieu thermique. Ces systèmes se divisent en deux catégories.

- *Générateurs de glace solide* – Du glycol à -2°C provenant d'une machine frigorifique (figure 13) circule dans les serpentins d'un réservoir d'eau. De la glace solide s'accumule autour des serpentins (figure 14). Une deuxième boucle de glycol transfère le glycol de basse température à un échangeur de chaleur (en option) où l'eau glacée est réfrigérée. Dans certains systèmes, il n'y a pas de boucle de glycol intermédiaire et l'eau provient directement du réservoir de glace.
- *Générateurs de glace en flocons* – De minces feuilles de glace brisées sont emmagasinées dans une trémie (figure 15), extraites par une auge et déposées dans une plus petite trémie munie d'un serpentin intégré au générateur d'eau glacée. L'eau est refroidie en circulant à travers le serpentin.

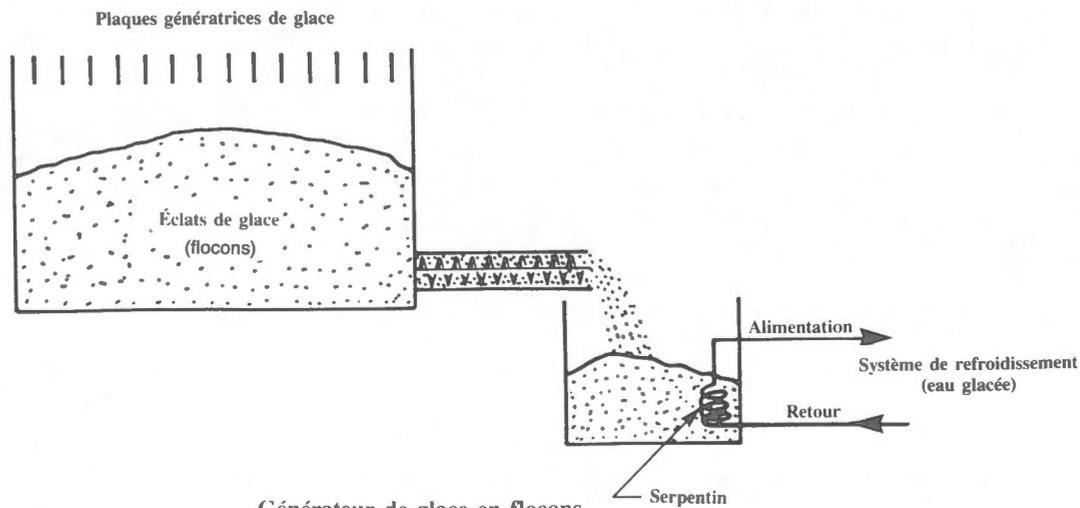
Les générateurs de glace sont très en demande pour les projets de rénovation où l'espace est restreint. Ces systèmes peuvent accumuler environ 10 fois plus d'énergie de refroidissement par unité de volume que l'eau glacée.



Vue transversale des serpentins générateurs de glace dans un système d'accumulation de glace
Figure 14

Décharge – La température du glycol d'admission est supérieure à celle du glycol de sortie.
(Fusion de glace)

Charge – La température du glycol d'admission est inférieure à celle du glycol de sortie.
(Production de glace)



Générateur de glace en flocons

Figure 15

Il faut tenir compte des facteurs suivants lors de la conception d'un système d'accumulation de glace.

- *Pertes d'énergie du milieu thermique en réserve* – Les pertes des réserves des systèmes d'accumulation thermique avec changement de phase sont supérieures à celles des systèmes d'accumulation de chaleur sensible en raison de la plus grande différence de température entre le milieu thermique et les conditions ambiantes. Il faut bien installer les pare-vapeur et l'isolant pour éviter tout dommage entraîné par la condensation.
- *Dilatation thermique* – Il faut prévoir de l'espace pour la dilatation et la contraction du milieu thermique et des raccords de l'équipement au réservoir pour empêcher tout dommage à l'équipement et toute fuite.
- *Agitateurs* – On obtient des taux d'échange de chaleur plus élevés et une glace de plus haute densité lorsque la solution entourant les serpentins est légèrement agitée. Un «barboteur» est le plus souvent utilisé pour agiter la solution.
- *Alimentation électrique des systèmes frigorifiques* – Comme les systèmes frigorifiques mécaniques sont moins efficaces dans la production de la glace que dans celle de l'eau glacée, ils consomment une plus grande quantité d'énergie. On obtient toutefois une plus grande charge de refroidissement par unité de volume.

Étangs et nappes aquifères

Des installations déjà existantes peuvent accumuler de l'énergie de refroidissement par le biais d'un petit étang creusé sur les lieux. Dans certains cas, l'étang peut faire partie de l'aménagement paysager. On obtient le refroidissement par évaporation à la surface et on peut même en augmenter le taux en ajoutant un jet d'eau ou une fontaine. Les étangs peuvent être utilisés comme des systèmes de stockage d'énergie extérieurs ou pour rejeter la chaleur excédentaire du système frigorifique ou de l'équipement des procédés (dissipateur thermique).

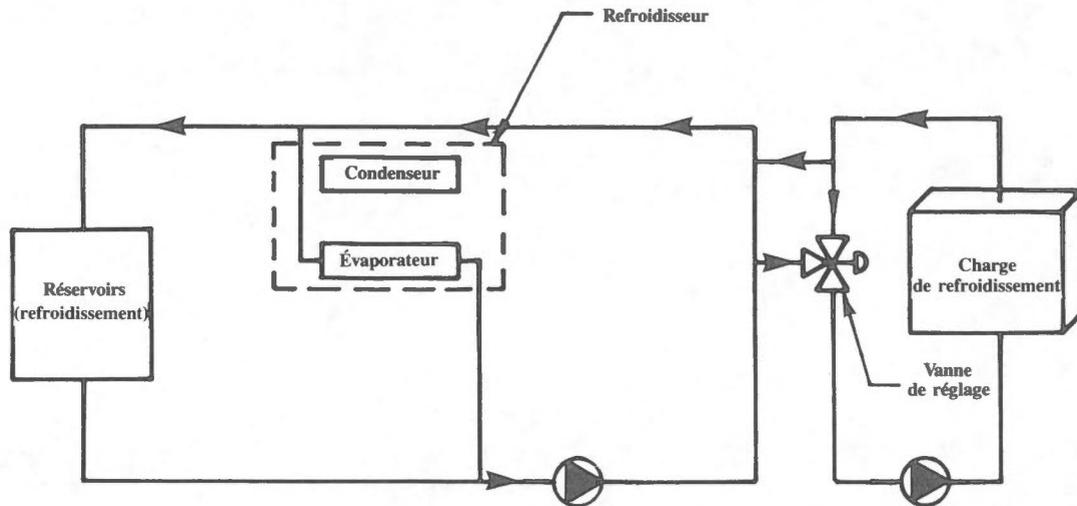
Des puits ont été creusés pour acheminer l'eau jusqu'aux nappes aquifères souterraines (formations souterraines de roches, de sable ou de gravier renfermant une nappe d'eau). L'espacement, la profondeur et les dimensions des puits sont fonction directe des couches aquifères. On doit obtenir des permis spéciaux du gouvernement provincial pour creuser des puits à cette fin. Des réseaux de tuyauteries souterrains ont aussi été utilisés pour extraire l'énergie du sol (habituellement pour le refroidissement). Quoique ni l'une ni l'autre de ces méthodes soient courantes, un certain nombre de sites ont été exploités avec succès.

Systèmes de stockage d'énergie types

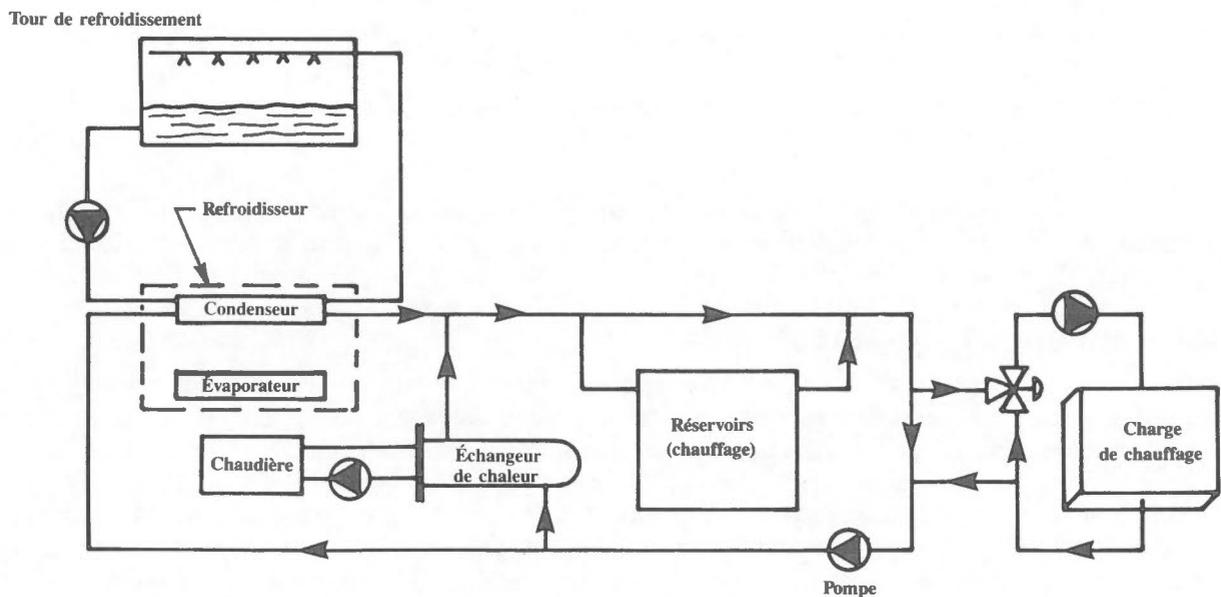
Chaque projet d'accumulation thermique est unique en son genre à cause des différents profils de charge, des conditions atmosphériques, des coûts énergétiques et de la politique financière de l'entreprise. Certains systèmes généraux peuvent toutefois être décrits afin de présenter leurs caractéristiques principales. Les sections suivantes décrivent brièvement des systèmes de stockage d'énergie de base.

Accumulation de chaleur et de froid obtenue par refroidisseur

L'objet principal du schéma de la figure 16 est de réduire l'appel de demande du refroidisseur. Un deuxième avantage constitue le transfert de la charge de chauffage au refroidisseur. Il est à noter que le chauffage par résistance électrique coûte habituellement plus cher que le chauffage au gaz et au pétrole. Toutefois, si un refroidisseur fonctionne avec un COP de 3, il peut fournir de la chaleur à un prix plus économique que le gaz. Lorsqu'on le combine à un système de stockage d'énergie, il charge le système durant les périodes creuses et réduit par conséquent la prime de puissance. Voici comment pourrait fonctionner un système pour un complexe commercial et à bureaux.



(A) Circuit de refroidissement



(B) Circuit de chauffage

Système de stockage d'énergie de chauffage et de refroidissement

Figure 16

Charge de refroidissement – Lorsqu’il y a une demande en refroidissement, de l’eau glacée est prélevée du réservoir de stockage d’énergie, pompée vers la charge (serpentins, équipement de procédé, etc.) à travers un circuit secondaire et retournée à un réservoir vide. Lorsqu’un réservoir est complètement vidé de son eau glacée, il est utilisé comme réservoir de retour.

Le refroidisseur, raccordé en parallèle avec les réservoirs, peut fonctionner de deux façons. Lorsque le système fonctionne à pleine capacité, on peut arrêter le refroidisseur pendant la période de pointe et réduire ainsi les pointes de charge de l’installation. Un fonctionnement à pleine capacité peut toutefois ne pas être pratique. Lorsque l’accumulation est partielle, le refroidisseur fonctionne à charge réduite. Les pointes de charge du bâtiment sont réduites mais à un taux moindre que si toute la charge de refroidissement provenait du système de stockage d’énergie.

Le refroidisseur fonctionne pendant les périodes creuses pour charger le système d’accumulation d’eau glacée. Il faut cependant s’assurer de ne pas provoquer de nouvelles pointes de charge électrique pendant cette opération.

Charge de chauffage – Lorsqu’il y a une demande simultanée en chauffage et en refroidissement, on obtient la charge de refroidissement par l’évaporateur du refroidisseur, tel que mentionné précédemment.

Pendant les périodes creuses le refroidisseur, qui fonctionne comme une pompe à chaleur, charge simultanément les réservoirs de chauffage et de refroidissement. Ces derniers sont vidés et remplis alternativement jusqu’à ce qu’ils soient chargés.

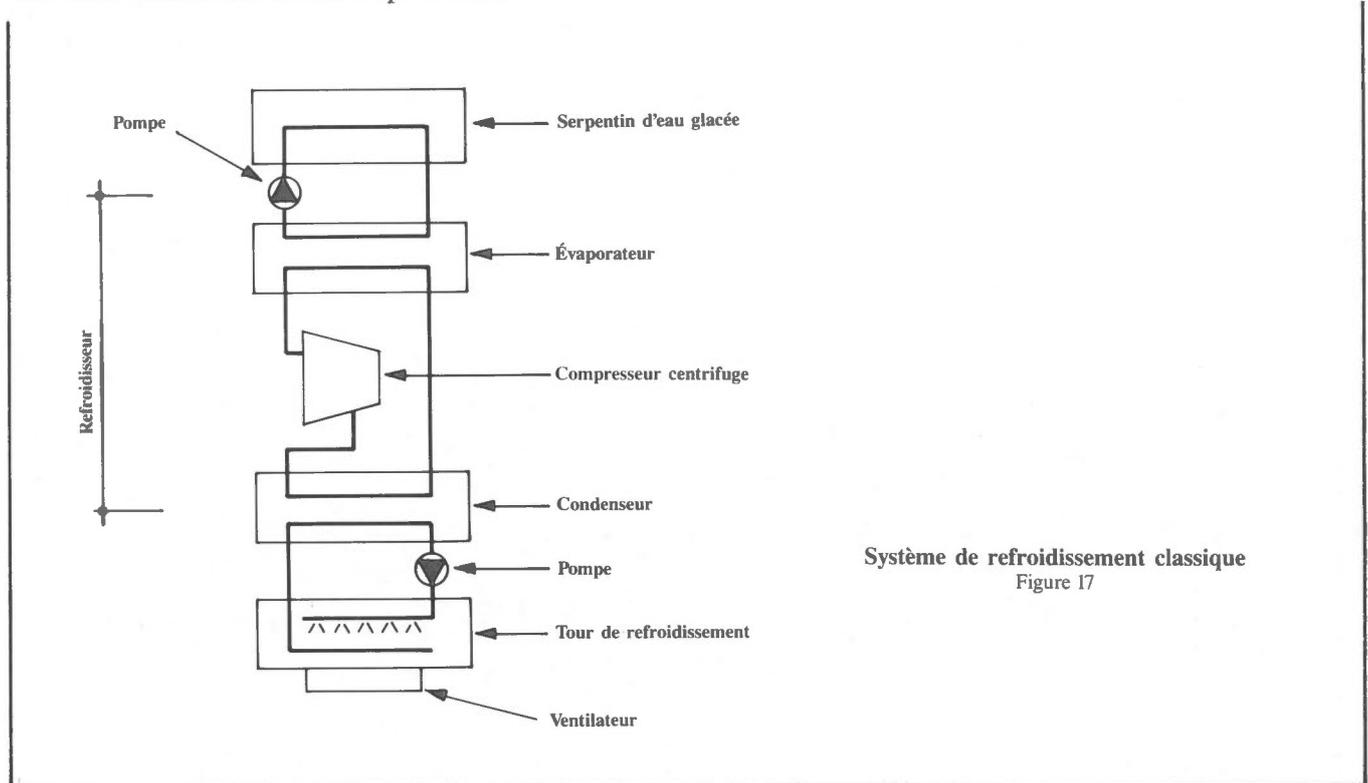
S’il y a une demande en chauffage pendant que l’on charge le réservoir d’eau chaude, la chaleur peut être obtenue du système de stockage, du condenseur ou des chaudières, selon la quantité d’énergie accumulée et la stratégie choisie par l’opérateur.

On peut prélever au besoin de l’énergie thermique des réservoirs pendant les périodes de pointe.

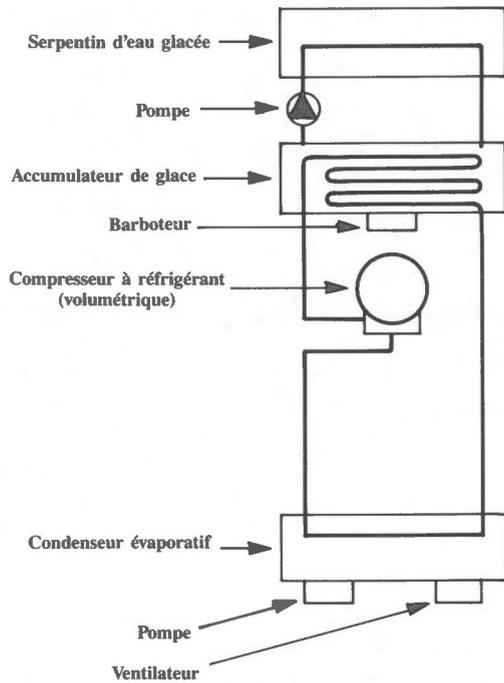
Il est très avantageux de faire fonctionner le refroidisseur ou la pompe à chaleur hors des heures d’opération pour satisfaire la demande de refroidissement et de chauffage en prenant avantage du COP. Dans ce cas, le refroidissement «naturel» provenant de l’air extérieur n’est plus économique et l’installation d’un réseau de gaines d’air extérieur de moins grand diamètre et de ventilateurs de plus petites dimensions pourrait réduire l’investissement relatif à une nouvelle construction.

Accumulation de glace

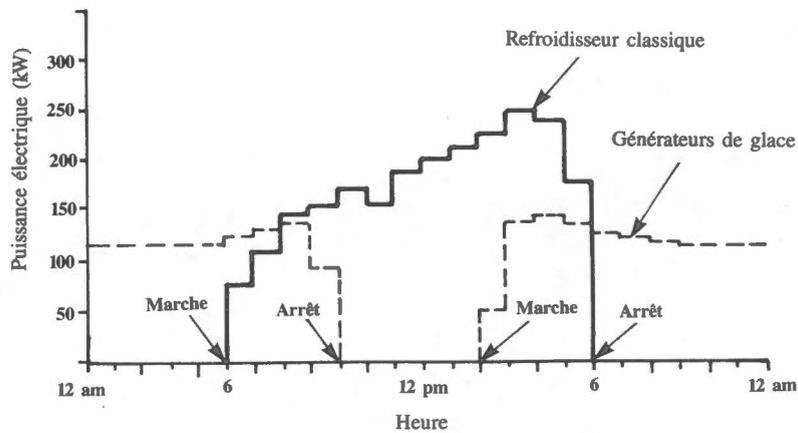
La figure 1 illustre un profil de charge de refroidissement type d’un bâtiment commercial. Le profil de charge électrique ressemblerait à celui de la figure 2 si un système de refroidissement classique satisfait la demande (figure 17). Par conséquent, la charge électrique du refroidisseur et la charge de refroidissement atteindraient toutes les deux une valeur maximale en fin d’après-midi.



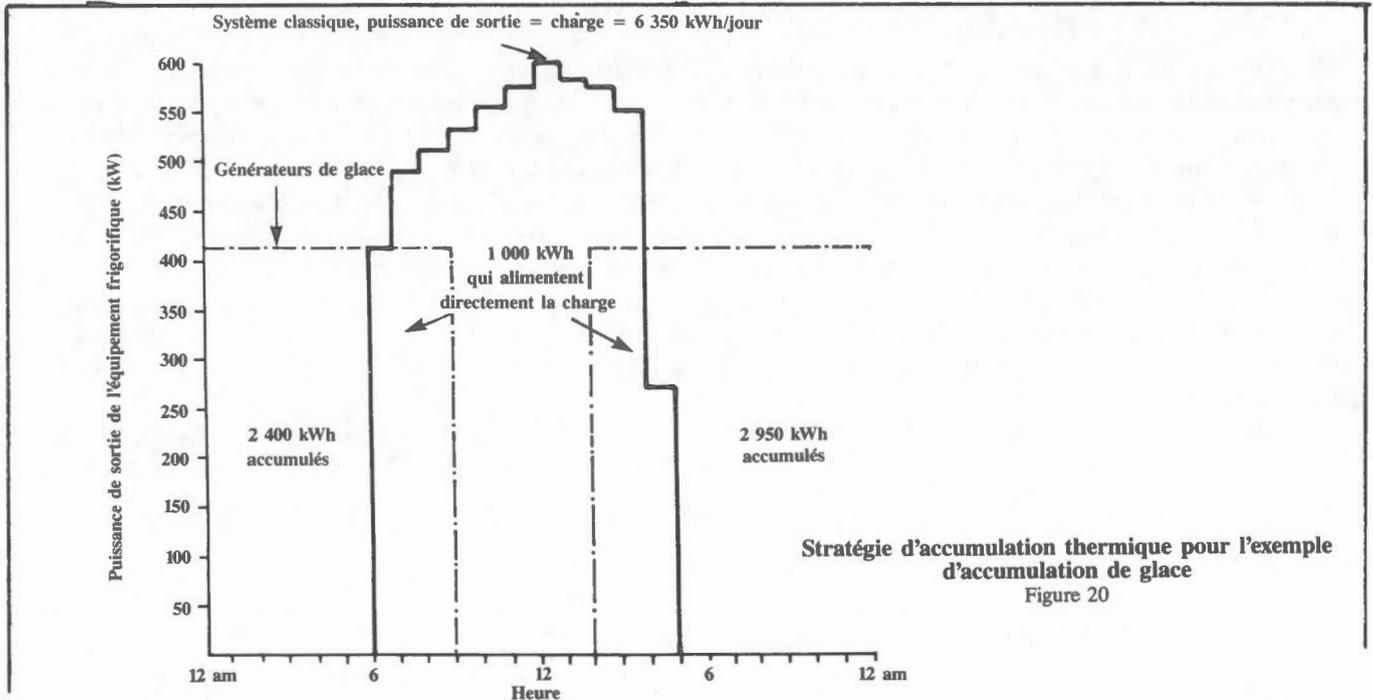
On peut concevoir un système d'accumulation de glace (figure 18) qui satisferrait toutes les charges de refroidissement pendant les heures de pointe de l'installation et reduirait la puissance appelée. La production de glace survient en dehors des heures de pointe, soit les fins de semaine et au tout début de la matinée alors que les charges thermiques et autres charges électriques sont plus faibles. Selon les figures 19 et 20, le refroidisseur ou le générateur de glace est arrêté pendant les heures de pointe. La chaleur évacuée par l'équipement frigorifique pourrait être utilisée pour chauffer l'eau et ainsi économiser plus d'énergie.



Système d'accumulation de glace
 Figure 18

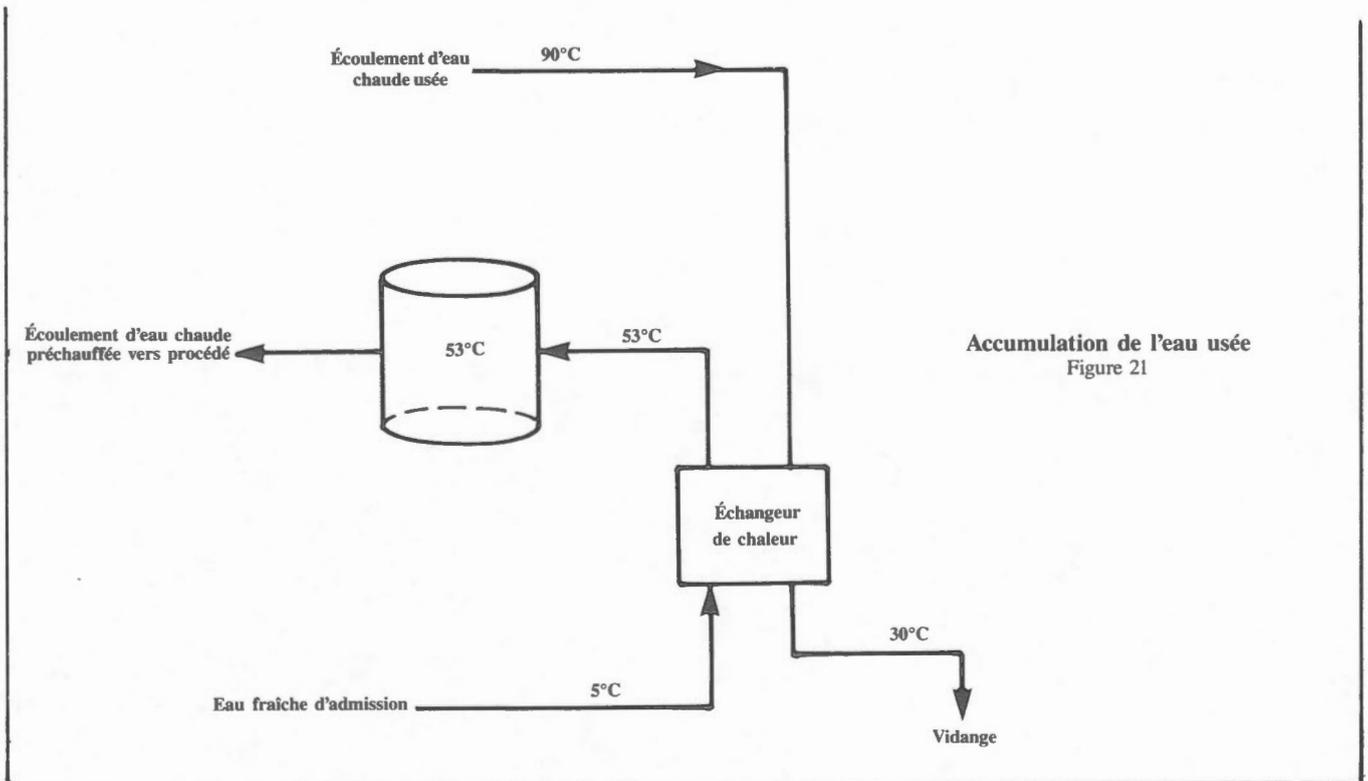


Profils de charge électrique pour l'exemple d'accumulation de glace
 Figure 19



Récupération de chaleur par accumulation thermique

Un système de stockage d'énergie utilisé comme réservoir permet d'assortir les débits d'eau d'appoint et usée aux exigences du procédé (figure 21). Quoique l'accumulation de l'eau usée contaminée ou sale ne soit pas souvent pratique, l'eau usée peut souvent préchauffer l'eau d'appoint propre par le biais d'un échangeur de chaleur. L'eau préchauffée est alors emmagasinée jusqu'au moment de son utilisation. Les avantages sont d'autant plus grands si de grands volumes à haute température sont disponibles. Dans ce cas, puisque le COP du système est plus élevé, une plus grande quantité d'énergie peut être transférée. L'utilisation directe de la chaleur gaspillée pour le préchauffage est plus efficace que l'accumulation. Cette méthode n'est toutefois possible que si le chauffage d'appoint et l'extraction de la chaleur gaspillée surviennent en même temps.



Appareils de régulation

L'optimisation des systèmes de stockage d'énergie d'un bâtiment est assurée lorsqu'il y a souplesse de régulation, puisque les modes de fonctionnement et les horaires varient continuellement et sont très difficiles à prévoir. Un système intégrant des appareils de régulation manuels ou des appareils informatisés est efficace pourvu que le fonctionnement puisse facilement être ajusté en fonction des exigences de l'installation.

Il faut surveiller le fonctionnement du système de stockage d'énergie pour suivre son rendement, identifier toute défectuosité et en déceler les faiblesses. Les petits systèmes peuvent être surveillés par des appareils de mesure et des jauges ordinaires dont les résultats sont enregistrés manuellement. Les systèmes de plus grande importance sont habituellement dotés d'appareils de mesures électroniques et de systèmes de régulation assurant l'enregistrement automatique des données, l'analyse des tendances et d'autres fonctions. Pour obtenir plus de détails sur les appareils de régulation, se référer aux Modules 15 et 16 intitulés respectivement «Mesures et contrôle» et «Régulation automatique».

POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE



Les Possibilités de gestion de l'énergie identifient différentes façons d'utiliser rationnellement l'énergie pour réduire les coûts d'exploitation. Dans le présent chapitre, plusieurs exemples de possibilités types sont donnés sous les rubriques Possibilités de maintenance, Possibilités d'amélioration de coût modique et Possibilités de rénovation. Le chapitre n'énumère pas de façon exhaustive toutes les possibilités d'accumulation thermique. Il est toutefois destiné à stimuler la vigilance du personnel de gestion, d'exploitation et de maintenance dans la recherche de toutes les possibilités qu'offre leur installation.

Avant d'étudier les possibilités d'accumulation thermique . . .

Avant d'examiner les possibilités d'accumulation thermique d'une installation, le propriétaire ou l'opérateur doit d'abord mettre en application les possibilités classiques de gestion de l'énergie détaillées dans les autres modules de la présente série. En effet, la réduction des pertes d'énergie et l'optimisation des systèmes déjà en place sont habituellement plus rentables que l'installation d'un système de stockage d'énergie. Si, ultérieurement, l'installation semble se prêter à ce genre de système, on peut alors effectuer des analyses plus poussées pour évaluer les économies possibles.

La première étape du processus d'évaluation des Possibilités de gestion de l'énergie par accumulation thermique consiste habituellement à établir un profil de la puissance appelée du bâtiment durant plusieurs périodes d'exploitation types. On peut alors étudier les courbes et identifier les charges qui pourraient être transférées aux périodes creuses et les opérations dont l'horaire de fonctionnement pourrait être modifié pour éliminer toute pointe de charge inutile. La feuille de travail 19-1 peut servir à évaluer les possibilités de réduction de la prime de puissance.

Possibilités de maintenance

Les Possibilités de maintenance sont des initiatives d'économie d'énergie exécutées de façon périodique, au moins une fois par année. En voici quelques exemples:

1. Isoler les réservoirs s'ils ne sont pas en train d'être chargés ou déchargés. Lorsque les réservoirs ne sont pas bien isolés, la capacité de stockage est diminuée par les mélanges inutiles et par conséquent, l'équipement thermique doit supporter des charges inutiles.
2. Réparer les fuites de réservoir pour éviter les pertes de capacité de stockage et réduire les coûts relatifs à l'eau d'appoint et au traitement de l'eau. Une accumulation inadéquate peut rendre nécessaire le démarrage d'urgence de l'équipement et par conséquent entraîner une nouvelle pointe de charge électrique. Les fuites d'eau peuvent également causer des dommages.
3. Vérifier la concentration d'antigel (glycol) dans les générateurs de glace. Lorsque la concentration est trop élevée, l'efficacité de l'échangeur thermique est réduite et la pompe consomme plus d'électricité. Lorsque la concentration n'est pas assez élevée, le gel peut endommager l'équipement.
4. Garder le milieu thermique propre. S'assurer que les tamis et les filtres sont nettoyés régulièrement pour éviter que la pompe et le ventilateur ne consomment inutilement de l'électricité. S'assurer que l'eau est bien traitée pour empêcher la croissance d'algues. Garder les filtres des lits de pierres propres pour éviter que la saleté et la charpie ne colmatent le milieu et augmentent la consommation électrique du ventilateur.
5. Examiner les données relatives au fonctionnement du système et les factures d'énergie qui s'y rattachent. Modifier les stratégies d'exploitation pour optimiser le système selon les opérations réelles plutôt que les prévisions lors de la conception.
6. Vérifier le fonctionnement de tous les composants de régulation, tout particulièrement les sondes de température. Lorsque les appareils de régulation ne fonctionnent pas de manière appropriée, l'équipement peut être endommagé et l'efficacité ainsi que la capacité de stockage du système diminuent.
7. Entretien tout l'équipement mécanique conformément aux instructions du fournisseur.
8. Réparer/remplacer tout isolant endommagé.

Possibilités d'amélioration de coût modique

Les Possibilités d'amélioration de coût modique sont des initiatives de gestion de l'énergie réalisées une seule fois et dont le coût n'est pas élevé. En voici quelques exemples:

1. Tirer avantage de la capacité d'un bâtiment à stocker de l'énergie de chauffage et de refroidissement pour réduire la puissance appelée pendant les périodes de pointe.
2. Tirer avantage de la capacité de l'équipement des procédés à stocker de l'énergie pour diminuer le fonctionnement de l'équipement de chauffage pendant les périodes de réchauffage de l'installation.
3. Prérefroidir les boucles d'eau glacée avant les périodes de pointe pour réduire la puissance appelée du refroidisseur en arrêtant ce dernier ou en limitant sa charge.
4. Élever la température du chauffe-eau domestique. Tirer avantage de cette plus grande capacité thermique pour ne pas faire fonctionner l'équipement de chauffage pendant les périodes de pointe. Maintenir l'eau d'alimentation à la température normale en installant une vanne à trois voies à sécurité intrinsèque pour mélanger l'eau d'appoint chauffée et froide.
5. Utiliser l'équipement disponible (réservoirs, pompes, etc.) pour réduire la mise de fonds.

Exemples concrets d'amélioration de coût modique

1. Exploiter les possibilités d'accumulation thermique de la charpente du bâtiment

On peut tirer avantage de la capacité de la charpente d'un bâtiment à stocker de l'énergie pour réduire les pointes de charge électrique et éviter l'addition de nouveaux équipements de chauffage et de refroidissement. Pour accumuler l'énergie de refroidissement pour une installation industrielle climatisée de 5 000 m², il faudrait se conformer à la pratique suivante.

- Maintenir l'ambiance à 1,5°C au-dessous de la normale, une heure avant la période de pointe, pour permettre à l'énergie de refroidissement d'être «absorbée» par la charpente du bâtiment.
- Lorsque les charges électriques approchent la valeur maximale, réduire la puissance appelée par le refroidisseur à l'aide d'un interrupteur limiteur de charge.
- Permettre à la température ambiante de s'élever à 1,5°C au-dessus de la température normale pendant les périodes de pointe.

On peut calculer la capacité thermique pouvant être accumulée lorsqu'il y a variation de 3°C.

$$\begin{aligned} E &= 0,370 \times A \\ &= 0,370 \times 5\,000 \\ &= 1\,850 \text{ MJ} \\ \text{où, } &= \frac{1\,850 \text{ MJ}}{3,6 \text{ MJ/kWh}} \\ &= 514 \text{ kWh} \end{aligned}$$

On obtient ainsi une réduction de la prime de puissance électrique. Une réduction de 514 kWh de la charge frigorifique pendant une période d'une heure entraîne une réduction d'environ 145 kW de la puissance appelée par le refroidisseur (lorsque le COP = 3,54). Une telle diminution entraîne une réduction mensuelle de 145 x 6 = 870\$ de la prime de puissance basée sur un tarif de 6\$ par kW.

La même installation pourrait également stocker 1 850 MJ d'énergie thermique pendant la saison de chauffage, s'il y avait variation de température de 3°C. Comme la température s'élève pendant les périodes de production et que cette énergie accumulée est distribuée pendant les périodes creuses, les demandes en chauffage du bâtiment en sont réduites. On peut évaluer comme suit les économies de combustible par cycle de production d'une installation chauffée au gaz:

Coût du gaz naturel	0,14\$/m ³
Rendement de l'ensemble du système de chauffage	68%
Pouvoir calorifique du gaz naturel (annexe C)	37,2 MJ/m ³

$$\begin{aligned} \text{Coût du gaz par cycle de chauffage} &= \frac{1\,850 \text{ MJ} \times 0,14\$/\text{m}^3}{37,2 \text{ MJ}/\text{m}^3 \times 0,68} \\ &= 10,24\$ \end{aligned}$$

Supposons 5 cycles de chauffage par semaine et une saison de chauffage de 16 semaines pendant lesquelles on peut utiliser la chaleur accumulée et une saison de refroidissement de 5 mois. On peut calculer les économies annuelles de la façon suivante:

$$\begin{aligned} \text{Économies annuelles} &= (10,24\$ \times 5 \text{ cycles/semaine} \times 16 \text{ semaines/an}) \\ &\quad + (5 \text{ mois} \times 870\$/\text{mois}) \\ &= 819\$ + 4\,350\$ = 5\,169\$ \end{aligned}$$

Les investissements relatifs à la modification des appareils de régulation et à l'installation des registres dans les gaines d'évacuation et d'admission d'air frais ont été évalués à 5 000\$.

$$\begin{aligned} \text{Période de rentabilité} &= \frac{5\,000\$}{5\,169\$} \\ &= 1 \text{ an (environ)} \end{aligned}$$

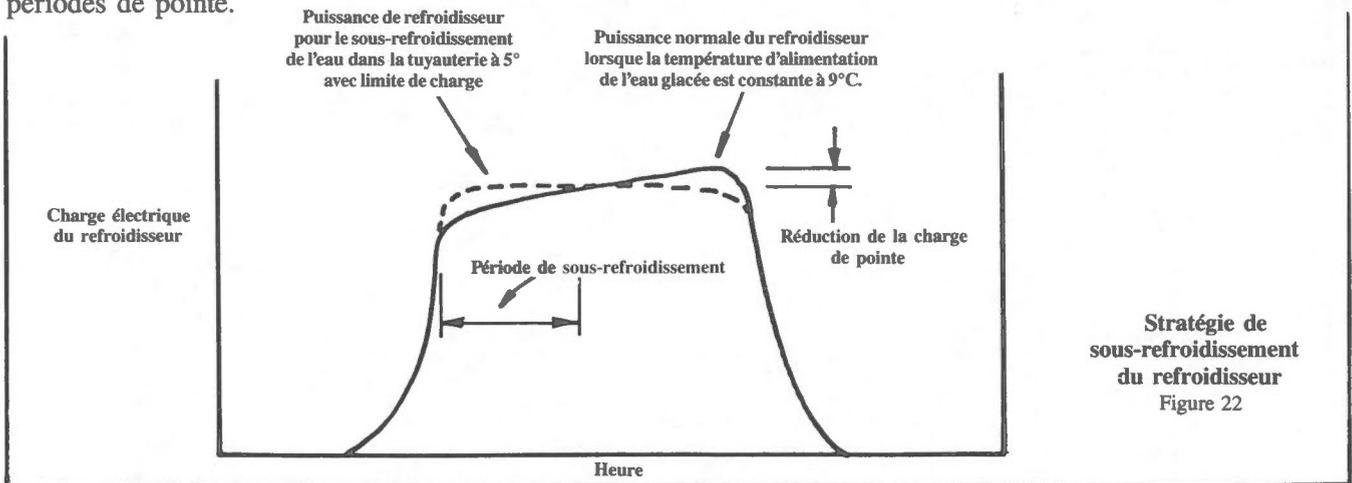
2. Accumulation thermique provenant de l'équipement et des produits

Les équipements et les produits industriels peuvent stocker de l'énergie de la même manière que la charpente d'un bâtiment. Par exemple, si l'équipement du procédé doit être refroidi pendant le cycle de production normal et que le bâtiment demande de la chaleur pendant les heures creuses, on peut examiner la possibilité de réduire la charge de refroidissement à la fin du cycle pour accumuler la chaleur dans l'équipement. Le refroidissement se ferait lentement pendant les heures creuses tout en diminuant la demande en chauffage du bâtiment. On réduit le chauffage et le refroidissement simultanément.

Lorsque certains produits chauds comme des feuilles métalliques en rouleau doivent être refroidies avant leur manipulation, on propose de placer les aires de refroidissement au périmètre du bâtiment pour que la chaleur émise par le produit compense les pertes de chaleur de l'installation.

3. Accumulation thermique provenant des réseaux de tuyauteries

Le liquide circulant dans les boucles de tuyauterie ou dans les réservoirs peut être utilisé comme milieu thermique. Prenons comme exemple un système dont l'eau doit être à 9°C pour satisfaire la demande de refroidissement. La charge thermique exige le fonctionnement du refroidisseur à pleine capacité et par conséquent détermine la prime de puissance du mois (figure 22). Si l'on abaisse la température de l'eau à 5°C avant la période de pointe prévue, la capacité thermique de l'eau glacée est augmentée, ce qui réduit la charge du refroidisseur pendant les périodes de pointe.



Si la capacité frigorifique d'un refroidisseur installé dans un bâtiment est de 1 000 kW et si 4 000 litres d'eau circulent dans le réseau de tuyauteries, les calculs suivants démontrent que l'on peut réduire la température de l'eau de 4°C et emmagasiner 18,6 kWh (67 MJ) de capacité frigorifique dans l'eau.

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{V \times d \times DT \times c_p}{1\ 000} \times \frac{1}{3,6\ \text{MJ/kWh}} \\
 &= \frac{4\ 000(\text{L}) \times 1(\text{kg/L}) \times 4\ (^{\circ}\text{C}) \times 4,1855[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})]}{1\ 000\ \text{kJ/MJ} \times 3,6\ \text{MJ/kWh}} \\
 &= \frac{4\ 000 \times 1 \times 4 \times 4,1855}{1\ 000 \times 3,6} \\
 &= 18,6\ \text{kWh}
 \end{aligned}$$

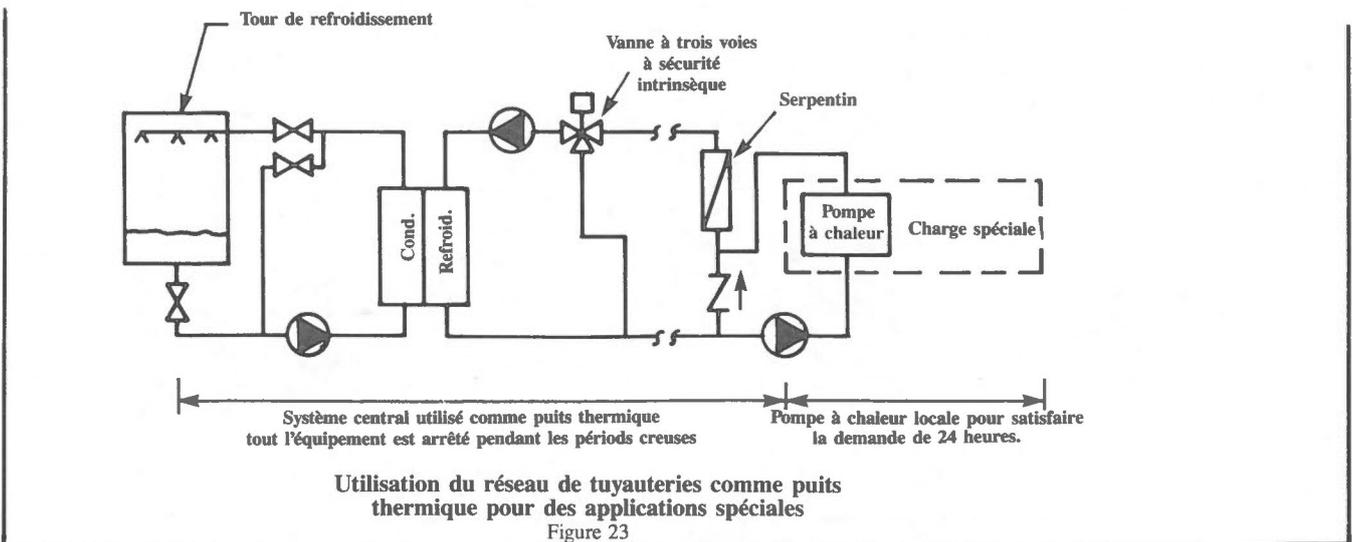
Grâce à l'accumulation thermique, une capacité frigorifique de 18,6 kW est assurée une heure d'avance pour éviter une période de pointe et réduire la prime de puissance électrique. Si le tarif est de 6\$ par kWh et que le COP du refroidisseur est de 3,5, les économies suivantes peuvent être calculées:

$$\begin{aligned}
 \text{Économies annuelles} &= \frac{18,6 \times 6 \times 12}{3,5} \\
 &= 383\$
 \end{aligned}$$

En tenant compte des 700\$ versés pour l'achat d'une minuterie et d'un régulateur compensateur, on obtient la période de rentabilité suivante:

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{700\$}{383\$} = 1,8\ \text{an}$$

On peut appliquer une méthode d'accumulation thermique similaire pour résoudre les problèmes de chauffage ou de refroidissement d'ambiance d'une grande installation. Par exemple, le système central de refroidissement d'un complexe commercial et de bureaux comprend un réseau de tuyauteries qui achemine l'eau glacée vers différents secteurs du bâtiment. Quoique ce dernier soit inoccupé pendant la nuit et les fins de semaine, la pièce de la centrale téléphonique exige un refroidissement constant. Le refroidisseur ne fonctionne pas très bien à charge partielle. Grâce à une pompe à chaleur alimentée en eau et utilisant le réseau existant de tuyauteries d'eau glacée comme puits thermique, tous les systèmes centraux y compris les pompes centrales, peuvent être arrêtés (figure 23). Une petite pompe pourrait faire circuler l'eau glacée pour satisfaire la demande de la pompe à chaleur. Dépendant de la charge, la capacité d'accumulation thermique du réseau de tuyauteries d'eau glacée est souvent suffisante pour arrêter le refroidisseur toute la fin de semaine. L'arrêt du refroidisseur, de la tour de refroidissement et des pompes réalisent ainsi des économies d'énergie.



4. Élever le point de consigne de température d'un réservoir

On peut faire fonctionner les systèmes à eau chaude intégrant un réservoir de façon à augmenter les possibilités d'accumulation thermique.

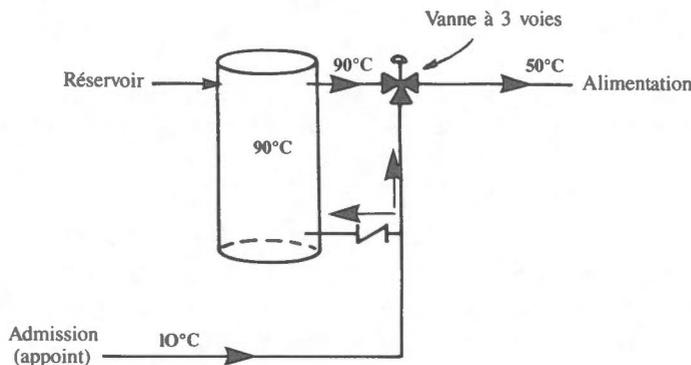
Prenons par exemple un réservoir qui maintient l'eau à 50°C. Si l'on élève la température à 90°C, l'énergie thermique emmagasinée par l'eau du réservoir augmente également. L'alimentation en eau du système est maintenue à 50°C en mélangeant l'eau à 90°C du réservoir et l'eau froide d'appoint (figure 24). L'augmentation de la capacité d'accumulation thermique engendrée par l'élévation de la température du réservoir peut réduire ou éliminer la charge de chauffage d'eau potable pendant les périodes de pointe électrique. Cette technique permet également de ne pas ajouter d'équipements de chauffage additionnels pour satisfaire la demande lorsque le bâtiment est agrandi ou lorsque les charges sont augmentées.

On peut calculer la proportion d'eau d'alimentation provenant de l'eau chaude du réservoir par l'équation suivante. (On ne tient pas compte du débit de retour parce que la capacité est négligeable.)

$$\text{Fraction de l'eau du réservoir} = \frac{DT_1}{DT_2}$$

où $DT_1 = (\text{température d'alimentation}) - (\text{température d'appoint}), (^\circ\text{C})$

$DT_2 = (\text{température du réservoir}) - (\text{température d'appoint}), (^\circ\text{C})$



Élévation de la température de l'eau accumulée
Figure 24

Prenons le système de la figure 24 dont la température de l'eau chaude accumulée est de 90°C, de l'eau d'alimentation 50°C et de l'eau d'appoint, 10°C. On peut calculer la demande en eau chauffée à 90°C du réservoir pour satisfaire la température d'alimentation de 50°C de la façon suivante:

$$\begin{aligned} \text{Fraction de l'eau du réservoir d'alimentation} &= \frac{(50 - 10)}{(90 - 10)} \\ &= \frac{40}{80} = 0,50 \end{aligned}$$

Le taux d'extraction d'eau du réservoir de 90°C serait 50% du taux requis si le température de l'eau du réservoir était maintenue à 50°C. On a pu doubler la capacité d'accumulation thermique (1 divisé par 0,50) tout en assurant les charges d'eau chaude de pointe sans augmenter la puissance appelée du système de chauffage de l'eau.

Un système de chauffe-eau domestiques possède un réservoir de 5 000 litres et une capacité de chauffage électrique de 100 kW. Pendant les périodes de pointe électrique, le système consommait 60 kW d'électricité pour maintenir la température d'alimentation en eau à 50°C. On a augmenté le point de consigne de température du réservoir à 90°C pendant les périodes creuses. On a programmé le fonctionnement des chauffe-eau électriques pour qu'ils démarrent le matin une heure avant la période de pointe d'utilisation de l'eau. L'alimentation électrique des chauffe-eau était automatiquement coupée par une minuterie pendant les périodes de pointes électriques. En modifiant ainsi le réglage de la température du réservoir, plutôt que de maintenir le réservoir à 90°C toute la journée, on réduit les périodes durant lesquelles la température de l'eau est très élevée et ainsi les pertes de chaleur et les risques d'entartrage et de corrosion. On peut réduire la pointe de charge mensuelle de 60 kW en coupant automatiquement les chauffe-eau pendant les périodes de pointe.

$$\begin{aligned}
 \text{Économies annuelles} &= \text{réduction de la puissance appelée/mois} \times \text{mois/an} \times \$/\text{kW} \\
 &= 60 \text{ kW/mo} \times 12 \text{ mo/an} \times 6\$/\text{kW} \\
 &= 4\,320\$/\text{an}
 \end{aligned}$$

On a évalué à 3 500\$ le coût pour modifier le système.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{3\,500}{4\,320} = 0,81 \text{ an (10 mois)}$$

Une vanne à trois voies est utilisée pour mélanger l'eau très chaude et l'eau d'appoint et augmenter ainsi la capacité de stocker de l'énergie. Pour protéger les usagers contre l'ébouillantage en cas d'une panne, la vanne à trois voies devrait inclure un dispositif à sécurité intrinsèque. On recommande d'ajouter de l'isolant au réservoir car l'augmentation de la température d'accumulation d'eau augmente le taux des pertes de chaleur du réservoir. Avant d'élever la température de service du réservoir, il faut consulter le fournisseur pour bien s'assurer que la température et la pression nominales du réservoir ne seront pas dépassées. Dans un système ouvert, comme un chauffe-eau domestique dans lequel circule de l'eau fraîche régulièrement, il faut prendre des précautions spéciales comme installer des anodes sacrificielles ou adoucir l'eau pour éviter l'entartrage et la corrosion du réservoir. Ces deux phénomènes augmentent lorsqu'on augmente la température de l'eau.

Possibilités de rénovation

Les *Possibilités de rénovation* sont des initiatives de gestion de l'énergie réalisées en une seule fois et dont le coût est important. La plupart des possibilités de cette catégorie demande l'analyse approfondie d'un spécialiste. En voici quelques exemples:

1. Ajouter des réservoirs à eau sous pression aux systèmes de chauffage et d'eau chaude domestique.
2. Installer des systèmes d'accumulation d'eau chauffée ou glacée pour éviter l'achat d'équipement de chauffage ou de refroidissement additionnel lorsqu'un procédé est ajouté ou le bâtiment agrandi.
3. Évacuer l'eau usée à travers un échangeur de chaleur pour transférer la chaleur à l'eau d'appoint. Installer un réservoir pour entreposer temporairement l'eau d'appoint préchauffée jusqu'au moment de son utilisation. Au besoin, étudier la possibilité d'utiliser une pompe à chaleur pour augmenter cette chaleur.
4. Lorsque l'espace est un facteur important, ajouter un système d'accumulation de glace en bloc aux générateurs d'eau glacée. Lorsque l'espace n'est pas un problème, étudier la possibilité d'accumuler de la glace en flocons ou de l'eau glacée.
5. Ajouter des trémies pour l'accumulation de sel à phase changeante à la pompe à chaleur, à la chaudière, au système de chauffage central ou aux collecteurs solaires. Lorsque l'espace le permet, étudier la possibilité d'installer des réservoirs d'eau chaude.

Les exemples concrets suivants identifient les possibilités de réduction de la prime de puissance électrique et de récupération de la chaleur gaspillée.

Exemples concrets de possibilités de rénovation

1. Systèmes à eau sous pression

Lorsqu'on augmente la température du réservoir, on augmente par le fait même sa capacité d'accumulation thermique. La plupart des réservoirs et des systèmes sont limitées à 90°C à cause des caractéristiques du réservoir. On peut toutefois élever la température de l'eau en installant un réservoir sous pression fermé et un échangeur de chaleur raccordés au système du chauffage (figure 25). Il faut installer également une vanne à trois voies à sécurité intrinsèque pour s'assurer que l'eau très chaude ne s'introduit pas dans le système de chauffage.

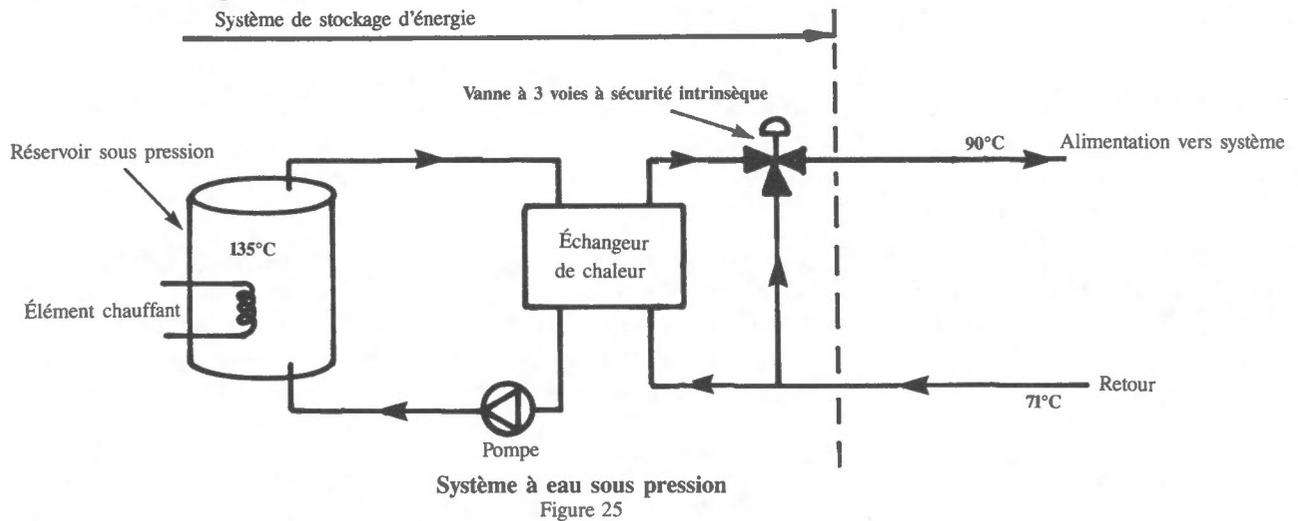
Pour le système d'accumulation sous pression raccordé au circuit d'eau chaude d'un bâtiment, l'eau du réservoir pourrait être chauffée à 135°C avant la période de pointe et distribuée à 90°C durant cette même période. On peut calculer la capacité d'accumulation thermique additionnelle de l'eau comme suit:

$$E = \frac{M \times c_p \times DT}{1\,000}$$

Note: pour l'eau, 1 kg = 1 L et cp = 4,1855 kJ/(kg.°C)

$$E = \frac{1 \times 4,1855 \times (135 - 90)}{1\,000}$$

$$= 0,188 \text{ MJ/kg ou MJ/L}$$



Prenons un bâtiment consommant 2 600 kW pour chauffer l'eau chaude et dont la période de pointe est d'une heure. La température d'alimentation de l'eau chaude doit être de 90°C. Si l'on installe 4 réservoirs sous pression de 9 500 L, on peut accumuler 38 000 L (4 x 9 500) d'eau chaude de 135°C. Lorsque l'eau est chauffée à 135°C pendant les périodes creuses, la prime de puissance appelée est réduite parce que l'eau à 90°C provient du système de stockage d'énergie au lieu des chauffe-eau électriques. L'installation des 4 réservoirs et de leurs réseaux de tuyauteries a été évaluée à 160 000\$.

$$\text{Énergie accumulée (MJ)} = \text{Volume (L)} \times \text{énergie accumulée additionnelle (MJ/L)}$$

$$= 4 \times 9\,500 \times 0,188$$

$$= 7\,144 \text{ MJ}$$

$$\text{Réduction de la charge électrique (kW)} = \frac{\text{Énergie accumulée (MJ)} \times \text{heures (h)}}{3,6 \text{ MJ/kWh}}$$

$$= \frac{7\,144 \times 1}{3,6}$$

$$= 1\,984 \text{ kW}$$

$$\text{Prime de puissance} = 6\$/\text{kW}$$

$$\text{Saison de chauffage} = 4,5 \text{ mois}$$

$$\text{Économies annuelles} = 1\,984 \times 6 \times 4,5$$

$$= 53\,568\$/\text{an}$$

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{160\,000\$}{53\,568\$}$$

$$= 3 \text{ ans}$$

2. Accumulation de l'eau usée

Un procédé par lots évacue 20 000 L d'eau à 90°C. En ajoutant un réservoir d'une capacité de 20 000 L et un échangeur de chaleur, une certaine quantité d'énergie thermique provenant de l'eau usée peut être transférée à l'eau d'appoint. Si la température de l'eau usée est réduite à 30°C en passant à travers l'échangeur de chaleur, la chaleur stockée dans le réservoir d'eau usée pour chaque cycle d'évacuation peut être calculée comme suit:

$$\begin{aligned} E &= \frac{M \times c_p \times DT}{1\ 000} \\ &= \frac{20\ 000 \times 4,1855 \times (90 - 30)}{1\ 000} \\ &= 5\ 023\ \text{MJ} \end{aligned}$$

À mesure que l'eau traverse l'échangeur de chaleur, environ 80% de la chaleur accumulée est transférée à l'eau fraîche d'admission. Environ 20% de la chaleur perdue provient de l'évaporation et des pertes de chaleur du réservoir et de la tuyauterie. Mille cycles d'évacuation sont prévus par année.

La chaleur récupérée réduit le préchauffage au gaz de l'eau d'appoint. Le pouvoir calorifique annuel récupéré peut être calculé pour un système brûlant du gaz naturel à un coût de 0,14\$/m³:

$$\text{Économies annuelles} = \frac{E \times E_{f_e} \times C_f \times N}{E_{f_b} \times \text{pouvoir calorifique du combustible}}$$

où E = énergie dans le réservoir (MJ)

E_{f_e} = rendement de l'échangeur de chaleur (fixé à 0,80)

E_{f_b} = rendement de la chaudière (fixé à 0,70)

N = nombre de cycles de réservoir par année

C_f = coût du combustible (\$/m³)

$$\begin{aligned} \text{Économies annuelles} &= \frac{5\ 023 \times 0,8 \times 0,14 \times 1\ 000}{0,7 \times 37,2} \\ &= 21\ 604\$ \end{aligned}$$

On évalue le coût de l'échangeur de chaleur, du réservoir et de la tuyauterie à 60 000\$.

$$\begin{aligned} \text{Période de rentabilité} &= \frac{60\ 000\$}{21\ 604\$} \\ &= 2,8\ \text{ans} \end{aligned}$$

La capacité d'accumulation thermique de cette application est fonction du volume de liquide évacué par cycle et de la différence de température entre l'eau d'admission et de sortie de l'échangeur de chaleur ou de la pompe à chaleur. L'eau doit être filtrée au besoin pour éliminer tous les contaminants qui pourraient encrasser l'échangeur de chaleur et réduire son efficacité.

3. Réduction de la prime de puissance

Dans l'exemple qui suit, on utilise la feuille de travail 19-1 pour déterminer et évaluer les réductions possibles de la prime de puissance en reportant certaines demandes pendant les périodes creuses en faisant fonctionner les systèmes de stockage d'énergie. Pour des exemples de réduction de puissance appelée obtenus en limitant la charge raccordée, voir le Module 3 intitulé «Électricité».

Prenons comme exemple une usine où l'équipement de chauffage et de refroidissement des procédés et du bâtiment fonctionne pendant les périodes creuses. La demande électrique de pointe facturée par le fournisseur est de 470 kW. Pendant les périodes creuses, la charge s'est maintenue à 130 kW. La puissance appelée pendant les périodes moyennes et creuses fut enregistrée pour tout équipement apte à stocker de l'énergie. Les caractéristiques nominales ou la capacité de l'équipement furent également consignées.

Lorsqu'on a comparé les charges de l'équipement pendant les périodes creuses, on a pu identifier une possibilité de réduction de 170 kW de la puissance appelée. Si le tarif est de 6\$ par kW, la prime totale peut être réduite de 1 020\$ par mois.

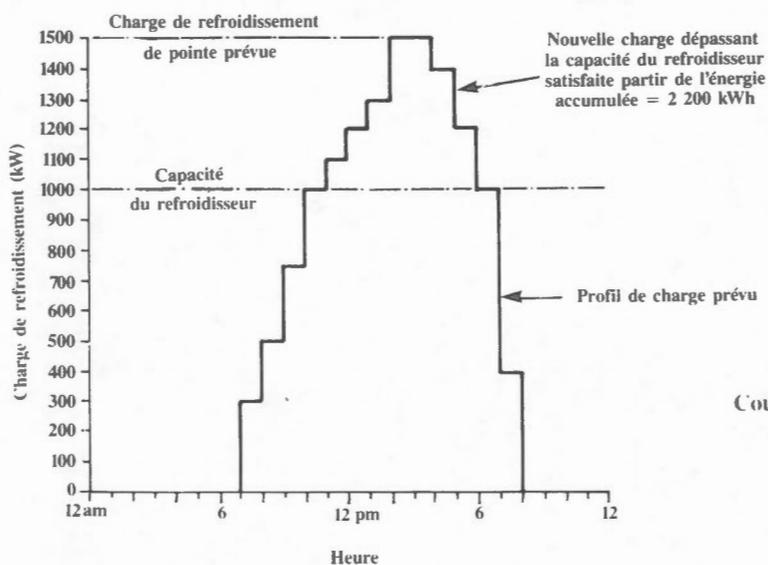
4. Agrandissement d'un bâtiment

Lorsqu'on ajoute des procédés ou agrandit un bâtiment, il est souvent nécessaire d'installer une nouvelle chaudière ou un nouveau refroidisseur. Un système de stockage d'énergie peut éliminer la nécessité d'ajouter ces appareils et permettre à l'équipement existant de fonctionner plus efficacement. En accumulant de l'énergie thermique pendant les périodes creuses, on peut satisfaire les demandes de chauffage ou de refroidissement. On peut satisfaire la charge additionnelle en distribuant de l'énergie accumulée. Le coût de l'équipement de stockage d'énergie peut être inférieur à celui d'une nouvelle chaudière ou d'un nouveau refroidisseur et les coûts énergétiques réduits à cause de la plus faible prime de puissance.

Dans l'exemple suivant, la feuille de travail 19-2 est utilisée pour évaluer les possibilités d'accumulation thermique et éviter l'achat d'un nouveau refroidisseur. Cette feuille peut également être utilisée pour évaluer la capacité thermique d'un système de chauffage à stocker de l'énergie.

L'agrandissement d'un bâtiment entraînera l'augmentation de la charge de refroidissement de pointe à 1 500 kW alors que la capacité du refroidisseur existant est de 1 000 kW. On pourrait satisfaire directement la nouvelle demande en augmentant de 500 kW la capacité frigorifique, ce qui entraînerait un investissement important et augmenterait les coûts d'exploitation.

Comme alternative, on pourrait installer un système de stockage d'énergie pour satisfaire la nouvelle demande. Le profil de charge quotidien prévu de l'installation est présenté à la colonne A de la feuille de travail 19-2 et tracé à la figure 26. La colonne C indique que le refroidisseur existant aura une surcharge de 11 à 18 heures. La colonne E indique qu'il y a un surplus de la capacité du refroidisseur entre 19 et 10 heures, surplus qui pourrait être utilisé pour charger un système d'accumulation.



Courbe de charge thermique pour l'exemple concret de rénovation 4
Figure 26

Le total de la colonne C montre que 2 200 kWh de réfrigération doivent être prélevés pour satisfaire la nouvelle charge. Le total de la colonne E donne la valeur de la charge de refroidissement pouvant être accumulée. Comme cette capacité de 13 050 kWh est supérieure à celle des 2 200 kWh requis, le refroidisseur existant pourra satisfaire toutes les demandes de la charge thermique et charger le système d'accumulation.

Pour obtenir 500 kW de refroidissement de plus, il faut un nouveau refroidisseur, des pompes, des démarreurs, du câblage, de la tuyauterie et des appareils de régulation. Le coût d'un système de stockage d'énergie avec ses réservoirs, ses pompes, sa tuyauterie, son câblage et ses régulateurs automatiques ainsi que le coût des changements de la structure du bâtiment pour recevoir les réservoirs, représente une dépense beaucoup moins grande.

La puissance appelée pour le refroidissement serait limitée à 285 kW si l'on utilisait le refroidisseur existant (1 000 kW divisés par un COP de 3,5), au lieu d'atteindre 430 kW (1 500 kW divisés par 3,5). Il s'agit d'une réduction de 145 kW de la puissance appelée.

Réduction de la prime de puissance

Feuille de travail 19-1

Entreprise: EXEMPLE NO. 3 Date: JUIN '86

Endroit: RÉNOVATION Par: MBE

Charge électrique de pointe facturée par le fournisseur 470 kW (1)

Puissance moyenne appelée par l'entreprise — périodes creuses (charge de base) 130 kW (2)

La prime de puissance est optimisée lorsque la puissance demeure constante.

$$\frac{(1) + (2)}{2} = \frac{470 + 130}{2}$$

= 300 kW (3)

Économies maximales de puissance possibles lorsque l'accumulation thermique est utilisée pour transférer des charges aux périodes creuses.

$$= \underline{470} (1) - \underline{300} (3)$$

$$= \underline{170} \text{ kW (4)}$$

Systèmes suggérés pouvant stocker de l'énergie	Capacité équipement (kW)	Charge actuelle période de service (kW)	Charge actuelle période creuse (kW)	Possibilités d'accumulation thermique (kW)
Procédé électrique — Chauffage	200	200	50	150
Procédé électrique — refroidissement	100	80	20	80
Chauffage d'ambiance	50	0	25	0
Refroidissement d'ambiance	50	50	0	50
Chauffage d'eau chaude domestique	10	10	2	8
Autre	5	5	5	0
Totaux	<u>415</u>	<u>345</u>	<u>102</u>	<u>288</u> (5)

Si (5) est supérieur à (4), on réalise des économies maximales de puissance.

Si (5) est inférieur à (4), les économies sont moins importantes.

On peut calculer les économies de puissance possibles comme suit:

Prime de puissance facturée \$ 6 /kW/mois (6)

Réduction de puissance: valeur moindre de (4) ou (5) 170 kW (7)

Économies maximales possibles = \$ 6 (6) x 170 (7)
= \$ 1020 /mois

Notes:

1. Identifier les systèmes et l'équipement qui se prêtent le mieux à l'accumulation thermique.
2. S'assurer que la charge du système de stockage d'énergie ne produit pas une pointe de charge durant la période creuse.
3. Si l'on obtient des économies importantes, un spécialiste devrait effectuer une analyse en profondeur.

**Évaluation de la capacité de chargement d'accumulation
thermique de l'équipement existant et des écoulements perdus**

Feuille de travail 19-2

Page 1 de 2

Entreprise: EXEMPLE NO. 4 Date: MARS '86
Endroit: RÉNOVATION Par: MBE

Étapes

- (1) Prévoir la charge de chauffage ou de refroidissement horaire moyenne pour le jour de pointe de l'équipement en question. Il peut s'agir d'une chaudière, d'un refroidisseur ou d'un nouveau procédé. Inscrive ces valeurs dans la colonne A.

- (2) Déterminer la capacité de l'équipement existant ou de l'écoulement perdu et comparer les valeurs avec A. Dans la colonne B, inscrire la valeur la plus basse de A ou la capacité de l'équipement.

- (3) Soustraire B de A et inscrire le résultat dans la colonne C.

- (4) La capacité du nouvel équipement à installer, sans accumulation thermique, est la plus grande valeur en C.

- (5) Le total de C représente la quantité d'énergie accumulée utile requise pour éviter l'achat d'un nouvel équipement.

- (6) Inscrive la valeur la plus grande de A ou la capacité de l'équipement dans la colonne D.

- (7) Soustraire A de D et inscrire le résultat dans la colonne E.

- (8) Le total de E représente la capacité d'accumulation thermique. Si le total de la colonne E est inférieur à celui de la colonne C, seule une partie de l'énergie nécessaire peut être régénérée à partir d'un système d'accumulation thermique et l'achat d'un nouvel équipement semble inévitable.

**Évaluation de la capacité de chargement d'accumulation
thermique de l'équipement existant et des écoulements perdus**

Feuille de travail 19-2

Page 2 de 2

Entreprise: EXEMPLE NO. 4 Date: MARS '86

Endroit: RÉNOUATION Par: MBE

HEURES	PROFIL DE CHARGE PRÉVU (kW)	PLUS PETITE VALEUR DE A OU CAPACITÉ (kW)	SURCHARGE A-B (kW)	VALEUR LA PLUS ÉLEVÉE DE A OU CAPACITÉ (kW)	CAPACITÉ EN SURPLUS D-A (kW)
	A	B	C	D	E
0-1 h	0	0	0	1000	1000
1-2 h	0	0	0	1000	1000
2-3 h	0	0	0	1000	1000
3-4 h	0	0	0	1000	1000
4-5 h	0	0	0	1000	1000
5-6 h	0	0	0	1000	1000
6-7 h	0	0	0	1000	1000
7-8 h	300	300	0	1000	700
8-9 h	500	500	0	1000	500
9-10 h	750	750	0	1000	250
10-11 h	1000	1000	0	1000	0
11-12 h	1100	1000	100	1100	0
12-13 h	1200	1000	200	1200	0
13-14 h	1300	1000	300	1300	0
14-15 h	1500	1000	500	1500	0
15-16 h	1500	1000	500	1500	0
16-17 h	1400	1000	400	1400	0
17-18 h	1200	1000	200	1200	0
18-19 h	1000	1000	0	1000	0
19-20 h	400	400	0	1000	600
20-21 h	0	0	0	1000	1000
21-22 h	0	0	0	1000	1000
22-23 h	0	0	0	1000	1000
23-24 h	0	0	0	1000	1000

TOTAL 2200 kWh 13050 kWh



ANNEXES

- A Glossaire
- B Tables
- C Conversions courantes
- D Feuilles de travail



GLOSSAIRE

Abaissement de température – Réglage de la température d'un thermostat à une valeur inférieure pendant les périodes d'inoccupation.

Air d'appoint – Air extérieur admis dans un bâtiment pour compenser l'air évacué ou extrait.

Analyse de diagnostic – Analyse d'une possibilité d'économie d'énergie pouvant comporter l'évaluation du fonctionnement du processus, l'étude des registres correspondants, le calcul des économies possibles et l'évaluation des frais d'immobilisation et des coûts d'exploitation afin de calculer la rentabilité.

Analyse au passage – Inspection visuelle de l'installation pour observer comment l'énergie est employée et déceler les cas où elle est gaspillée.

Anode sacrificielle – Électrode dont la décomposition lente protège d'autres équipements contre la corrosion.

Capacité d'accumulation – Quantité d'énergie thermique pouvant être stockée dans un système d'accumulation et exprimée en kWh ou MJ.

Chaleur excédentaire – Chaleur en surplus provenant des procédés, des occupants ou de l'éclairage.

Charge de base – Charge électrique ou thermique continue dont le niveau est presque toujours le même. Dans un système de refroidissement par exemple, la charge de base électrique pourrait comprendre des ventilateurs et des pompes fonctionnant continuellement: les refroidisseurs représenteraient les charges variables qui ne font habituellement pas partie de cette charge de base.

Charge de pointe – Charge thermique ou électrique la plus élevée d'une période donnée.

Dégradable – Susceptible d'être décomposé chimiquement et ainsi changer les propriétés physiques.

Degré-jour – Totalisation de la différence entre la température moyenne quotidienne d'un bulbe sec extérieur et la température de référence. Par exemple, dix degrés-jours de chauffage au-dessous de 18°C équivalent à un jour de 8°C ou dix jours de 17°C. Les degrés-jours peuvent être de «chauffage» ou de «refroidissement».

Eau d'appoint – Eau admise dans un système d'eau domestique ou de procédé pour compenser l'eau évaporée, vidangée et évacuée.

Énergie – Grandeur caractérisant l'aptitude d'un système à fournir un travail. L'énergie existe sous différentes formes transformables: énergie thermique (chaleur), mécanique (travail), électrique et chimique. L'énergie est mesurée en kilowatt-heures (kWh) ou en mégajoules (MJ).

Énergie gaspillée – Énergie dissipée sans avoir été pleinement utilisée. L'énergie gaspillée peut être sous forme de vapeur, gaz d'échappement, pertes d'eau usée et même rebuts.

État – Solide, liquide ou gaz.

Période creuse – Période durant laquelle la puissance appelée ou la charge d'un appareil est inférieure à la charge de pointe. Les périodes creuses sont habituellement fonction d'un faible taux d'occupation.

Période de rentabilité – Période durant laquelle une dépense est rentabilisée par l'argent économisé annuellement.

Pertes de chaleur du milieu thermique en réserve – Énergie perdue par le milieu thermique par la transmission de chaleur à travers les parois des réservoirs et du réseau de tuyauteries.

Rendement saisonnier de la chaudière – Débit calorifique total à la sortie, divisé par le débit calorifique total à l'entrée pendant une saison de chauffage complète.

Stratification – Formation de couches de température différente dans les masses d'air ou de liquide à mouvement lent, entraînée par la différence de densité entre les fluides chauds et froids. La poussée d'Archimède entraîne l'air ou le liquide chaud moins dense à monter vers la partie supérieure d'une pièce ou d'un contenant. L'air ou le liquide froid demeure dans la partie inférieure. L'interface entre les fluides de température différente est appelée thermocline.

Système de stockage d'énergie – Réservoir, récipient, enceinte, trémie ou contenant intégrant des pompes et des appareils de régulation pour stocker de l'énergie thermique.

Température moyenne – Moyenne des températures minimale et maximale.

**CHALEUR SPÉCIFIQUE ET MASSE VOLUMIQUE TYPES DE CERTAINS MATÉRIAUX
TABLE 1**

Matériau	Chaleur spécifique [kJ/(kg·°C)]	Masse volumique (kg/m ³)
Brique	0,80	1920
Béton	0,65	2300
Tuile d'argile	0,92	1000
Blocs en béton	0,92	—
Pierre à chaux	0,91	1650
Glace (à 0°C)	2,04	921*
Eau (à 20°C)	4,1855	998
Bois dur	1,63	550
Bois mou	1,63	430
Placoplâtre	1,09	2110
Parafine	2,90	900

*La glace à 0°C est moins dense que l'eau; pour les calculs du présent module, utiliser une valeur de 1000 kg/m³.

**CARACTÉRISTIQUES DES MILIEUX THERMIQUES
TABLE 2**

	Volume Requis (L/MJ)	Température (°C)	Installation	Possibilité de perte d'énergie	Durée de vie du matériau
LIQUIDES					
Eau glacée	30	5 à 10	Grande	Problème de mélange	Permanente
Eau chaude	30	38 à 90	Grande	Certain mélange	Permanente
CHANGEMENT DE PHASE					
Glace solide	3.0	-5 à +10	Sectionnée	Aucune	Permanente
Glace en flocons	3.0	-5 à +10	Grande	Aucune	Permanente
Sel de Glauber	2.3	Point de congélation 32	Sectionnée	Aucune	Limitée
Chlorure de calcium hexahydrate	3.4	Point de congélation 29	Sectionnée	Aucune	Illimitée
Sel de magnésium eutectique	4.9	Point de congélation 58	Sectionnée	Aucune	Illimitée
Nitrate de magnésium hexahydrate	4.0	Point de congélation 89	Sectionnée	Aucune	Illimitée
SOLIDES					
Pierres	76	—	Grande	Aucune	Permanente
Sable	100	—	Sectionnée	Aucune	Permanente

CONVERSIONS COURANTES

1 baril (35 gal imp.) (42 gal U.S.)	= 159,1 litres	1 kilowatt-heure	= 3600 kilojoules
1 gallon (imp.)	= 1,20094 gallon (U.S.)	1 Newton	= 1 Kg-m/s ²
1 cheval vapeur (chaudière)	= 9809,6 watts	1 thermie	= 10 ⁵ Btu
1 cheval vapeur	= 2545 Btu/heure	1 tonne (réfrigérant)	= 12002,84 Btu/heure
1 cheval vapeur	= 0,746 kilowatts	1 tonne (réfrigérant)	= 3516,8 watts
1 joule	= 1 N-m	1 watt	= 1 joule/seconde
Kelvin	= (°C + 273,15)	degré Rankine	= (°F + 459,67)

Cubes

1 v ³	= 27 pi ³
1 pi ³	= 1728 po ³
1 cm ³	= 1000 mm ³
1 m ³	= 10 ⁶ cm ³
1 m ³	= 1000 L

Carrés

1 v ²	= 9 pi ²
1 pi ²	= 144 po ²
1 cm ²	= 100 mm ²
1 m ²	= 10000 cm ²

PRÉFIXES SI

Préfixe	Symbole	Valeur numérique	Exposant
téra	T	1 000 000 000 000	10 ¹²
giga	G	1 000 000 000	10 ⁹
méga	M	1 000 000	10 ⁶
kilo	k	1 000	10 ³
hecto	h	100	10 ²
déca	da	10	10 ¹
déci	d	0,1	10 ⁻¹
centi	c	0,01	10 ⁻²
milli	m	0,001	10 ⁻³
micro	u	0,000 001	10 ⁻⁶
nano	n	0,000 000 001	10 ⁻⁹
pico	p	0,000 000 000 001	10 ⁻¹²

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS MÉTRIQUES EN UNITÉS IMPÉRIALES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/centimètre carré	A/cm ²	ampère/pouce carré	A/po ²	6,452
degré Celsius	°C	degré Fahrenheit	°F	(°C × 9/5) + 32
centimètre	cm	pouce	po	0,3937
centimètre cube	cm ³	pouce cube	po ³	0,06102
mètre cube	m ³	pié cube	pi ³	35,314
gramme	g	once	oz	0,03527
gramme	g	livre	lb	0,0022
gramme/litre	g/L	livre/pié cube	lb/pi ³	0,06243
joule	J	Btu	Btu	9,480 × 10 ⁻⁴
joule	J	pié-livre	pi-lb	0,7376
joule	J	cheval vapeur-heure	cv-h	3,73 × 10 ⁻⁷
joule/mètre, (Newton)	J/m, N	livre	lb	0,2248
kilogramme	kg	livre	lb	2,205
kilogramme	kg	tonne (longue)	tonne	9,842 × 10 ⁻⁴
kilogramme	kg	tonne (courte)	tn	1,102 × 10 ⁻³
kilomètre	km	mille	mille	0,6214
kilopascal	kPa	atmosphère	atm	9,87 × 10 ⁻³
kilopascal	kPa	pouce de mercure (32°F)	po de Hg	0,2953
kilopascal	kPa	pouce d'eau (4°C)	po d'H ₂ O	4,0147
kilopascal	kPa	livre/pouce carré	lb/po ²	0,1450
kilowatt	kW	pié-livre/seconde	pi-lb/s	737,6
kilowatt	kW	cheval vapeur	cv	1,341
kilowatt-heure	kWh	Btu	Btu	3413
litre	L	pié cube	pi ³	0,03531
litre	L	gallon (imp.)	gal (imp.)	0,21998
litre	L	gallon (U.S.)	gal (U.S.)	0,2642
litre/seconde	L/s	pié cube/minute	pi ³ /min	2,1186
lumen/mètre carré	lm/m ²	lumen par pié carré	lm/pi ²	0,09290
lux, lumen/mètre carré	lx, lm/m ²	pié bougie	pi-b	0,09290
mètre	m	pié	pi	3,281
mètre	m	verge	yd	1,09361
partie par million	ppm	grain/gallon (imp.)	gr/gal (imp.)	0,07
partie par million	ppm	grain/gallon (U.S.)	gr/gal (U.S.)	0,05842
perméance (métrique)	PERM	perméance (imp.)	perm	0,01748
centimètre carré	cm ²	pouce carré	po ²	0,1550
mètre carré	m ²	pié carré	pi ²	10,764
mètre carré	m ²	verge carré	v ²	1,196
tonne (métrique)	t	livre	lb	2204,6
watt	W	Btu/heure	Btu/h	3,413
watt	W	lumen	lm	668,45

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS IMPÉRIALES EN UNITÉS MÉTRIQUES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/po ²	A/po ²	ampère/cm ²	A/cm ²	0,1550
atmosphère	atm	kilopascal	kPa	101,325
British Thermal Unit	Btu	joule	J	1054,8
Btu	Btu	kilogramme-mètre	kg-m	107,56
Btu	Btu	kilowatt-heure	kWh	2,928 × 10 ⁻⁴
Btu/heure	Btu/h	watt	W	0,2931
calorie, gramme	cal ou	g-cal joule	J	4,186
chaîne	chaîne	mètre	m	20,11684
pié cube	pi ³	mètre cube	m ³	0,02832
pié cube	pi ³	litre	L	28,32
pié cube/minute	pi ³ /m	litre/seconde	L/s	0,47195
cycle/seconde	c/s	Hertz	Hz	1,00
degré Fahrenheit	°F	degré Celsius	°C	(°F-32)/1,8
pié	pi	mètre	m	0,3048
pié bougie	pi-b	lux, lumen/mètre carré	lx, lm/m ²	10,764
pié lambert	pi-L*	candela/mètre carré	cd/m ²	3,42626
pié-livre	pi-lb	joule	J	1,356
pié-livre	pi-lb	kilogramme-mètre	kg-m	0,1383
pié livre/seconde	pi-lb/s	kilowatt	kW	1,356 × 10 ⁻³
gallon (imp.)	gal (imp.)	litre	L	4,546
gallon (U.S.)	gal (U.S.)	litre	L	3,785
grain/gallon (imp.)	gr/gal(imp.)	partie par million	ppm	14,286
grain/gallon (U.S.)	gr/gal(U.S.)	partie par million	ppm	17,118
cheval vapeur	cv	watt	W	745,7
cheval vapeur-heure	cv-h	joule	J	2,684 × 10 ⁶
pouce	po	centimètre	cm	2,540
pouce de mercure (32°F)	po de Hg	kilopascal	kPa	3,386
pouce d'eau (4°C)	po d'H ₂ O	kilopascal	kPa	0,2491

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS IMPÉRIALES EN UNITÉS MÉTRIQUES (CONT.)

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
lambert	L*	candela/mètre carré	cd/m ²	3,183
lumen/pied carré	lm/pi ²	lumen/mètre carré	lm/m ²	10,76
lumen	lm	watt	W	0,001496
mille	mille	kilomètre	km	1,6093
once	oz	gramme	g	28,35
perm (0°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	kg/(Pa-s-m ²) (PERM)	5,721 × 10 ⁻¹¹
perm (23°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	kg/(Pa-s-m ²) (PERM)	5,745 × 10 ⁻¹¹
perm-pouce (0°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	1,4532 × 10 ⁻¹²
perm-pouce (23°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	1,4593 × 10 ⁻¹²
chopine (imp.)	chopine	litre	L	0,56826
livre	lb	gramme	g	453,5924
livre	lb	joule/mètre (Newton)	J/m N	4,448
livre	lb	kilogramme	kg	0,4536
livre	lb	tonne (métrique)	t	4,536 × 10 ⁻⁴
livre/pied cube	lb/pi ³	gramme/litre	g/L	16,02
livre/pouce carré	lb/po ²	kilopascal	kPa	6,89476
pinte	pinte	litre	L	1,1365
slug	slug	kilogramme	kg	14,5939
pied carré	pi ²	mètre carré	m ²	0,09290
pouce carré	po ²	centimètre carré	cm ²	6,452
verge carré	v ²	mètre carré	m ²	0,83613
tonne (longue)	ton	kilogramme	kg	1016
tonne (courte)	tn	kilogramme	kg	907,185
verge	v	mètre	m	0,9144

* "L" tel qu'utilisé dans l'éclairage.

Les valeurs typiques qui suivent peuvent servir de facteurs de conversion quand les données réelles manquent. Les équivalents en MJ et en BTU correspondent à la chaleur de combustion. Les chiffres applicables aux hydrocarbures correspondent à la valeur calorifique la plus élevée (poids humide). Certains produits sont de toute évidence des matières premières, mais ont été inclus au tableau pour le rendre plus complet et pour servir de référence. Les facteurs de conversion pour le charbon sont approximatifs puisque la valeur calorifique de ce produit varie selon la mine d'où il a été extrait.

TYPE D'ÉNERGIE	MÉTRIQUE	IMPÉRIAL
CHARBON		
— métallurgique	29 000 mégajoules/tonne	$25,0 \times 10^6$ BTU/tonne
— anthracite	30 000 mégajoules/tonne	$25,8 \times 10^6$ BTU/tonne
— bitumineux	32 100 mégajoules/tonne	$27,6 \times 10^6$ BTU/tonne
— sous-bitumineux	22 100 mégajoules/tonne	$19,0 \times 10^6$ BTU/tonne
— lignite	16 700 mégajoules/tonne	$14,4 \times 10^6$ BTU/tonne
COKE		
— métallurgique	30 200 mégajoules/tonne	$26,0 \times 10^6$ BTU/tonne
— pétrolier		
— brut	23 300 mégajoules/tonne	$20,0 \times 10^6$ BTU/tonne
— calciné	32 600 mégajoules/tonne	$28,0 \times 10^6$ BTU/tonne
POIX	37 200 mégajoules/tonne	$32,0 \times 10^6$ BTU/tonne
PÉTROLE BRUT	38,5 mégajoules/litre	$5,8 \times 10^6$ BTU/baril
MAZOUT N° 2	38,68 mégajoules/litre	$5,88 \times 10^6$ BTU/baril $0,168 \times 10^6$ BTU/GI
PÉTROLE N° 4	40,1 mégajoules/litre	$6,04 \times 10^6$ BTU/baril $0,173 \times 10^6$ BTU/GI
PÉTROLE N° 6 (MAZOUT LOURD C)		
— 2,5 % soufre	42,3 mégajoules/litre	$6,38 \times 10^6$ BTU/baril $0,182 \times 10^6$ BTU/GI
— 1,0 % soufre	40,5 mégajoules/litre	$6,11 \times 10^6$ BTU/baril $0,174 \times 10^6$ BTU/GI
— 0,5 % soufre	40,2 mégajoules/litre	$6,05 \times 10^6$ BTU/baril $0,173 \times 10^6$ BTU/GI
KÉROSÈNE	37,68 mégajoules/litre	$0,167 \times 10^6$ BTU/GI
DIESEL	38,68 mégajoules/litre	$0,172 \times 10^6$ BTU/GI
GAZOLINE	36,2 mégajoules/litre	$0,156 \times 10^6$ BTU/GI
GAZ NATUREL	37,2 mégajoules/m ³	$1,00 \times 10^6$ BTU/M pi ³
PROPANE	50,3 mégajoules/kg 26,6 mégajoules/litre	$0,02165 \times 10^6$ BTU/lb $0,1145 \times 10^6$ BTU/GI
ÉLECTRICITÉ	3,6 mégajoules/kWh	$0,003413 \times 10^6$ BTU/kWh

Réduction de la prime de puissance

Feuille de travail 19-1

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Charge électrique de pointe facturée par le fournisseur _____ kW (1)

Puissance moyenne appelée par l'entreprise — périodes creuses
(charge de base) _____ kW (2)

La prime de puissance est optimisée lorsque la puissance demeure constante.

$$\frac{(1) + (2)}{2} = \frac{\quad + \quad}{2}$$

= _____ kW (3)

Économies maximales de puissance possibles lorsque l'accumulation thermique est utilisée pour transférer des charges aux périodes creuses. = _____ (1) - _____ (3)

= _____ kW (4)

Systèmes suggérés pouvant stocker de l'énergie	Capacité équipement (kW)	Charge actuelle période de service (kW)	Charge actuelle période creuse (kW)	Possibilités d'accumulation thermique (kW)
Procédé électrique - Chauffage				
Procédé électrique - refroidissement				
Chauffage d'ambiance				
Refroidissement d'ambiance				
Chauffage d'eau chaude domestique				
Autre				
Totaux				(5)

Si (5) est supérieur à (4), on réalise des économies maximales de puissance.

Si (5) est inférieur à (4), les économies sont moins importantes.

On peut calculer les économies de puissance possibles comme suit:

Prime de puissance facturée \$ _____/kW/mois (6)

Réduction de puissance: valeur moindre de (4) ou (5) _____ kW (7)

Économies maximales possibles = \$ _____ (6) x _____ (7)
= \$ _____/mois

Notes:

1. Identifier les systèmes et l'équipement qui se prêtent le mieux à l'accumulation thermique.
2. S'assurer que la charge du système de stockage d'énergie ne produit pas une pointe de charge durant la période creuse.
3. Si l'on obtient des économies importantes, un spécialiste devrait effectuer une analyse en profondeur.

**Évaluation de la capacité de chargement d'accumulation
thermique de l'équipement existant et des écoulements perdus**

Feuille de travail 19-2

Page 1 de 2

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Étapes

- (1) Prévoir la charge de chauffage ou de refroidissement horaire moyenne pour le jour de pointe de l'équipement en question. Il peut s'agir d'une chaudière, d'un refroidisseur ou d'un nouveau procédé. Inscire ces valeurs dans la colonne A.

- (2) Déterminer la capacité de l'équipement existant ou de l'écoulement perdu et comparer les valeurs avec A. Dans la colonne B, inscrire la valeur la plus basse de A ou la capacité de l'équipement.

- (3) Soustraire B de A et inscrire le résultat dans la colonne C.

- (4) La capacité du nouvel équipement à installer, sans accumulation thermique, est la plus grande valeur en C.

- (5) Le total de C représente la quantité d'énergie accumulée utile requise pour éviter l'achat d'un nouvel équipement.

- (6) Inscire la valeur la plus grande de A ou la capacité de l'équipement dans la colonne D.

- (7) Soustraire A de D et inscrire le résultat dans la colonne E.

- (8) Le total de E représente la capacité d'accumulation thermique. Si le total de la colonne E est inférieur à celui de la colonne C, seule une partie de l'énergie nécessaire peut être régénérée à partir d'un système d'accumulation thermique et l'achat d'un nouvel équipement semble inévitable.

**Évaluation de la capacité de chargement d'accumulation
thermique de l'équipement existant et des écoulements perdus**

Feuille de travail 19-2

Page 2 de 2

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

HEURES	PROFIL DE CHARGE PRÉVU (kW)	PLUS PETITE VALEUR DE A OU CAPACITÉ (kW)	SURCHARGE A-B (kW)	VALEUR LA PLUS ÉLEVÉE DE A OU CAPACITÉ (kW)	CAPACITÉ EN SURPLUS D-A (kW)
	A	B	C	D	E

- 0-1 h
- 1-2 h
- 2-3 h
- 3-4 h
- 4-5 h
- 5-6 h
- 6-7 h
- 7-8 h
- 8-9 h
- 9-10 h
- 10-11 h
- 11-12 h
- 12-13 h
- 13-14 h
- 14-15 h
- 15-16 h
- 16-17 h
- 17-18 h
- 18-19 h
- 19-20 h
- 20-21 h
- 21-22 h
- 22-23 h
- 23-24 h

TOTAL _____ kWh _____ kWh

