



17 EXERCICES DE STOCKAGE D'ÉNERGIE LATENT_SOLUTIONS

Exercice 17.6 : Stockage de froid pour bâtiment agricole

Des milliers de systèmes de stockage thermique de froid fonctionnent dans le monde, en particulier dans les pays développés, depuis des années dans les hôpitaux, les écoles publiques et privées, les universités, les aéroports, les installations gouvernementales et les immeubles de bureaux privés, et dans les applications de refroidissement de procédés industriels. Plusieurs études de cas sont rapportées par l'AIE-HPC (1994), OCDE (1995), CEC (1996), ARI (1997), Mathaudhu (1999) et Dincer et Rosen (2001), qui démontrent comment ces systèmes TES permettent des économies d'énergie et réduisent l'impact environnemental. Ils illustrent quelques applications astucieuses des équipements dans des nouveaux bâtiments pour réduire les coûts initiaux.

IEA-HPC (1994). Energy storage, international energy agency, *Heat Pump Center Newsletter* 12(4), 8.

OECD (1995). *Urban Energy Handbook*, Organization for Economic Co-Operation and Development, Paris.

CEC (1996). Source Energy and Environmental Impacts of Thermal Energy Storage, Technical Report No. P500-95-005, California Energy Commission, California.

ARI (1997). Thermal Energy Storage: A Solution for Our Energy, Environmental and Economic Challenges, The Air-Conditioning and Refrigeration Institute, Arlington.

Mathaudhu, S.S. (1999). Energy conservation showcase, *ASHRAE Journal*, April, 44–46.

Dincer, I. and Rosen, M.A. (2001). Energetic, environmental and economic aspects of thermal energy storage systems for cooling capacity, *Applied Thermal Engineering* 21, 1105–1117.

Dans le présent exercice, l'attention se porte sur la possibilité de rafraîchir deux couvées de poulets pendant les périodes les plus chaudes de l'été au Québec. En effet, un poulet d'élevage arrivé à maturité (2.3 kg) dégage environ 7-8W de puissance (chaleur sensible), cette faible puissance unitaire multipliée par 20 000 à 25 000 animaux par étage d'un bâtiment avicole donne une charge thermique importante.

La Figure 1 illustre les variations annuelles de la température de consigne intérieure (rouge) et de la température mesurée extérieure (bleu). Cette figure montre 7 cycles d'élevage de 36 jours environ suivi de période de nettoyage ou le chauffage est arrêté.

En janvier, on note que jamais la température extérieure ne se rapproche de la consigne. Donc, malgré le dégagement de chaleur des animaux, point besoin de rafraîchir puisque les animaux et le gaz vont permettre de maintenir la consigne. Les données en rouge de la période inter élevage (jour 36 au jour 52) ne sont pas significative : dans cette période, le bâtiment est vide. Mais on constate qu'après les 3^e, 4^e et 5^e élevages, la température extérieure atteint ou dépasse la consigne souhaitée.

Puisque les animaux dégagent des kW de puissance, la solution consiste à ventiler, parfois avec des débits de 200 000 à 300 000 CFM, ce qui génère des factures d'électricité de plusieurs milliers de dollars.

Le projet consiste à concevoir un réservoir de neige suffisant pour climatiser les poulaillers lors des trois peaks de chaleur causés par la coïncidence de deux fins d'élevage et de température élevées.

On suppose que 80 % de toute l'énergie contenue dans la neige accumulée sera transférée dans l'échangeur.

La charge de climatisation est alors de 150 kW (7,5 W par animal x 20 000) pendant une période de 10 jours (10 jours x 24 heures/jour x 3600 s/heure) et ça trois fois.

On écrête la charge à partir du jour 25 des élevages à 100 kW (évacués par la ventilation). La charge à compenser par la fonte de la neige est de 50kW sur la période de 10 jours.

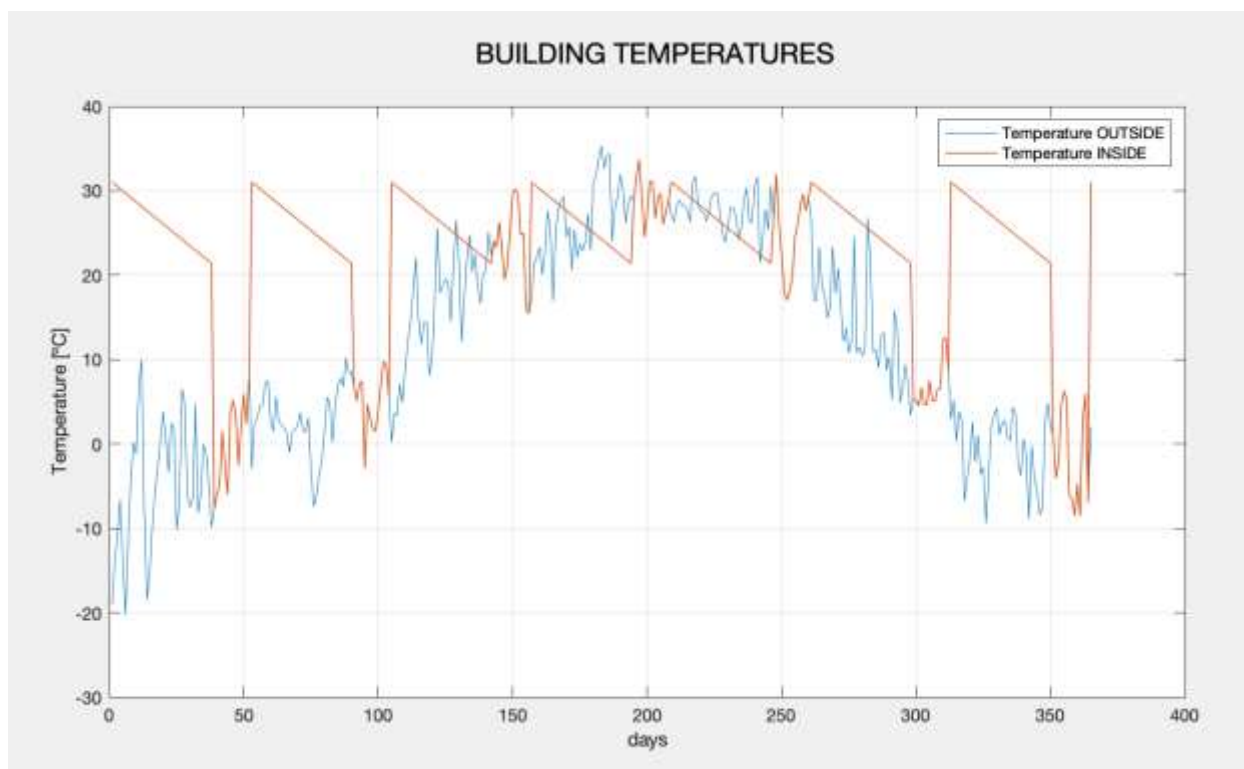


Figure 1 : 7 cycles d'élevages sur une année : T consigne (rouge) et T extérieure (bleu).

L'essentiel du projet repose sur la densité de la neige (Figure 2) dans un réservoir adjacent au bâtiment qui sera créé pendant l'hiver par les opérations de déneigement de l'aviculteur : il emploie la neige qu'il doit déplacer en hiver pour la mettre dans une fosse qui sera recouverte de bran de scie (isolation en avril). Pour les besoins de l'estimer, cette densité est estimée à 600 kg/m^3 . Ce qui correspond à une neige très dense de type névé.

L'expression « Firn », du suisse-allemand « de l'année dernière », faisant référence à du névé partiellement compacté, est un type de neige qui a été laissé des saisons passées et qui a été recristallisé en une substance plus dense que le névé. C'est la glace qui se trouve à un stade intermédiaire entre la neige et la glace glaciaire. LE « Firn » a l'apparence du sucre humide, mais a une dureté qui le rend extrêmement résistant au pelletage. Sa densité varie généralement de $0,4 \text{ g/cm}^3$ à $0,83 \text{ g/cm}^3$, et on le trouve souvent sous la neige qui s'accumule à la tête d'un glacier.

Le réservoir de stockage se retrouve donc dans un état voisin du « Firn » au début du printemps.

A small dataset showing the typical densities of snow and ice.

Typical densities of snow and ice (kg/m ³)	
New snow (immediately after falling in calm)	60-70
Damp new snow	100-200
Settled snow	200-300
Depth hoar	100-300
Wind packed snow	350-400
Firn	400-830
Very wet snow and firn	700-800
Glacier ice	830-917

Source: Paterson, W.S.B. 1994. *The Physics of Glaciers*.

Figure 2 : Densité de la neige en fonction de son état.

Schématiquement, ce type de système ressemble à ce qui a été installé à l'hôpital de Sundsvall en Suède et représenté à la Figure 3. Cependant, plutôt que d'installer un échangeur externe, l'eau à 2°C entre dans le bâtiment avicole et passe dans un échangeur eau-air à ailettes verticales dans le bâtiment avicole.

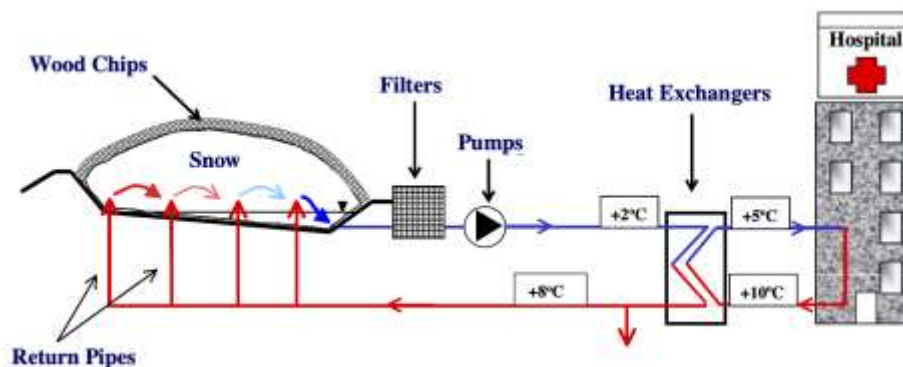


Figure 3 : Schéma du système typique avec boucle ouverte.

<http://advantage-environment.com/buildings/stored-snow-for-summer-cooling/>

Le Figure 4 montre l'énorme banque de neige (60 000 m³) de Sudsvall.



Figure 4 : Vue partielle du réservoir de stockage de froid de l'hôpital de Sundsvall, Suède

QUESTIONS

Données :

- Chaleur spécifique de fusion de la glace : $h_{sf} = 334 \text{ kJ/kg}$
- Densité de la neige type névé : $\rho_{\text{névé}} = 600 \text{ kg/m}^3$
- Densité de la neige type fraîche : $\rho_{\text{fraîche}} = 100 \text{ kg/m}^3$
- Coût marginale du kWh : $\text{Unit_cost} = 0,06 \text{ \$/kWh}$

Question 1 : Quelle doit être le volume de neige névé pour être en mesure d'absorber trois fois durant l'été les 50 kW de chaleur pendant 10 jours ? Attention de bien considérer l'efficacité de l'échangeur à 80%.

Question 2 : Si l'aviculteur aménage une tranchée de 1 m de profondeur et de 4 m de largeur, puis qu'il empile un mètre de neige de hauteur hors-sol (on suppose un réservoir de la forme d'un parallélépipède rectangle pour simplifier). Quelle doit être la longueur de la tranchée pour contenir ce réservoir ?

Question 3 : Combien de neige fraîche (100 kg/m³) en volume l'aviculteur doit-il empiler dans le réservoir ? Et s'il tombe 4 m de neige fraîche par an (durant l'hiver) quelle surface doit-il déneiger ?

Question 4 : Si on néglige les pertes, quelle est la valeur de l'électricité qui aurait été requise pour ventiler et extraire la chaleur émise par les oiseaux ? Dans quelle mesure le système est-il rentable ?

Question 5 : Quel devrait être le débit de pompage de l'eau pour que la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur soit de 4°C au maximum ($T_{in} = 2^\circ\text{C}$ et $T_{out} = 6^\circ\text{C}$) ?

RÉPONSES

Question 1 : Quelle doit être le volume de neige névée pour être en mesure d'absorber trois fois durant l'été les 50 kW de chaleur pendant 10 jours ? Attention de bien considérer l'efficacité de l'échangeur à 80%.

//Neige

$h_{sf} = 334$ //Spécific heat of fusion of ice, kJ/kg
 $\rho_{snow} = 600$ //Density of snow in the bank, kg/m³
 $E_{snow} = \rho_{snow} * Vol_{Snow} * h_{sf}$ //Energy retrieved from snow bank, kJ
 $E_{snow_kWh} = E_{snow} / 3600$ //Energy retrieved from snow bank, kWh

L'énergie qui sera fournie par la neige est simplement la masse de neige multipliée par la chaleur latente de fusion de la neige.

//Birds

$q_{maxbirds} = 50$ //Power (average) dissipated over the period, kW
 $t = 10 * 24 * 3600 * 3$ //Time of use, s
 $E_{birds} = q_{maxbirds} * t$ //Energy provided by the birds, kJ
 $E_{birds_kWh} = E_{birds} / 3600$ //Energy retrieved from snow bank, kWh

L'énergie produite par les oiseaux, qui doit être évacuée, est simplement le produit de la puissance à compenser (50kW) multipliée par la durée (10 jours) et le tout multiplié par trois car on désire avoir suffisamment de neige pour employer le stockage trois fois pendant l'été.

//Balance

$Eff = 0.8$ //Overall system efficiency, -
 $E_{birds} = Eff * E_{snow}$ //Energy balance, kJ
 $Losses = (1 - Eff) * E_{snow}$ //Energy losses, kJ

L'énergie produite par les oiseaux qui doit être évacuée correspond à une fraction de ce qui doit être retirée de la banque de neige en raison du rendement globale proposé pour le système complet.

Dans ce système d'équations, on trouve (avec les données et hypothèses formulées) que le volume de neige requis est de 808,4 m³ (Les oiseaux dégagent ou produisent 36 MWh et la neige en fondant absorbe 45 MWh d'énergie. Les pertes sont alors de 9 MWh sur les trois périodes de fonte).

Question 2 : Si l'agriculteur aménage une tranchée de 1 m de profondeur et de 4 m de largeur, puis qu'il empile un mètre de neige de hauteur hors-sol (on suppose un réservoir de la forme d'un parallépipède rectangle pour simplifier). Quelle doit être la longueur de la tranchée pour contenir ce réservoir ?

//Réservoir

$Depth = 1$ //Reservoir, depth, m
 $Height = 1$ //Reservoir, height, m
 $Width = 4$ //Reservoir, width, m
 $Vol_{Snow} = (Depth + Height) * Width * Length$ //Reservoir volume, m³

Un parallépipède rectangle de 2 x 4 x 101m est requis pour constituer un volume de neige de 808 m³. Cela constitue un réservoir plus long que le bâtiment lui-même.

Question 3 : Combien de neige fraîche (100 kg/m³) en volume l'aviculteur doit-il empiler dans le réservoir ? Et s'il tombe 4 m de neige fraîche par an (durant l'hiver) quelle surface doit-il déneiger ?

//Volume et surface à déneiger

$$\text{Vol_Snow_fresh} = \text{Vol_Snow} * 0.6 / 0.1$$

$$\text{Surface} = \text{Vol_Snow_fresh} / 4$$

Il doit déplacer 6 fois plus de neige fraîche que de neige ultimement compactée. Ceci représente 4850 m³ ou une surface de 1213 m² pendant l'hiver. Un travail considérable qui requiert davantage de travail que de déneiger l'accès au bâtiment.

Question 4 : Si on néglige les pertes, quelle est la valeur de l'électricité qui aurait été requise pour ventiler et extraire la chaleur émise par les oiseaux? Dans quelle mesure le système est-il rentable?

//Coût de l'énergie et PRI

$$\text{Unit_cost} = 0.06$$

//Unit energy cost of electricity, \$/kWh

$$\text{Cost} = \text{Unit_cost} * E_birds_kWh$$

//Corresponding energy valuer of the heat removed by the snow melt,

\$

Au coût marginal de 0,06\$/kWh, la valeur de l'énergie, si elle avait été extraite par un ventilateur, est de \$2160 ce qui indique (négligent les frais de fonctionnement du système à neige) que les économies engendrées pour rafraîchir les poulets seraient de 2160\$ pour la saison estivale. Ceci néglige le coût d'installation, l'intérêt sur l'argent emprunté pour réaliser le projet ou l'intérêt sur l'argent qui aurait été placé si l'installation était payée comptant, les frais de récolte de la neige supplémentaires aux frais de déneigement normaux, les frais d'achat ou de production de bran de scie pour isoler le réservoir de neige, les frais de nettoyage du filtre à la fin de l'été, etc.

Question 5 : Quel devrait être le débit de pompage de l'eau pour que la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur soit de 4°C au maximum (T_{in} = 2°C et T_{out} = 6°C)

Pour répondre à cette question, il faut effectuer un certain nombre d'hypothèses. Il a été spécifié que les pertes entre le réservoir de neige qui fond et la charge à évacuer sont de 80%. Pour poursuivre le raisonnement, il faut considérer la partie de l'énergie contenue dans la neige qui équilibre toutes les pertes/gains thermique :

- 1) les gains en provenance du sol (le sol injecte de l'énergie qui fait fondre la neige) ;
- 2) les gains en provenance de la pluie qui tombe (et vient faire fondre la neige) ;
- 3) les gains de surface par convection et rayonnement du bran de scie avec le soleil, l'environnement et l'air (qui aussi en générale contribuent de manière prépondérante aux pertes de pouvoir rafraichissant) ;
- 4) les pertes intrinsèques de l'échangeur (ici ce sont des pertes, enfin des gains thermiques dans la tuyauterie et le fait que L'échangeur ne peut être efficace à 100%).

Pour simplifier le problème, il sera considéré que ces pertes (ou gains) sont toutes égales (donc 5%) entre elles. Ainsi, les puissances moyennes en fonctionnement du système sont exprimées telles que :

//Puissances

```

q_snow = q_maxbirds/Eff //Power (average) delivered by snowmelt, kW
q_ground = 0.05*q_snow //Power (average) delivered by the ground, kW
q_rain = 0.05*q_snow //Power (average) delivered by the falling rain on the reservoir, kW
q_surface = 0.05*q_snow //Power (average) delivered by the surface exposed to sunlight and
warm air, kW
q_HX =0.05*q_snow //Power (average) losses by the heat exchanger and piping, kW
q_check = q_maxbirds+q_ground+q_rain+q_surface+q_HX-q_snow //Balance check
    
```

La dernière équation ici indique un bilan qui doit être égal à 0 si tout est correctement implanté.

Ainsi, si globalement le rendement est de 80%, 15% des pertes ont lieu en raison du sol, de la surface et de la pluie, les 5% restant étant perdues dans l'échangeur et la tuyauterie. Il entre donc 85% (pas 80%) de la puissance de fonte dans l'échangeur côté eau. Puisque la puissance à l'échangeur est donnée par le débit massique x la chaleur spécifique massique x la différence de température entre l'entrée et le sortie, le débit massique est alors de 11,38 kg/heure.

//Accroissement de la température de l'eau

```

DeltaT_eau = 4 //Maximum temp difference on the water side, oC
E_snow = E_ground+E_surface+E_rain+E_birds+E_HX //Energy retrieved from snow bank, kJ
E_ground = 0.05*E_snow //Energy gain by the ground conduction, kJ
E_rain = 0.05*E_snow //Energy gain by the rain falling on the reservoir, kJ
E_surface = 0.05*E_snow //Energy gain by the surface exposed to sunlight and warm air, kJ
E_eau =0.85*E_snow
E_eau = M_eau*4200*DeltaT_eau //Mass of water to be circulated, kg
Mdot_eau = M_eau/t //Average mass flow rate of water to be circulated, kg/s
Mdot_eau_hlourly = Mdot_eau*3600 //Average mass flow rate of water, kg/hr
q_eau = Mdot_eau*4200*DeltaT_eau
q_check2 = 0.85*q_snow-q_eau
    
```