

17. Stockage de l'énergie

17.5 – Stockage thermique sensible

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

Département de génie mécanique

Victor Aveline, M.ing.

Jérémy Léger, M.ing.

Pierre-Luc Paradis, M.Sc.A.

Patrick Belzile, ing., M.ing.

Stéphane Hallé, M.Sc.A., Ph.D.



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définition et caractéristiques
- Stockage avec de l'eau
- Stockage dans les matériaux de construction
- Stockage souterrain
- Stockage de la chaleur issue du soleil
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Définitions et caractéristiques
- Stockage avec de l'eau
- Stockage dans les matériaux de construction
- Stockage souterrain
- Stockage de la chaleur issue du soleil
- Conclusion

Introduction et objectifs

- Le stockage thermique est une grande composante du stockage d'énergie.
- Il est utilisé de plusieurs manières différentes
 - Stockage d'énergie
 - Sensible
 - Latent
 - Stockage de froid
 - Stockage thermochimique
- Pour des applications diverses et pour des quantités d'énergie stockées très variables.
- En anglais : *thermal energy storage (TES)*

Introduction et objectifs

- L'énergie thermique peut se stocker sous sa forme propre, mais étant la forme la plus dégradé de l'énergie, il reste complexe de la stocker et encore plus complexe de la convertir en une autre forme d'énergie par la suite;
- Ce cours aborde les technologies de stockage sensible;
- Une même technologie de stockage sensible peut être utilisée à différentes échelles de temps sur la durée du stockage.

Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
 - Définir le principe du stockage thermique sensible;
 - Donner les différentes technologies associées à cette forme de stockage;
 - Donner des exemples d'applications;
 - Présenter les évolutions possibles du domaine.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Définitions et caractéristiques***
- Stockage avec de l'eau
- Stockage dans les matériaux de construction
- Stockage souterrain
- Stockage de la chaleur issue du soleil
- Conclusion

Définitions et caractéristiques

- La plus ancienne utilisation d'un stockage thermique sensible remonte à **des milliers d'années**;
- L'eau et le feu sont naturellement incompatible. Avant la métallurgie, faire bouillir de l'eau était compliqué:
 - Les premiers hommes ont alors pensé à un procédé itératif étonnant pour briser ce verrou technique : faire chauffer des pierres dans un foyer, les immerger dans l'eau contenue dans une peau et répéter l'opération jusqu'à ébullition



Définitions et caractéristiques

- Le mot « sensible » est employé car la quantité d'énergie stockée est « sensible » à la variation de la température;
- Plus le potentiel de température est élevé, plus est importante la quantité d'énergie potentiellement stockée;
- Le stockage thermique permet de gérer des incompatibilités ou des déphasages entre une source énergétique et les usages attendus;
- En anglais, le stockage thermique sensible se traduit par *sensible thermal energy storage* (STES).

Définitions et caractéristiques

- Il n'y a pas de changement de phase des matériaux, seulement un changement de température à l'intérieur du système : la chaleur spécifique, $c_p (J/kg.K)$ est donc une caractéristique très importante en plus des températures minimale et maximale;
- Ce sont donc des systèmes de stockage soit liquide, soit solide, les gaz ne sont pas utilisés pour stocker de la chaleur pure car la quantité dépend de la masse et de c_p qui sont en général trop faibles avec les gaz. Sauf, dans le cas de la vapeur d'eau mais c'est pour ultérieurement la faire condenser.

Définitions et caractéristiques

- Puisque l'on emploie le plus souvent des solides et des fluides, dans l'expression de la chaleur spécifique, c_p , l'indice p est souvent omis car elle ne varie pas avec la pression;
- L'énergie thermique est souvent associée à la variable Q ;
- L'énergie thermique sensible stockée dans une masse m d'un matériau (ou un volume V) est alors donnée par

$$E = m c_p (T_{finale} - T_{initiale})$$

$$Q = \rho V c (T_{finale} - T_{initiale})$$

Définitions et caractéristiques

- Plusieurs matériaux fluides peuvent alors être utilisés pour du stockage thermique sensible :
 - eau, eau + adjuvants : eau chaude domestique (ECD) ou sanitaire (ECS);
 - huiles ($T < 400^{\circ}\text{C}$) : centrales électriques solaires en CP;
 - sels fondus ($T > 400^{\circ}\text{C}$) : centrales électriques solaires à tour;
 - métaux fondus (550°C sodium);
 - vapeur d'eau (250°C) : centrale PS10 Séville;
 - coulis de glace : stockage de froid;
 - suspensions de micronodules.

Définitions et caractéristiques

- Plusieurs matériaux fluides peuvent alors être utilisés pour du stockage thermique sensible :

matériau	Masse volumique kg/m ³	Cp J/(kg K)	λ W/(m K)	Capacité volumique kWh/(m ³ K)
Eau liquide	1000	4186	0.6	1.16
Eau vapeur	-	1864->	0.018->	-
Huile	700-900	1700-2700	0.1-0.7	0.33 – 0.68
Sel fondu	900-2600	1500	0.15-2.0	0.37 – 1.08



http://www.asprom.com/stockage_energie/olives.pdf

Définitions et caractéristiques

- Durée de stockage:
 - Courte durée (heures, jours, semaines, mois):
 - Réservoirs d'eau, roche, sol
 - Longue durée (saisons, années):
 - Grands réservoirs d'eau, roche, sol, bassins solaires, aquifères

Question

- Combien d'énergie est relâchée par une roche de 2 kg passant de 120°C à 20°C et ayant une chaleur spécifique de 1000 J/kg.K?
 - A. 2 00 kJ
 - B. 100 000 kJ
 - C. 55 Wh
 - D. 50 000 J
 - E. 200 Wh



ENR2020

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions et caractéristiques
- ***Stockage avec de l'eau***
- Stockage dans les matériaux de construction
- Stockage souterrain
- Stockage de la chaleur issue du soleil
- Conclusion

Stockage avec de l'eau

- **L'exemple le plus simple : le chauffe-eau domestique à réservoir**

- Stockage de l'eau chaude sanitaire
- Plus de 80% de l'énergie consommée dans le secteur résidentiel est due au chauffage;
 - Volume = 60 gal (≈ 280 L) ou 40 gal
 - $C_{p_{H_2O}} = 4183$ J/kg.K
 - Stratification : $T_{\text{réservoir}} = 60^\circ\text{C}$; $T_{\text{in}} = 8^\circ\text{C}$; $T_{\text{shower}} = 40^\circ\text{C}$
 - Débit = 50 L/min
- Doit maintenir une température de 60°C minimum pour éviter le développement de la légionnelle;
- Pertes thermiques continues.

Exemple comportant trois éléments de chauffage



Stockage avec de l'eau

- **Le réservoir est-il indispensable?**

- Le chauffe-eau instantané: pas de pertes liées au stockage, moins de tuyauterie et pas d'isolation des conduites

- Fonctionne à l'électricité ou au gaz



- Autre variante: le chauffe-eau thermodynamique

- une pompe à chaleur air-eau couplée à un réservoir

Stockage avec de l'eau

- A plus petite échelle la bouillote



A l'image d'un réservoir de 60 gallons, il est possible d'emmagasiner de la chaleur dans de l'eau pour l'utiliser de manière décalée dans le temps où à un autre endroit;

Sauf qu'ici, isoler thermiquement le système de stockage n'est pas recherché, le système doit plutôt restituer sa chaleur.

L'isolation ici va dépendre du temps de décharge que l'on veut donner au système selon la température de l'eau à l'intérieur.

Stockage avec de l'eau

- **Comment se décharge cette batterie thermique?**

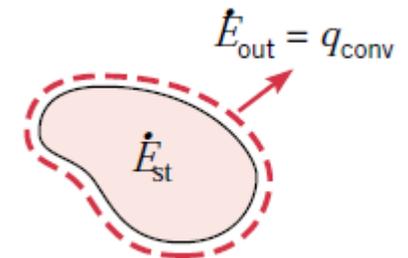
- Il faut d'abord reconnaître que le problème est **instationnaire**, transitoire i.e que les conditions varient dans le temps;
- En fait, non seulement en tirant de l'énergie du réservoir va-t-on faire **diminuer sa température** mais les propriétés du matériaux (ici sa chaleur spécifique, sa densité, sa viscosité (si liquide)) vont **changer** dans le temps (en première approximation, des valeurs constantes pour les propriétés sont employées);
- Et la température qui au départ pouvait être **uniforme** dans l'espace ne changera peut-être pas (**en fait presque jamais**) partout de la même manière;
- Lorsque la température de surface d'un matériau change, sa température à l'intérieur va se mettre à changer aussi.

Stockage avec de l'eau

- **Comment se décharge cette batterie thermique?**
 - A partir du moment où un bloc de matériau solide ou un réservoir contenant liquide est exposé en surface à une température différente de sa température initiale, il va **progressivement changer de température** jusqu'à atteindre un état permanent nouveau où sa nouvelle température sera **égale** à celle à laquelle il est exposé;
 - Si par exemple une masse de béton (souvent un plancher ou un mur) dans une résidence a été portée à haute température pendant le jour par un rayonnement solaire intense, cette masse se refroidira progressivement pendant la nuit et transférera l'énergie accumulée le jour à l'environnement dans lequel elle se trouve (il s'agit ici d'un **système passif**);
 - Un circuit d'eau avec réservoir peut aussi être couplé à la masse béton pour augmenter la capacité thermique de l'ensemble et contrôler le taux de décharge (il s'agit alors d'un **système actif**).

Stockage avec de l'eau

- **Comment se décharge cette batterie thermique?**
 - Le **modèle de transfert d'énergie le plus simple** est celui d'une masse que l'on plonge dans un environnement à température inférieure (ça fonctionne aussi dans le cas inverse) pour laquelle **on suppose que la température reste uniforme** dans tout le volume pendant le processus de refroidissement;
 - C'est comme si on supposait une conductivité très élevée qui permettrait au solide de se mettre instantanément en équilibre avec la nouvelle température de surface;
 - À ce moment, l'énergie accumulée sera progressivement évacuée par convection par exemple (pour l'instant on néglige le rayonnement);



Stockage avec de l'eau

- **Comment se décharge cette batterie thermique?**

- Un bilan d'énergie donne alors

$$-\dot{E}_{\text{out}} = \dot{E}_{\text{st}}$$

$$-hA_s(T - T_\infty) = \rho Vc \frac{dT}{dt}$$

- Avec $\theta = T - T_\infty$, où le symbole ∞ indique le milieu ambiant, on a que :

$$\frac{\rho Vc}{hA_s} \frac{d\theta}{dt} = -\theta$$

- En séparant les variables, et en intégrant à partir de la condition initiale:

$$\frac{\rho Vc}{hA_s} \ln \frac{\theta_i}{\theta} = t$$

ou

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp \left[- \left(\frac{hA_s}{\rho Vc} \right) t \right]$$

Ne pas oublier que l'on suppose qu'une seule température uniforme caractérise l'accumulateur d'énergie thermique

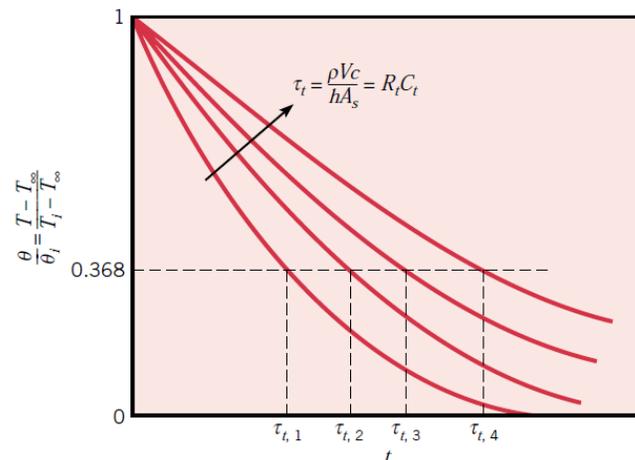
Stockage avec de l'eau

- **Comment se décharge cette batterie thermique?**

- La forme de cette équation nous indique (ce qu'intuitivement on aurait pu appréhender) que la variation de la température sera exponentielle:

- Au début, la température du corps va diminuer rapidement
- Puis, vers la fin, la température va tendre vers celle du milieu ambiant asymptotiquement.

- Ceci est représenté par le graphique suivant:



où la constante de temps thermique est donnée par

Résistance au transfert d'énergie

$$\tau_t = \left(\frac{1}{h A_s} \right) (\rho V c) = R_t C_t$$

Capacitance

Stockage avec de l'eau

- **Comment se décharge cette batterie thermique?**

- Pour déterminer la quantité d'énergie qui a été échangée à un moment t , il faut simplement intégrer de 0 à t tel que:

$$Q = \int_0^t q dt = hA_s \int_0^t \theta dt \quad \text{ou encore} \quad Q = (\rho Vc)\theta_i \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_t}\right) \right]$$

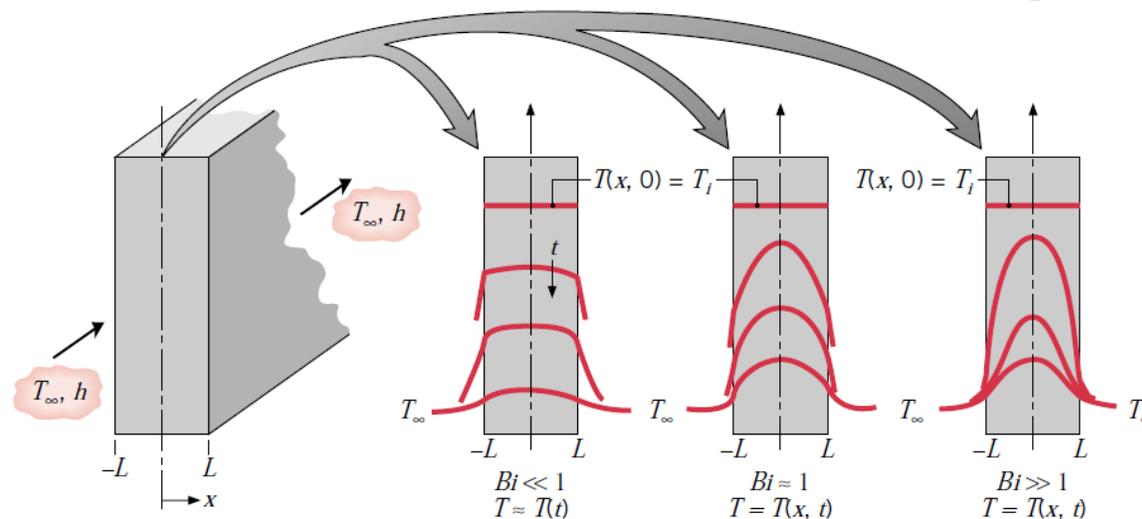
- Et bien sûr, lorsque tout le corps est à la température du fluide

$$Q = (\rho Vc)\theta_i$$

- Ce qui est équivalent à ce qui est indiqué sur la page 11 de cette présentation.

Stockage avec de l'eau

- **Comment se décharge cette batterie thermique?**
 - Cette solution est simple mais, en général, elle est (**hélas**) fautive;
 - C'est que la température DANS le solide n'est pas uniforme pendant le processus de refroidissement (ou de chauffage);
 - Pour que la validité soit presque assurée, il faut que le rapport hL/k soit $< 0,1$ et ce rapport se nomme le nombre de Biot. L est ici une longueur caractéristique.



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions et caractéristiques
- Stockage avec de l'eau
- ***Stockage dans les matériaux de construction***
- Stockage souterrain
- Stockage de la chaleur issue du soleil
- Conclusion

Stockage dans les matériaux solides

- Solides choisis
 - Brique;
 - Béton et pierre;
 - Sol avec pierres.
- Applications
 - Stockage saisonnier (sol);
 - Stockage horaire;
 - Stockage journalier.

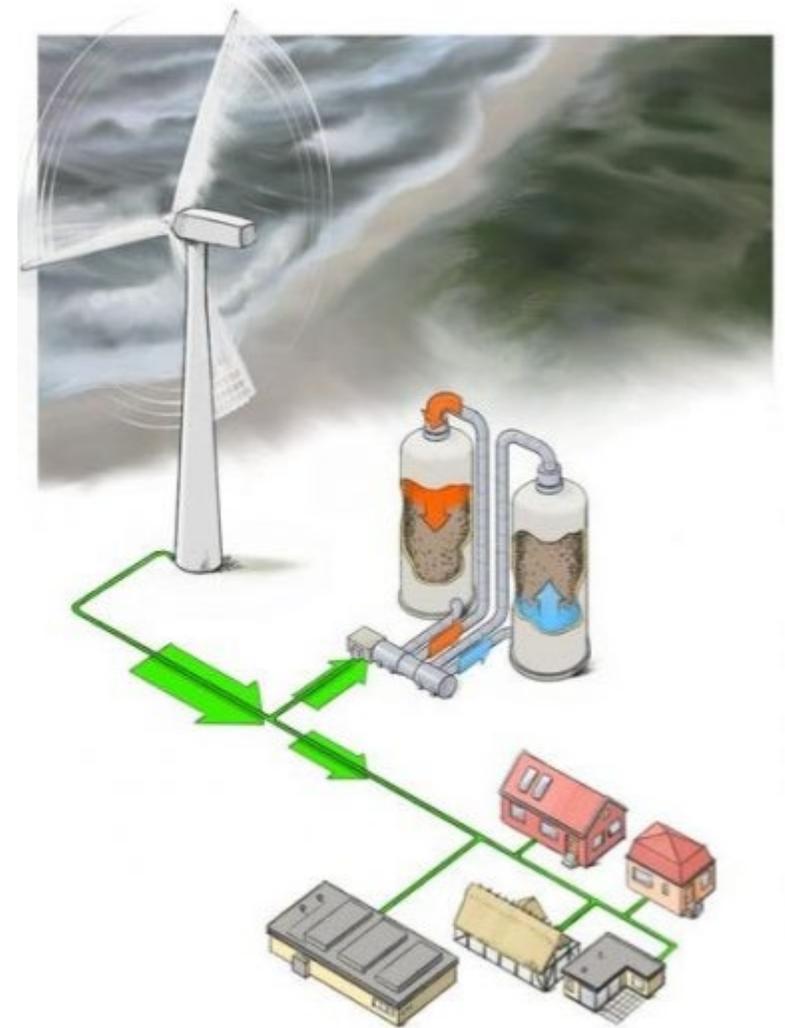
Table 3.6 Thermal capacities at 20 °C of some common TES materials

Material	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg K)	Volumetric thermal capacity (10 ⁶ J/m ³ K)
Clay	1458	879	1.28
Brick	1800	837	1.51
Sandstone	2200	712	1.57
Wood	700	2390	1.67
Concrete	2000	880	1.76
Glass	2710	837	2.27
Aluminum	2710	896	2.43
Iron	7900	452	3.57
Steel	7840	465	3.68
Gravelly earth	2050	1840	3.77
Magnetite	5177	752	3.89
Water	988	4182	4.17

Source: Norton (1992).

Stockage dans les matériaux solides

- Exemple Danois
 - La technologie GridScale consiste à chauffer et à refroidir du basalte, broyé en minuscules pierres de la taille d'un pois, dans un ou plusieurs ensembles de réservoirs en acier isolés.
 - L'installation de stockage est chargée par un système de compresseurs et de turbines, qui pompe l'énergie thermique d'un ou plusieurs réservoirs de stockage remplis de pierres froides vers un nombre similaire de réservoirs de stockage remplis de pierres chaudes, lorsqu'il y a un surplus d'énergie provenant du vent ou du soleil.



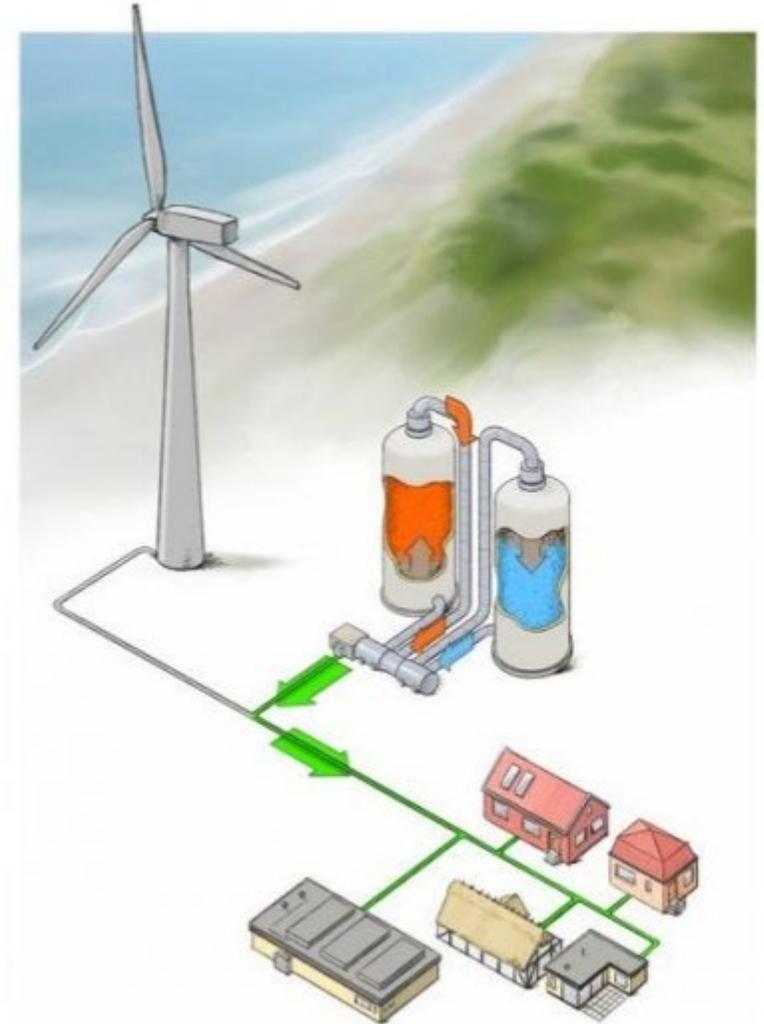
Stockage dans les matériaux solides

- Exemple Danois

- Cela signifie que les pierres dans les réservoirs froids deviennent très froides, alors qu'elles deviennent très chaudes dans les réservoirs chauds; en fait jusqu'à 600°C.
- La chaleur peut être stockée dans les pierres pendant plusieurs jours, et le nombre d'ensembles de réservoirs remplis de pierres peut varier, en fonction de la durée de stockage requise.
- *Note: Les pierres pourraient être remplacées en principe par un liquide qui peut ou non changer de phase. On choisirait de l'huile thermique ou des sels fondus.*

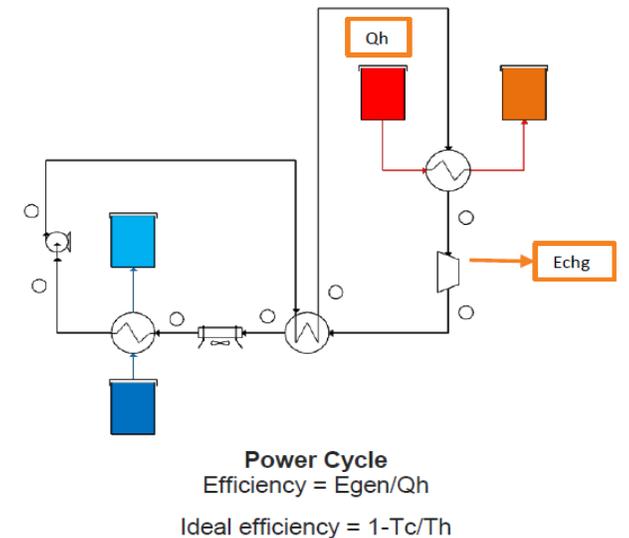
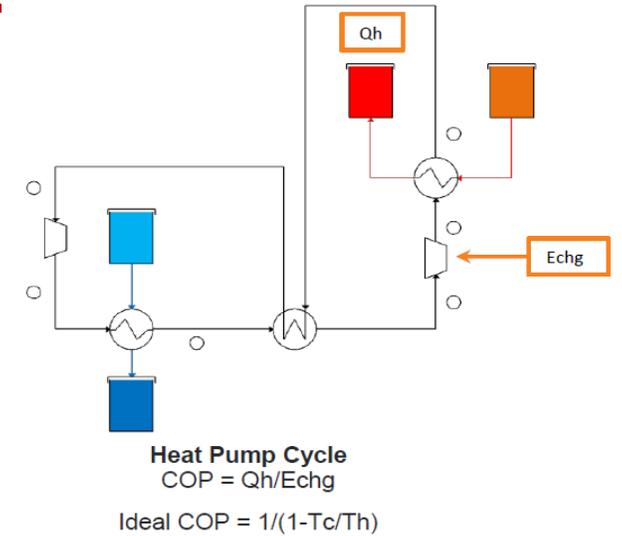
Stockage dans les matériaux solides

- Exemple Danois
 - Lorsqu'il y a à nouveau une demande d'électricité, le processus s'inverse, de sorte que les pierres dans les réservoirs chauds deviennent plus froides alors qu'elles deviennent plus chaudes dans les réservoirs froids.
 - Le système est basé sur un matériau de stockage bon marché et une technologie mature et bien connue pour la charge et la décharge.



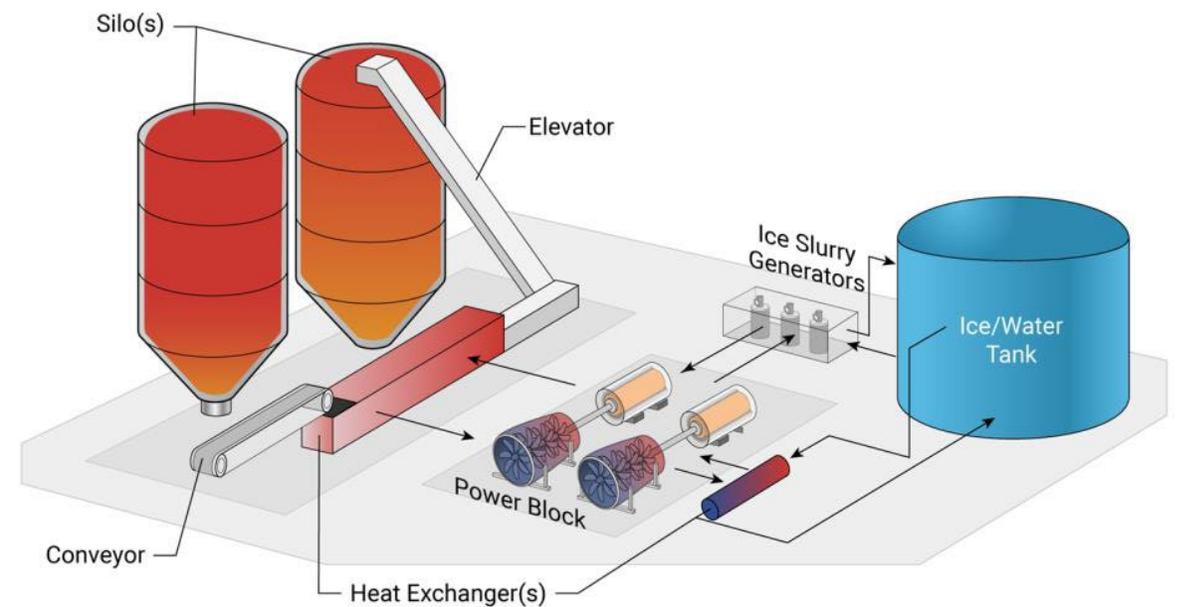
Stockage dans les matériaux solides

- Exemple EchoGen
 - Un autre exemple de stockage sensible à haute température pour générer de l'électricité;
 - Stockage d'énergie de longue durée (> 4-6 heures) de plus en plus important;
 - «stockage d'énergie électro-thermique» (ETES) basé sur le développement révolutionnaire du CO₂ supercritique commercial;
 - ETES stocke l'énergie électrique sous forme d'énergie thermique sensible.



Stockage dans les matériaux solides

- Exemple EchoGen
 - ETES stocke l'énergie électrique sous forme d'énergie thermique;
 - Matériaux peu coûteux, sûrs et respectueux de l'environnement;
 - ETES ne nécessite pas de lacs sur des montagnes ou des trous géants dans le sol pour l'installation;
 - Echogen recherche des partenaires pour construire une usine de démonstration à l'échelle commerciale.

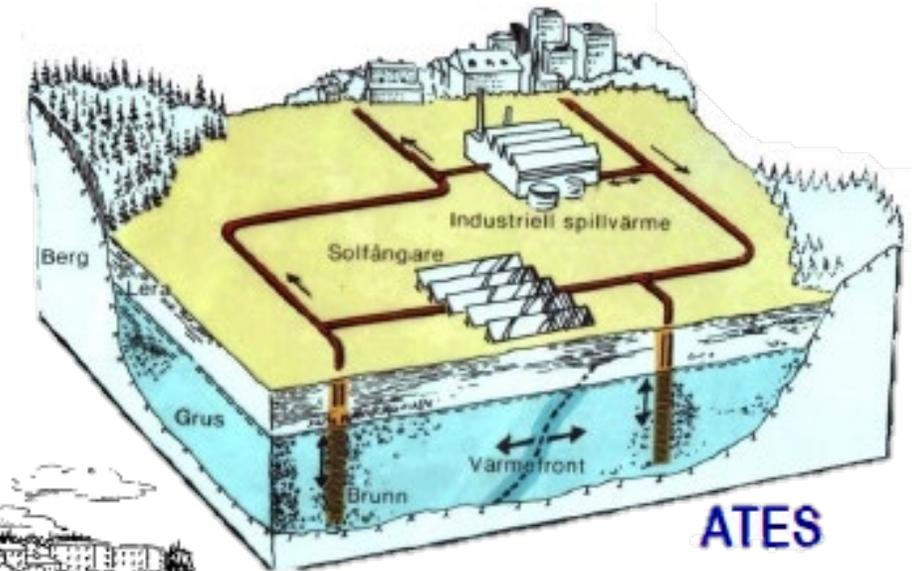
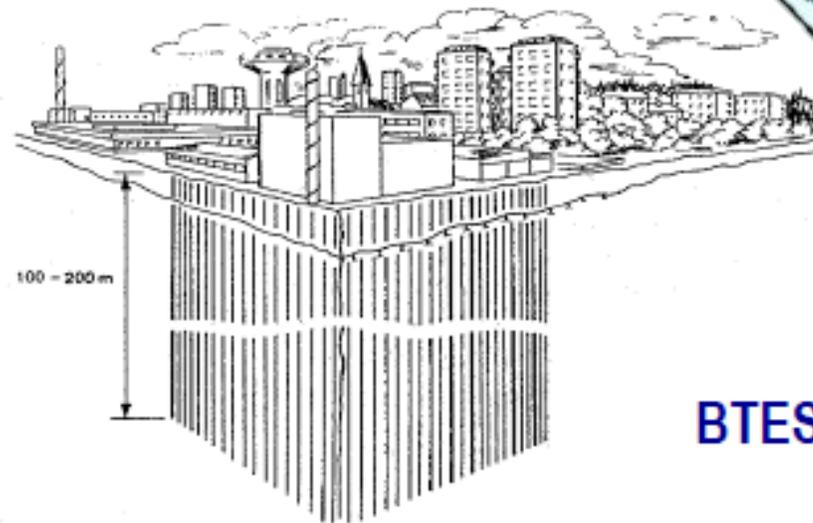
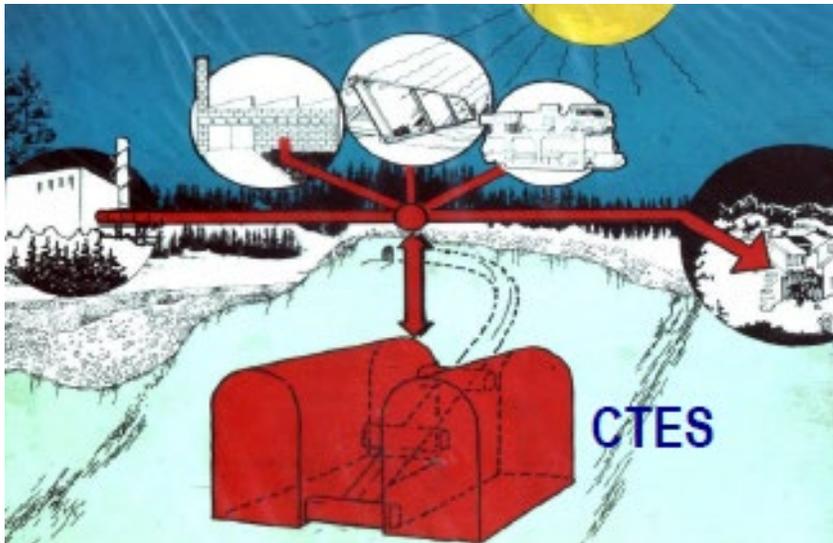


Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions et caractéristiques
- Stockage avec de l'eau
- Stockage dans les matériaux de construction
- ***Stockage souterrain***
- Stockage de la chaleur issue du soleil
- Conclusion

Stockage souterrain

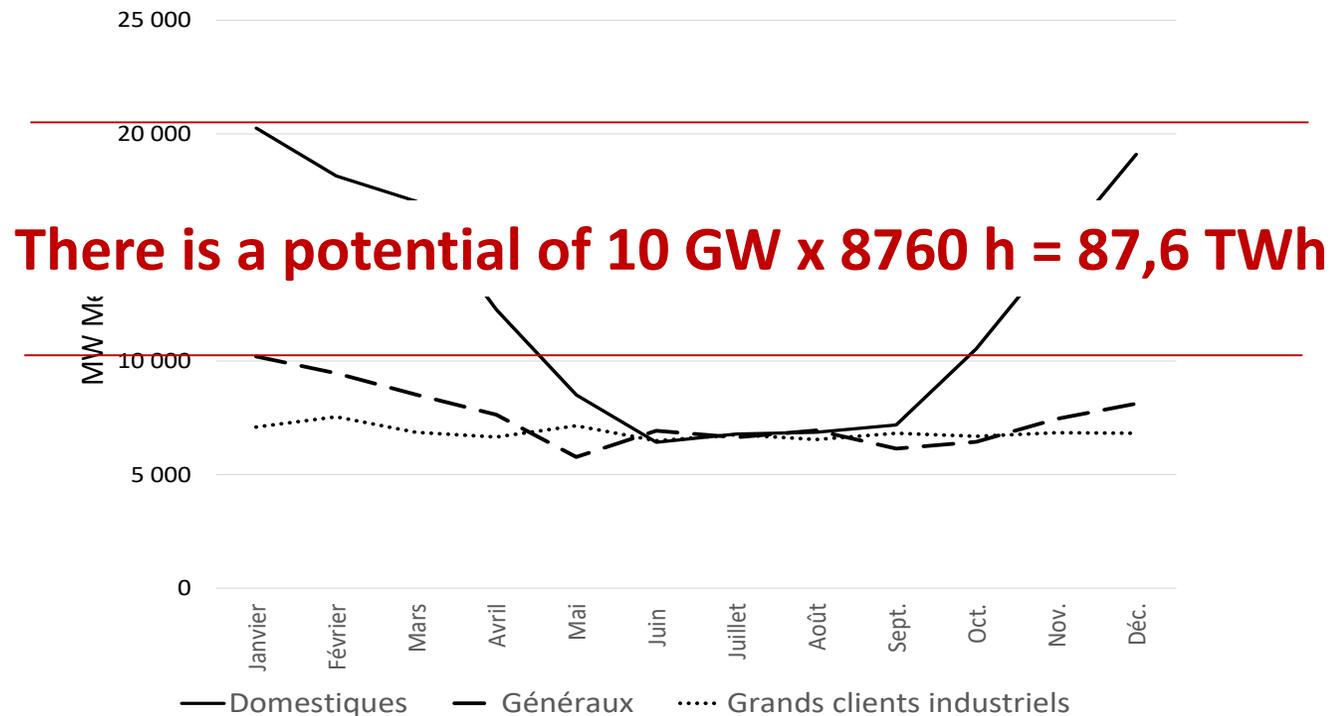
- Stockage de chaleur souterrain (UTES) : stockage saisonnier
 - Aquifer thermal energy storage (ATES)
 - Borehole thermal energy storage (BTES)
 - Cavern thermal energy storage (CTES)



Source : Paksoy H.O., 2013

Stockage souterrain

- Pourquoi du stockage saisonnier?
- Situation de la charge d'Hydro-Québec en 2017



Coincidental monthly power by categories of consumers

Question

- Parmi les propositions suivantes, quel matériau possède la plus grande capacité thermique volumétrique (en $\text{J}/\text{m}^3\cdot\text{K}$)?
 - A. L'eau
 - B. La brique
 - C. Le bois
 - D. L'acier
 - E. Le verre



ENR2020

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions et caractéristiques
- Stockage avec de l'eau
- Stockage dans les matériaux de construction
- Stockage souterrain
- ***Stockage de la chaleur issue du soleil***
- Conclusion

Stockage de la chaleur issue du soleil

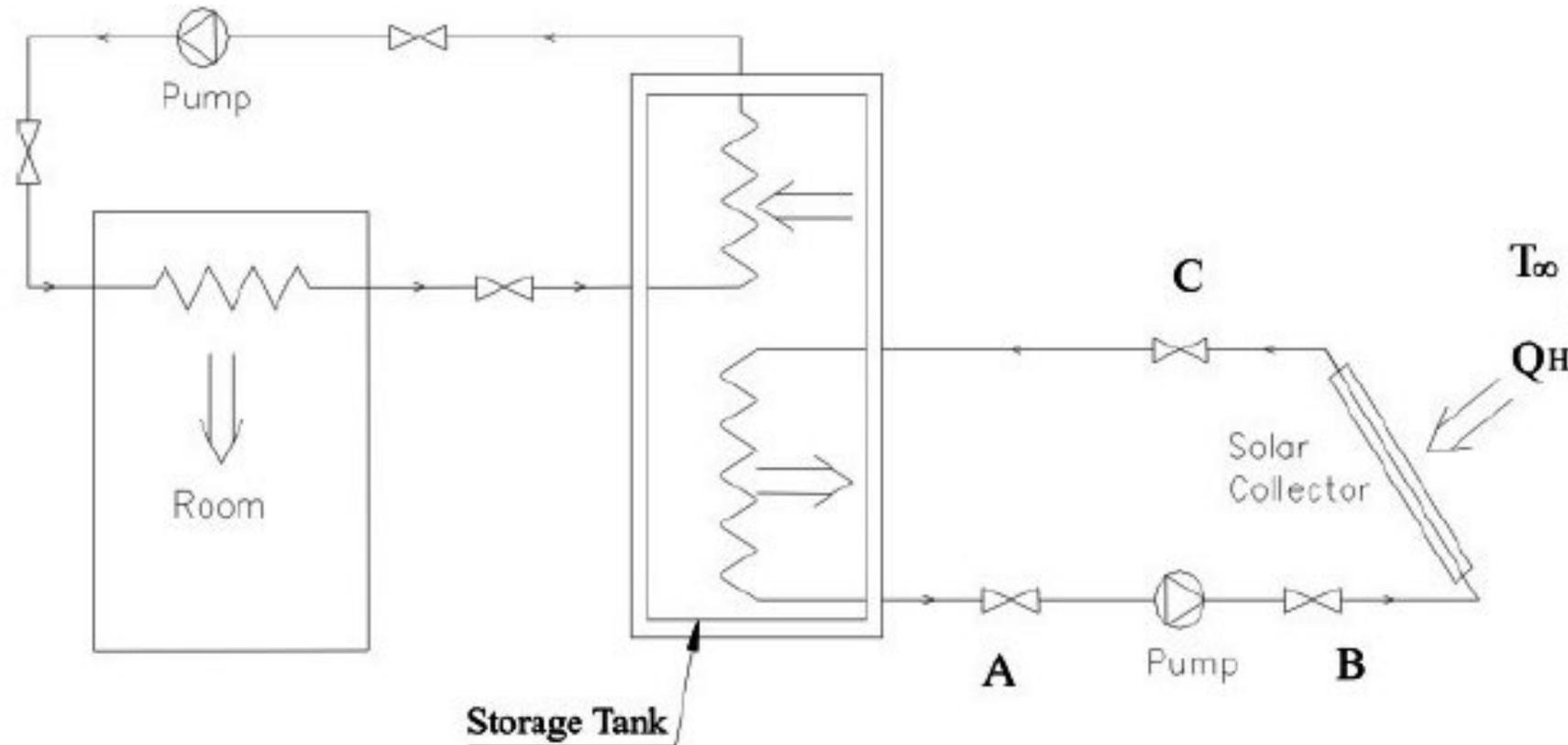
- Les panneaux solaires thermiques
 - Le chauffe-eau solaire individuel, placé en toiture et alimentant un ballon à eau par des canalisations isolées
 - Couvre 50% ou plus des besoins en ECS
 - Le chauffe-eau solaire collectif, beaucoup plus intelligent!!



https://www.ecosources.info/dossiers/Chauffe-eau_solaire_individuel_CESI

Stockage de la chaleur issue du soleil

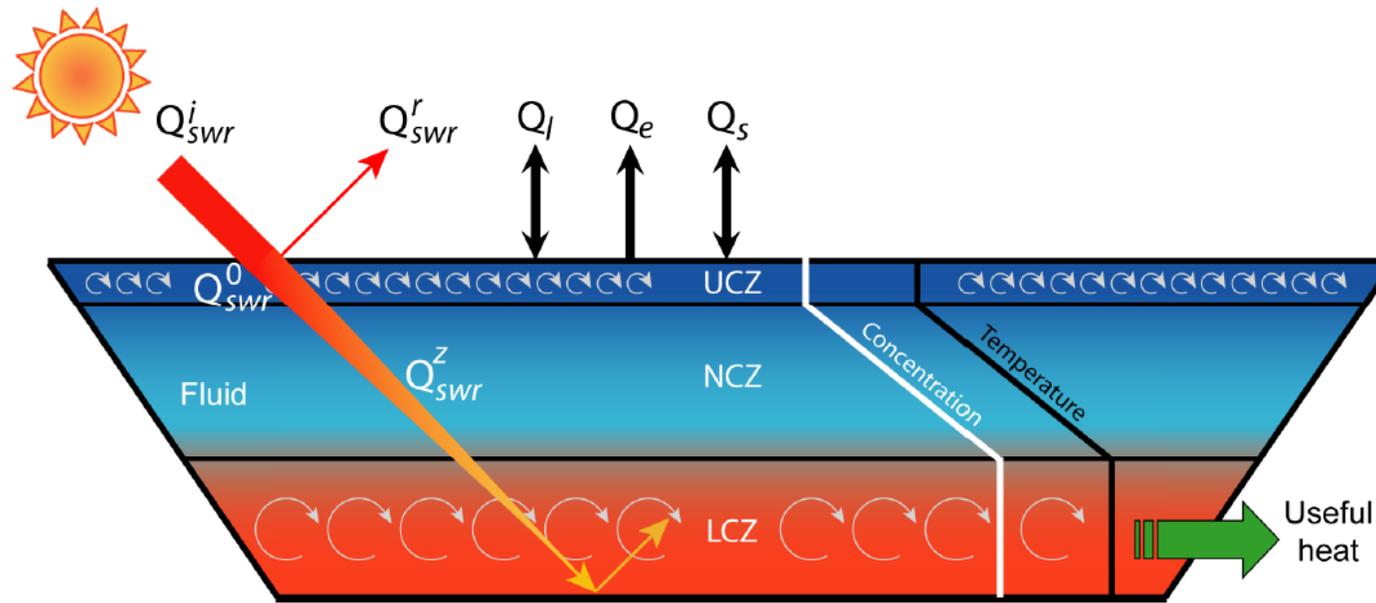
- Les panneaux solaires thermiques



O. Ercan Ataer, Storage of Thermal Energy, Energy Storage Systems.

Stockage de la chaleur issue du soleil

- Dans des étangs solaires (solar ponds)

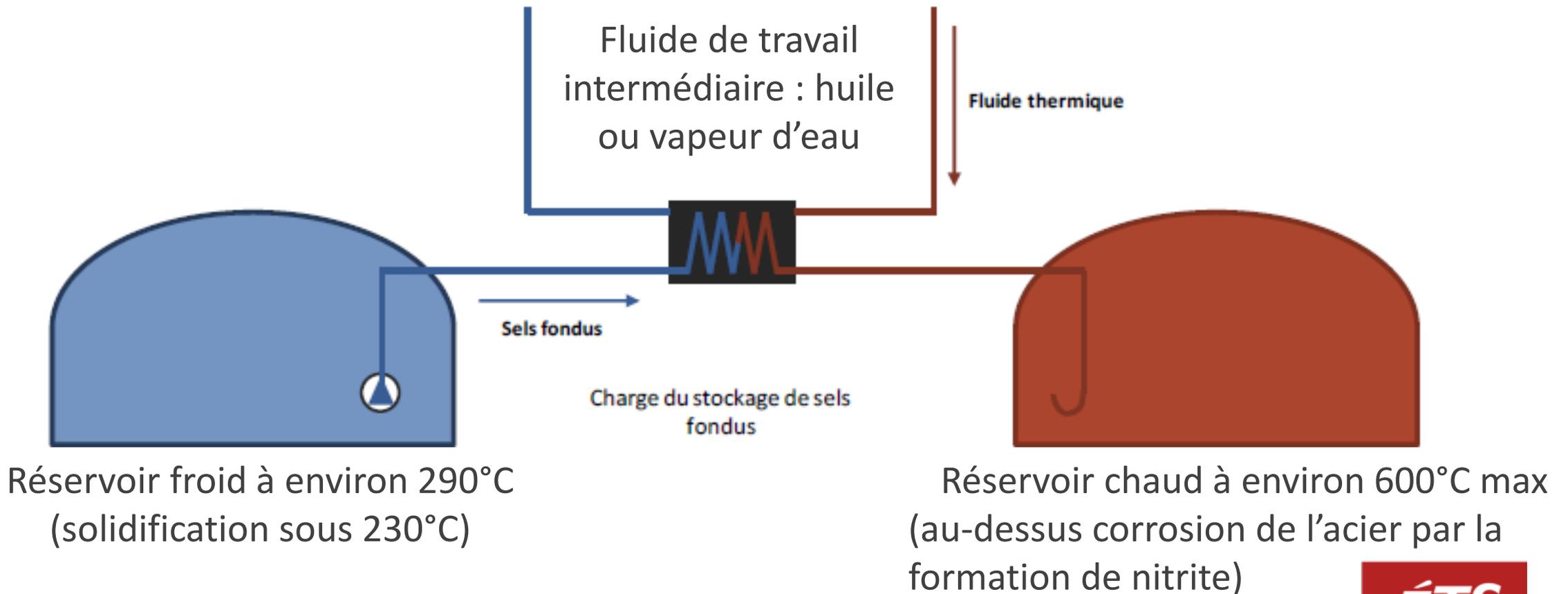


Ref.: Poche, F..

Stockage de la chaleur issue du soleil

- **Stockage avec des sels fondus**

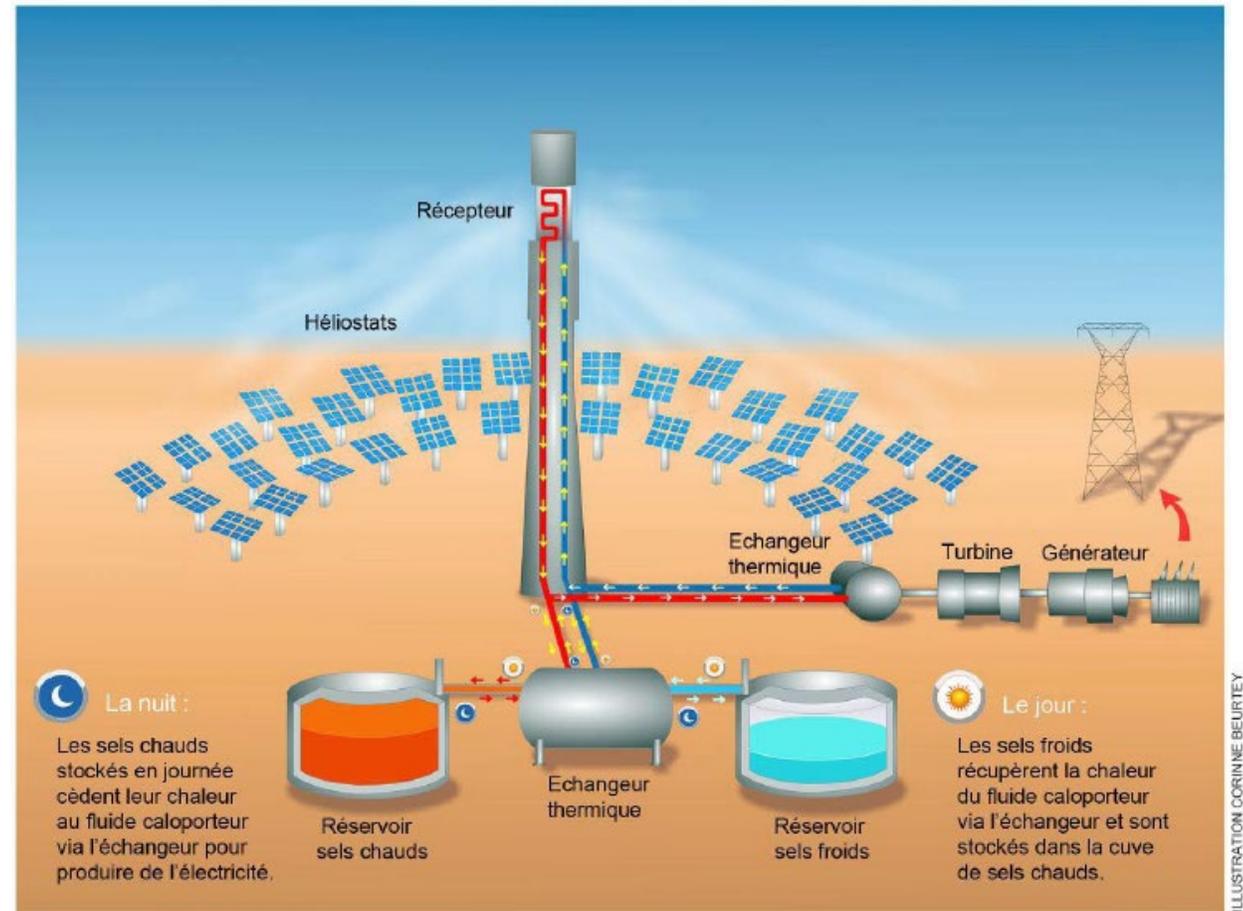
- Généralement un mélange de nitrate de sodium et nitrate de potassium



Stockage de la chaleur issue du soleil

- Sels fondus dans des centrales à CSP

- Prévission de développement du CSP pour 2050: 11% de la production mondiale d'électricité (IEA, 2014);
- Il faudrait alors consommer 30 fois la production annuelle mondiale de ces sels;
- Question de la disponibilité de la ressource: le marché de ces sels est déjà saturé (notamment pour les engrais).



Stockage de la chaleur issue du soleil

- **Exemples : Solana solar generating plant, Arizona, USA**
 - 280 MW, 6h de stockage avec des sels fondus



Stockage de la chaleur issue du soleil

- Exemples : La communauté solaire de Drake Landing

DRAKE LANDING SOLAR COMMUNITY OKOTOKS
Innovation. Vision. Integrity.

home | about DLSC | awards | photos | partners | links | contact us

- how it works
- the homes
- solar collection
- district heating system
- energy centre
- borehole thermal energy storage
- view DLSC animation
- publications

System's Current Conditions through the website and the App was discontinued on June 30, 2019

Energy Globe
The world award for sustainability

How it Works

- 52-house subdivision to have space and water heating supplied by solar energy
- Solar energy captured year round by 800-panel garage mounted array
- Combination of seasonal and short-term thermal storage (STTS) facilitate collection and storage of solar energy in the summer for use in space heating in winter
- Borehole thermal energy storage (BTES) is an in-ground heat sink for seasonal energy storage
- Short-term thermal storage (STTS) tanks are central hub for heat movement between collectors, district loop (DL)/houses, and (BTES)
- DL moves heat from the STTS to the houses

Location: Okotoks, Alberta. 51.1 deg N, 114 deg W, 1084 m elevation
Weather: Winter -33 C; Summer 28.3 C DB/15.6 C WB

Capturing the Solar Thermal Energy

An array of 800 solar panels located on garage roofs throughout the community generate 1.5 mega-watts of thermal power during a typical summer day and supply heat to the district heating system.

From sunrise to sunset, the solar panels absorb the Sun's energy and heat a glycol solution running through an insulated piping system, or collector loop, that connects the array of collectors.

Solar energy captured by collectors on garage rooftops.

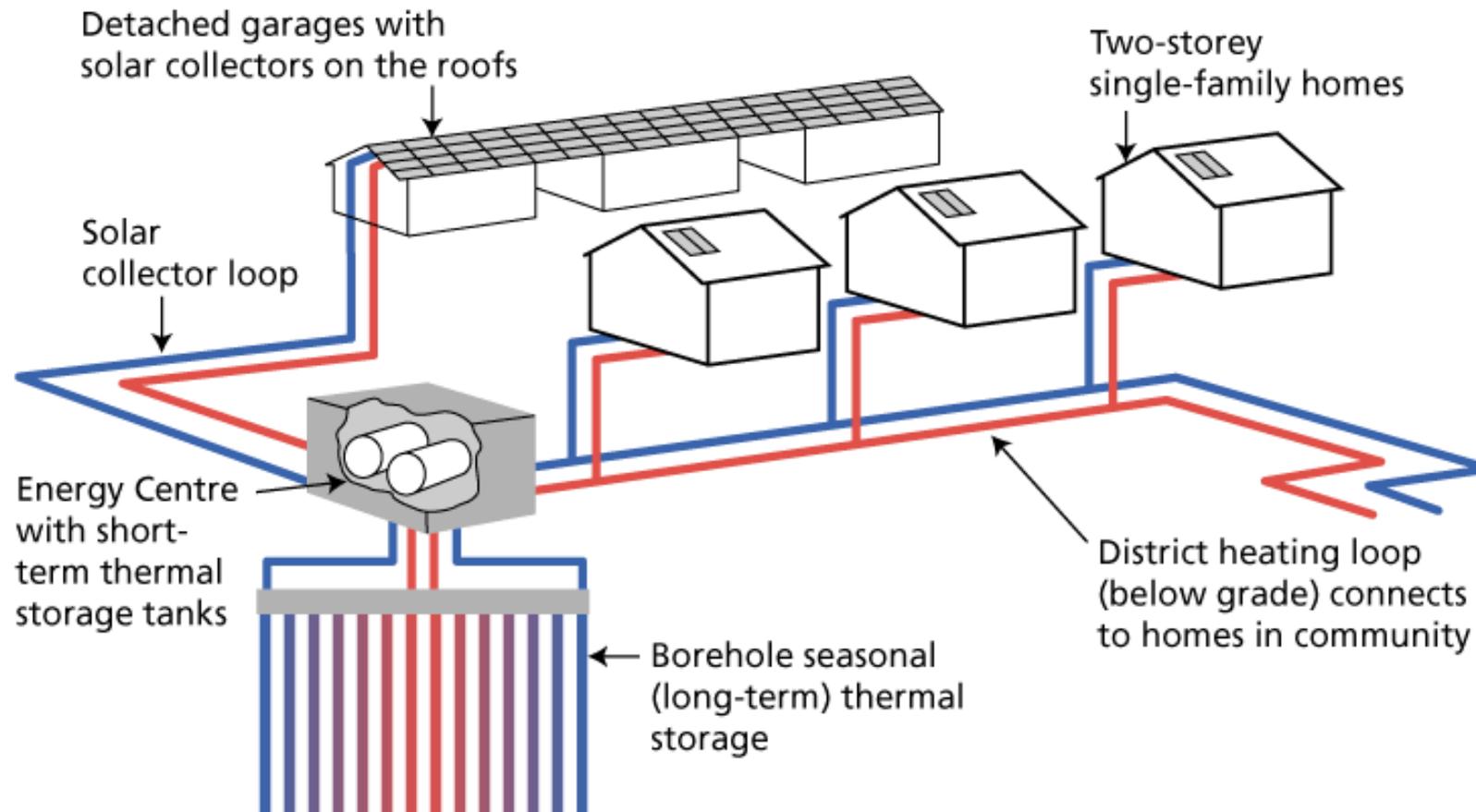
<https://www.dlsc.ca/>

Et plusieurs vidéos YouTube pour vous inspirer.

Stockage +
Géothermie +
Solaire

Stockage de la chaleur issue du soleil

- Exemples : La communauté solaire de Drake Landing



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions et caractéristiques
- Stockage avec de l'eau
- Stockage dans les matériaux de construction
- Stockage souterrain
- Stockage de la chaleur issue du soleil
- ***Conclusion***

Conclusion

- Les applications de stockage thermique sensible concernent principalement **le domaine industriel dans la conversion de l'énergie solaire**, la gestion des **réseaux de chaleur** ainsi que le marché résidentiel par le biais des ballons d'eau chaude sanitaire (ECS).
- Ces installations ont un **potentiel important** en termes de compétitivité pour les activités tertiaires et industrielles et en matière d'impact sur la demande en électricité à la pointe. En effet, en stockant la chaleur ou le froid en période de faible demande d'électricité, le potentiel de décalage des appels de puissance est important.

Conclusion

- Les applications de stockage thermique sensible ont cependant des avantages rarement mentionnés:
 - Ils peuvent être **passifs**. Stockage solaire dans une masse de béton ou de briques intégrés dans des bâtiments conçus et orientés pour optimiser le gain solaire et le chauffage à la biomasse. C'est très simple, éprouvé, pas cher et durable.
 - Ils peuvent être **actifs**. Avec un réservoir BT pour le chauffage des espaces (60% de l'énergie) et un réservoir HT pour le chauffage de l'ECS (20% de l'énergie). Ça peut demeurer assez simple à gérer mais requière néanmoins une « sensibilité » au système énergétique.

Bibliographie/médiagraphie

- Dinçer, I., Rosen, M., Thermal Energy Storage, 2nd ed., Wiley, 2011.
- Hydro-Québec, <http://www.hydroquebec.com>
- Norton, B., Solar Energy Thermal Technology, 1992.
- Turner L.W., Solar Heating for Home, Farm and Small Business
- Paksoy, H. O., Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption, 2007.
- Poche, F., Salt-gradient solar ponds for renewable energy, desalination and reclamation of terminal lakes, 2010.
- O. Ercan Ataer, Storage of Thermal Energy, Energy Storage Systems.



Merci de votre attention !

Dans une formule asynchrone, si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions

