

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;
 - suspension 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

Plan de la présentation

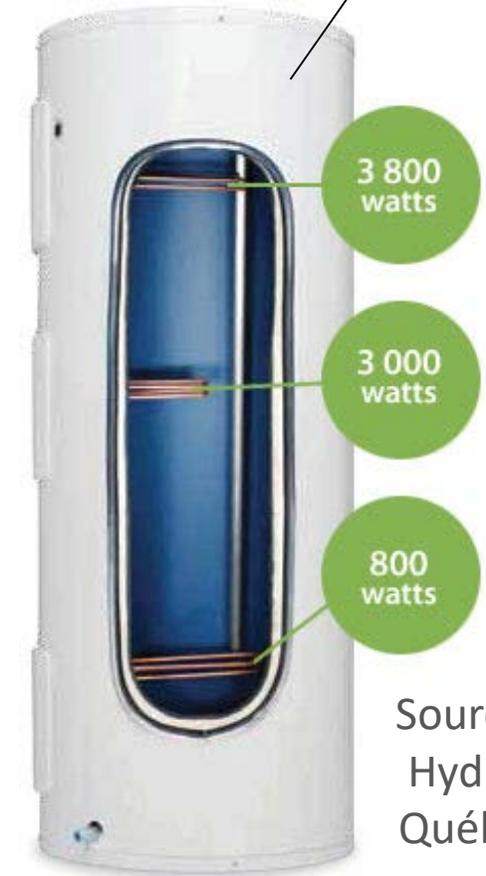
- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions et caractéristiques
- ***Stockage avec de l'eau***
- Stockage dans les matériaux de construction
- Stockage souterrain
- Stockage de la chaleur issue du soleil
- Conclusion

Stockage avec de l'eau

Exemple comportant
trois éléments de
chauffage

- **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.



Source :
Hydro-
Québec

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) va changer dans le temps;
- 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

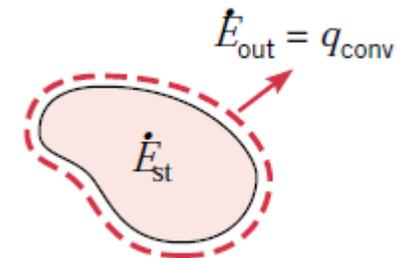
- **Comment se décharge cette batterie thermique?**

- A partir du moment où un bloc de matériau solide ou un réservoir contenant liquide va être exposé 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 un résidence a été portée à haute température pendant le jour par un rayonnement solaire intense, cette masse se refroidira progressivement pendant la nuit et transfèrera 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 (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



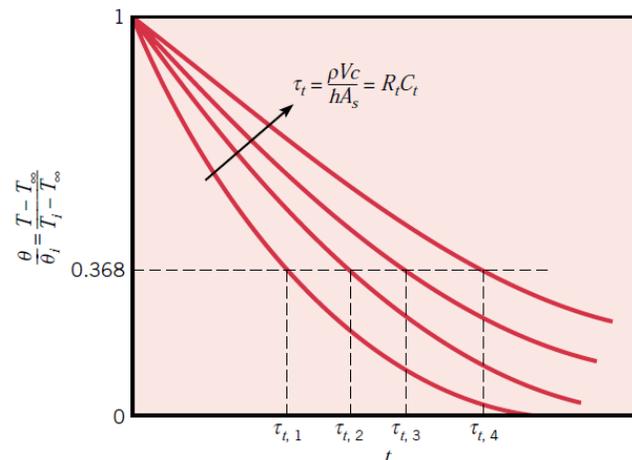
Stockage avec de l'eau

- **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

$$\tau_t = \left(\frac{1}{hA_s} \right) (\rho Vc) = R_t C_t$$

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:

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

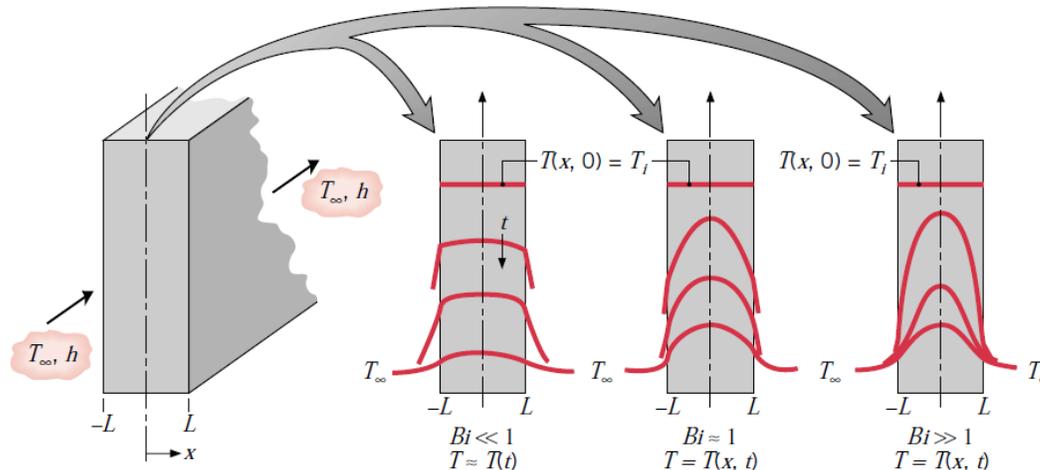
- Et bine sûr, lorsque tout le corps est à la température du fluide

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

- 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 de construction

- 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

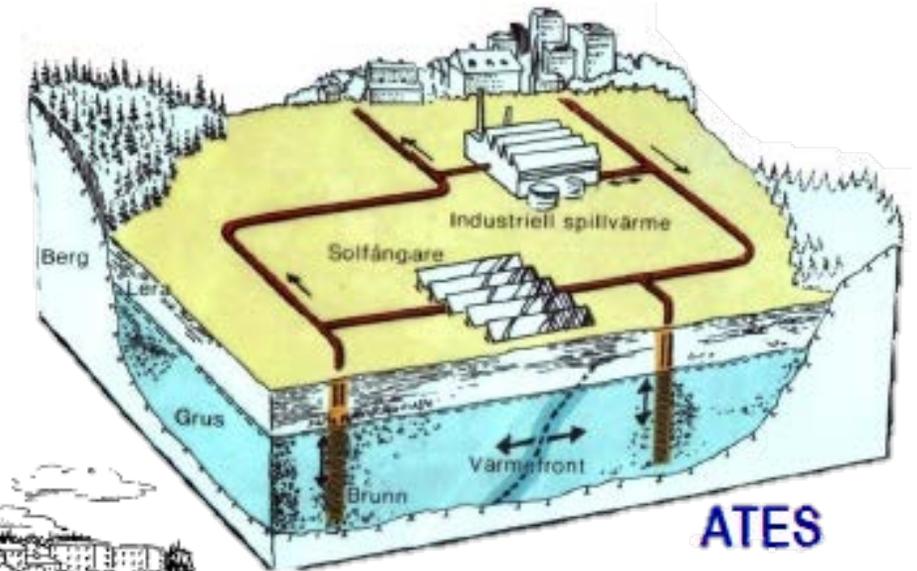
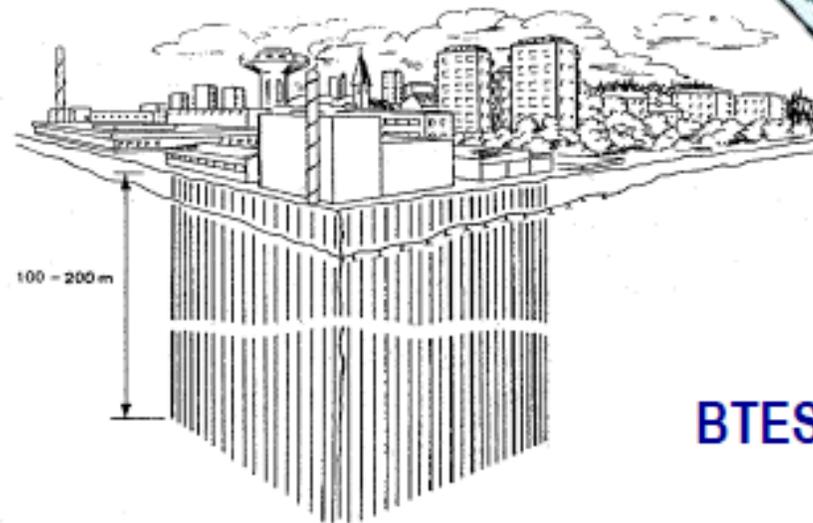
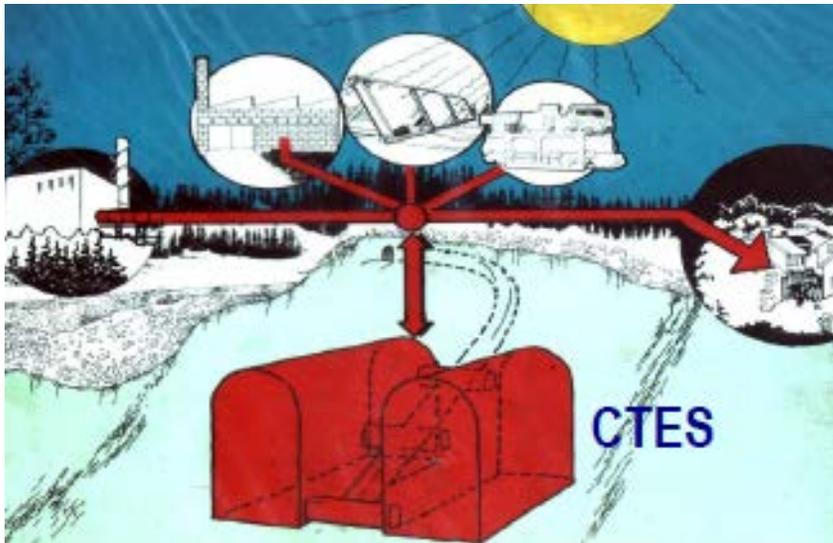
Source: Norton (1992).

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

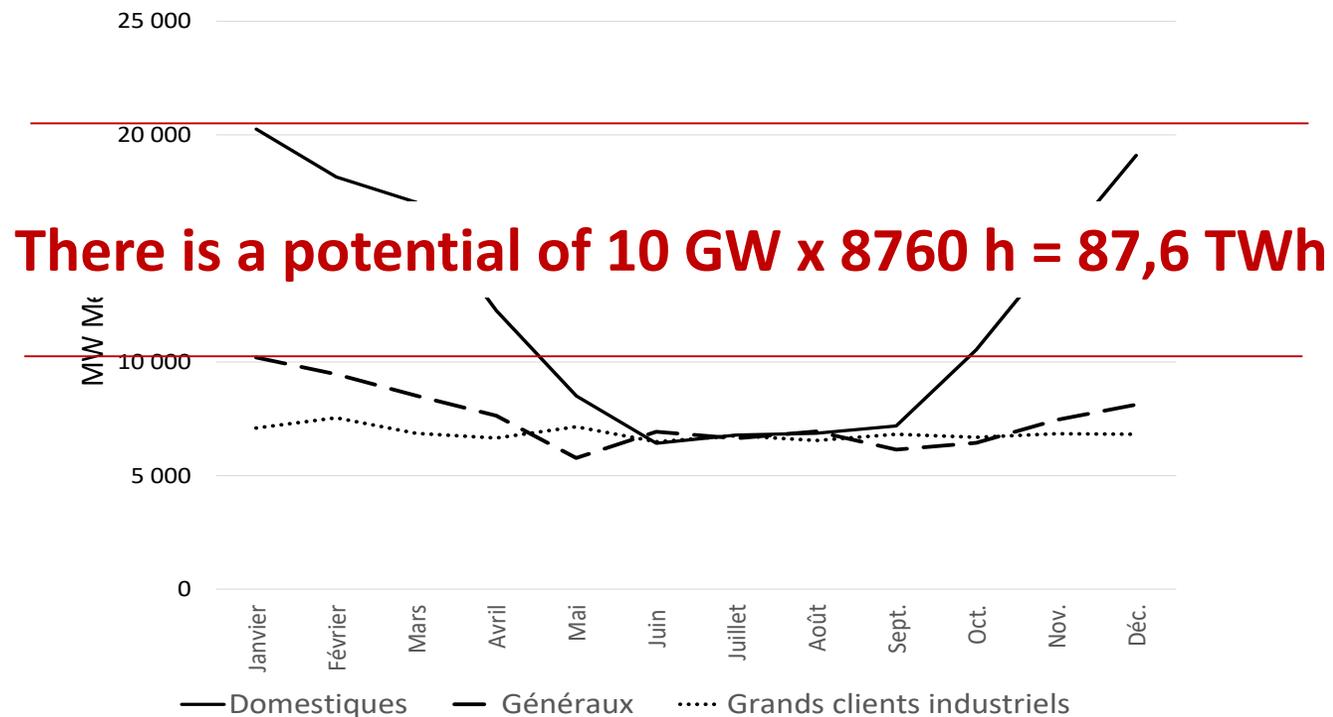
- Stockage de chaleur souterrain (UTES) : stockage saisonnier
 - Aquifer thermal energy storage (ATES)
 - Borehole thermal energy storage (BTES)
 - Cavern thermal energy storage (CTES)



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

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

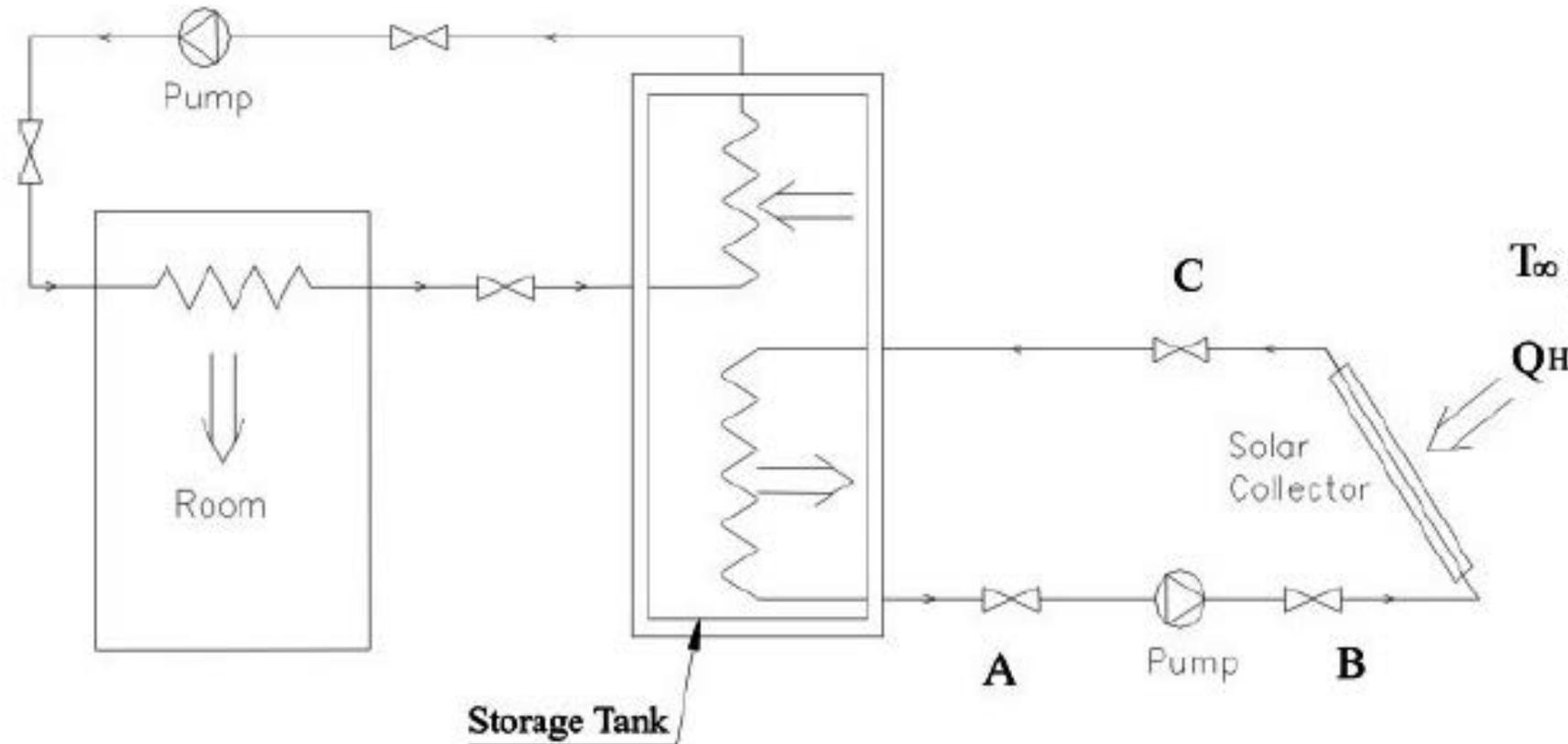
- Les panneaux solaires thermiques
 - Le chauffe-eau solaire individuel, placé en toiture et alimentant un ballon à eau par des canalisations isolées
 - Couvre 50% ou plus des besoins en ECS
 - Le chauffe-eau solaire collectif, beaucoup plus intelligent!!



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

Stockage de la chaleur issue du soleil

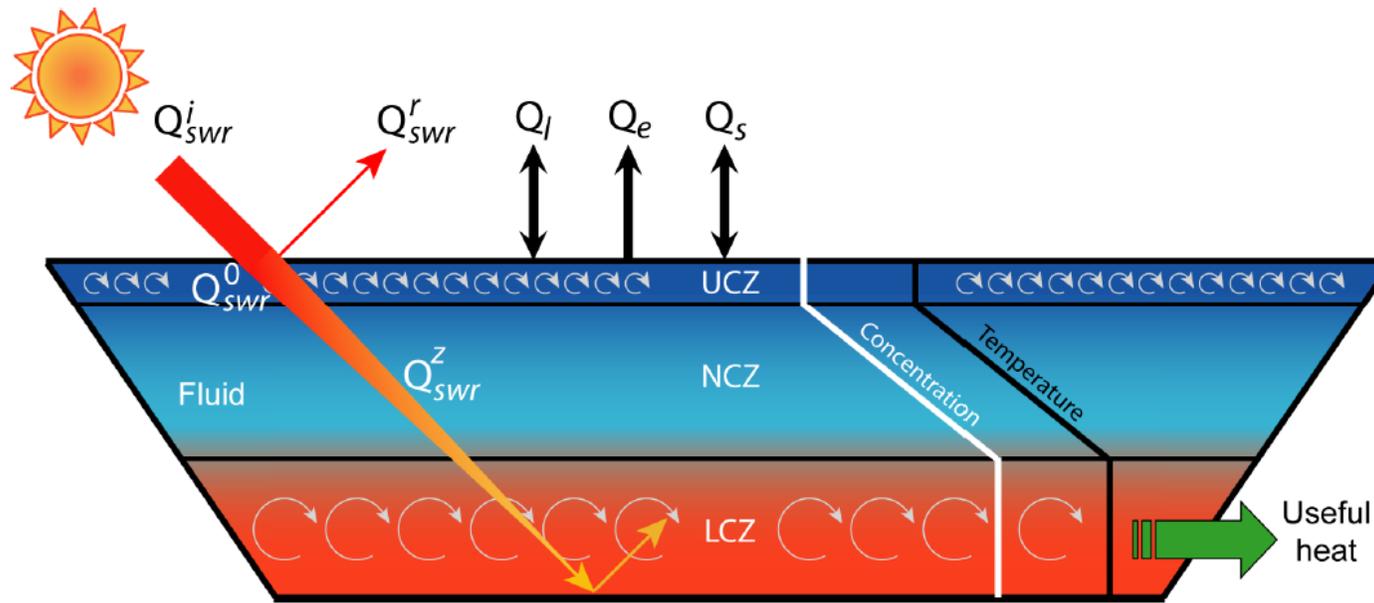
- Les panneaux solaires thermiques



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

Stockage de la chaleur issue du soleil

- Dans des étangs solaires (solar ponds)

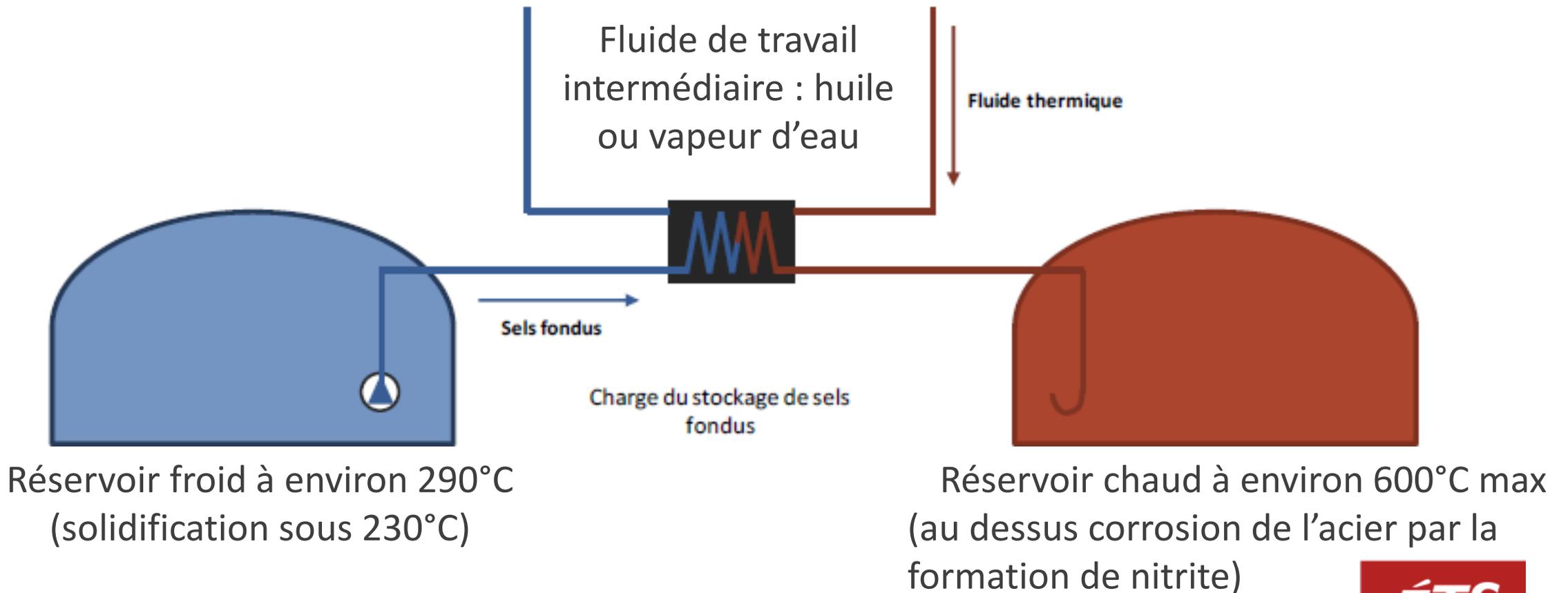


Ref.: Poche, F..

Stockage de la chaleur issue du soleil

- **Stockage avec des sels fondus**

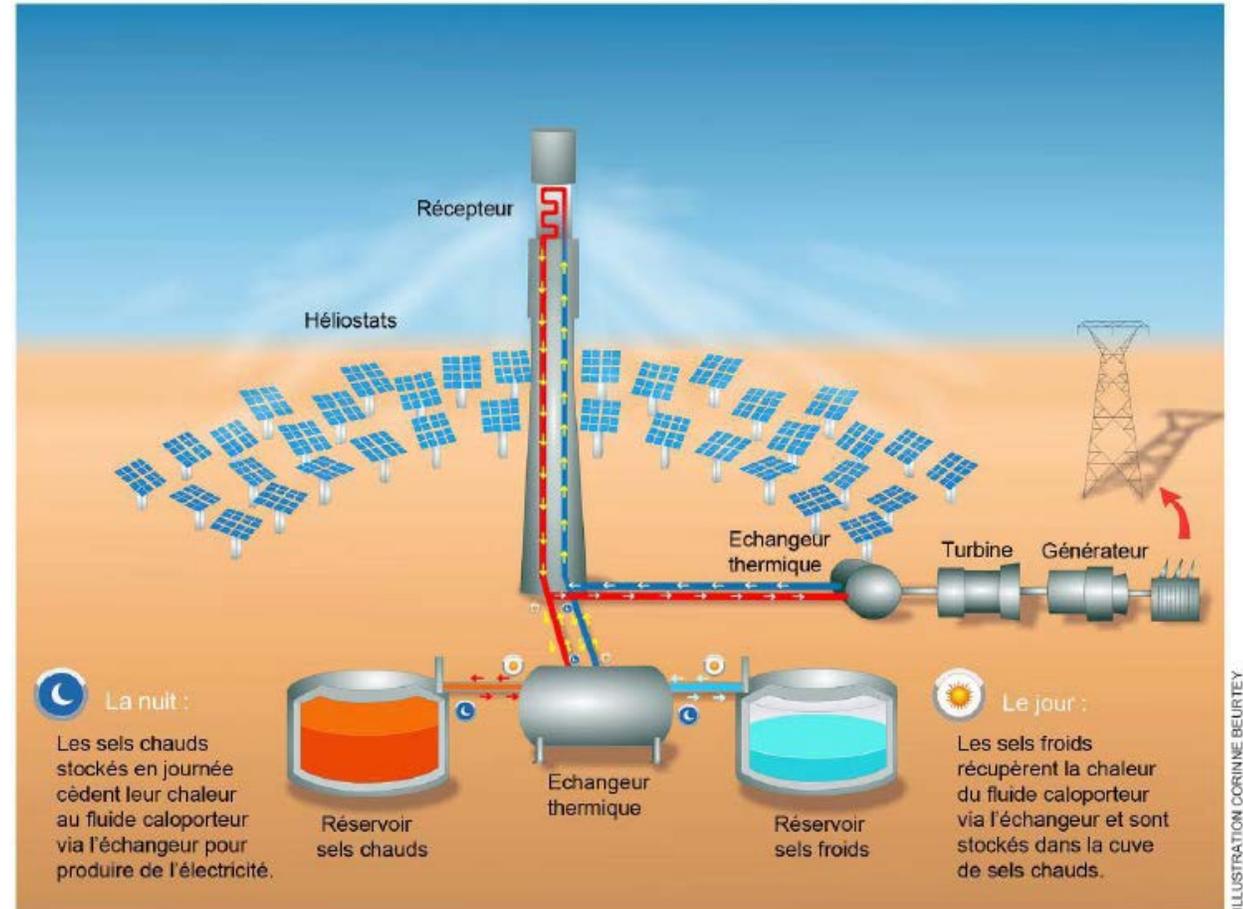
- Généralement un mélange de nitrate de sodium et nitrate de potassium



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).



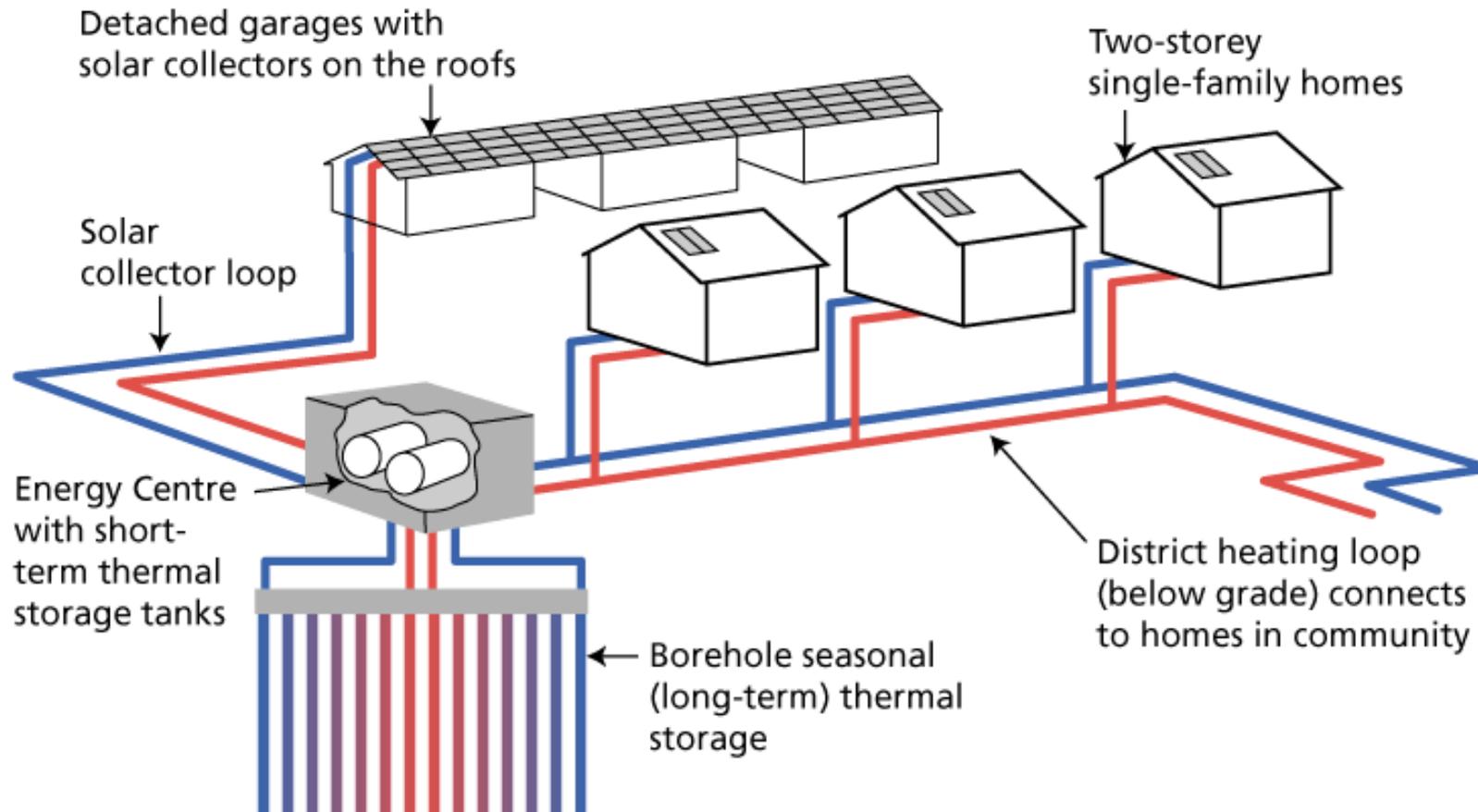
Stockage de la chaleur issue du soleil

- **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



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.

Bibliographie/médiagraphie

- Une feuille résumé est disponible dans le répertoire « Documentation » du site Moodle
- Le résumé indique clairement:
 - La documentation obligatoire. Les références qu'il faut étudier pour préparer les tests formatifs et le quiz sommatif ainsi que l'examen final.
 - La documentation facultative. Pour les gens désirant pousser plus loin leur réflexion et leurs connaissances.

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 !

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

