

17. Stockage de l'énergie

17.6 – Stockage thermique latent

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

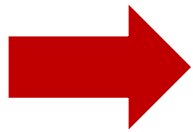
- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions et intérêt du stockage thermique latent
- Les matériaux à changement de phase (MCP)
- Exemples d'applications
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Définitions et intérêt du stockage thermique latent
- Les matériaux à changement de phase (MCP)
- Exemples d'applications
- Conclusion

Introduction et objectifs

- Dans la présentation précédente, il a été mentionné que 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
- Dans cette seconde présentation sur le stockage thermique, on s'attarde à la forme latente.



Introduction et objectifs

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

Introduction et objectifs

- À la fin de cette présentation, vous devriez être en mesure de répondre aux questions suivantes:
 - Qu'est-ce que le stockage latent par opposition à stockage sensible?
 - Pourquoi utilise-t-on les qualificatifs « sensible » et « latent »?
 - Dans quelles applications fait-on appel à du stockage latent?
 - Quels sont les avantages du stockage latent?
 - Quels sont les inconvénients et par conséquent les verrous qui limitent ou empêche son usage?

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Définitions et intérêt du stockage thermique latent***
- Les matériaux à changement de phase (MCP)
- Exemples d'applications
- Conclusion

Définitions et intérêt du stockage thermique latent

- La chaleur latente change l'état physique d'une matière, par opposition à la chaleur sensible qui modifie la température d'une matière.
- Quelle que soit la matière, on parle de :
 - chaleur latente de liquéfaction ou de fusion : chaleur nécessaire pour passer de l'état solide à l'état liquide,
 - chaleur latente de vaporisation ou d'évaporation : chaleur nécessaire pour passer de l'état liquide à l'état gazeux.
- Dans une telle situation, on doit fournir de l'énergie!

Définitions et intérêt du stockage thermique latent

- La chaleur latente change l'état physique d'une matière, par opposition à la chaleur sensible qui modifie la température d'une matière.
- Mais inversement :
 - chaleur latente de condensation : chaleur nécessaire pour passer de l'état gazeux à l'état liquide,
 - chaleur latente de solidification : chaleur nécessaire pour passer de l'état liquide à l'état solide.
- Dans ce cas, le matériau cède de l'énergie!

Définitions et intérêt du stockage thermique latent

- Lorsque l'on parle de stockage de la chaleur latente, on trouve l'acronyme anglais *latent thermal heat storage* ou *latent thermal energy storage* (LTES);
- En applications de stockage de la chaleur latente, un **matériau à changement de phase** (MCP) – ou *phase change material* (PCM) en anglais – sert à stocker et déstocker de l'énergie thermique à température théoriquement constante;
- Avec ce type de stockage, on améliore la plage de température utilisable pour stocker puisqu'on se permet au moins deux états possibles du matériau de stockage (*en général un seul changement de phase (CP) pour un même système*).

Définitions et intérêt du stockage thermique latent

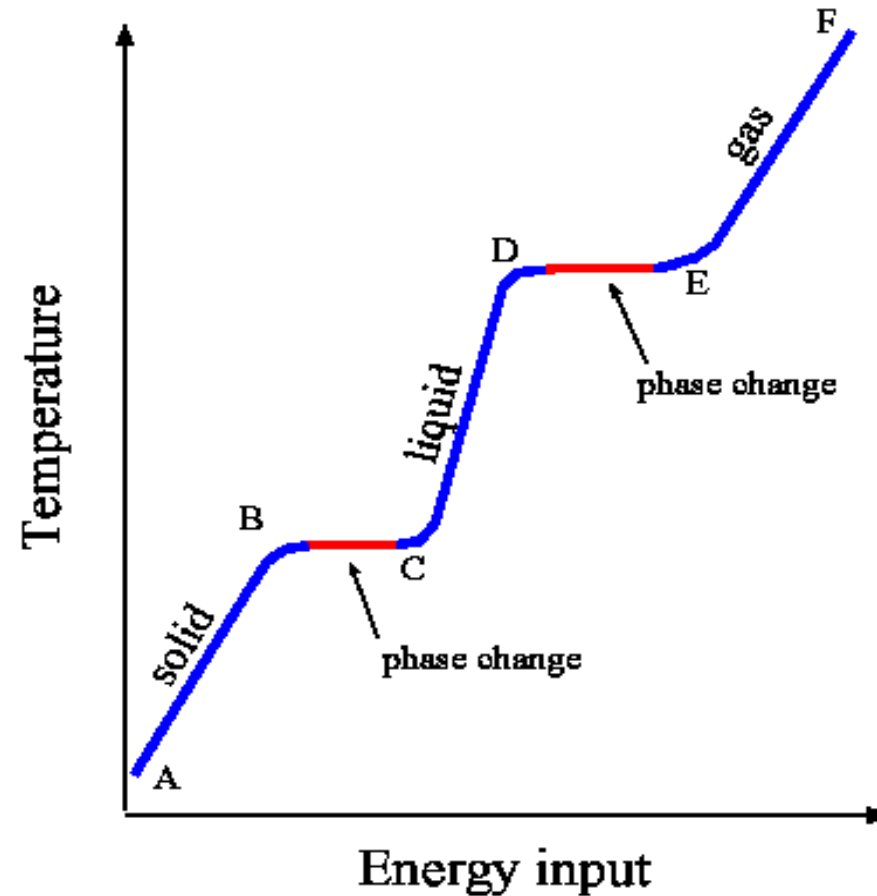
- Pour les matériaux à changement de phase (MCP) : la chaleur latente de fusion, h_f , ou de vaporisation, h_v , en J/kg , est alors la caractéristique importante, en plus de c_p et des températures minimale et maximale, s'il y a de la chaleur sensible échangée en plus de la chaleur latente.
- On ne parle pas de symbole pour la chaleur latente de solidification puisqu'elle correspondrait à h_f et similairement il n'y a pas de symbole pour la chaleur latente de condensation puisqu'elle correspondrait à h_v .

Définitions et intérêt du stockage thermique latent

- On utilise parfois une terminologie différente pour exprimer la chaleur latente de fusion
 - h_f devient h_{sf} ou transition solide-fluide
 - h_v , devient h_{fv} ou transition fluide-vapeur.
- Pour une substance telle que l'eau, ces valeurs à pression atmosphérique sont:
 - $h_{sf} = 334 \text{ kJ/kg}$
 - $h_{fv} = 2257 \text{ kJ/kg}$

Définitions et intérêt du stockage thermique latent

- Le cas de l'eau



Définitions et intérêt du stockage thermique latent

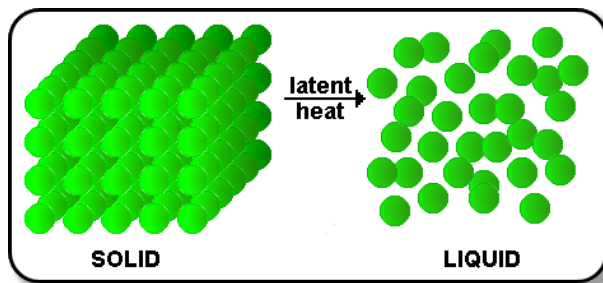
- Le transfert thermique par Chaleur Sensible (CS)
 - Le matériau peut céder ou stocker de l'énergie en voyant varier sa propre température, sans pour autant changer d'état - donc, pas de changement de phase...
 - La grandeur utilisée pour quantifier la CS échangée par un matériau est la chaleur massique spécifique ou chaleur spécifique, notée c_p et exprimée en J/(kg.K).

$c_p = 4186 \text{ J/kg.K}$ pour H_2O . Donc, il faut 4186 joules pour élever 1 kg d'eau de 1°C ; mais aussi, on peut retirer 4186 joules, lorsqu'on fait baisser la température de 1°C (valable aux températures proches de 20°C)



Définitions et intérêt du stockage thermique latent

- Intérêt du stockage latent
 - Exemple de l'eau (accumulateur de glace)
 - Combien de kg d'eau seraient réchauffés de 1°C par la fonte d'un kg de glace?



Définitions et intérêt du stockage thermique latent

- Avantages (résumé)
 - Grande capacité de stockage thermique par volume
 - Eau liquide: $\approx 4,2$ kJ/kg K;
 - Liquide-solide: ≈ 334 kJ/kg;
 - Vapeur-liquide: $\approx 2\,200$ kJ/kg.
 - Température constante: parfait pour de la régulation thermique
 - Dans le domaine du bâtiment:
 - Augmentation du confort : en employant un MCP qui fond à 24-26°C;
 - Économies d'énergie : évite de climatiser en après-midi et de chauffer en soirée

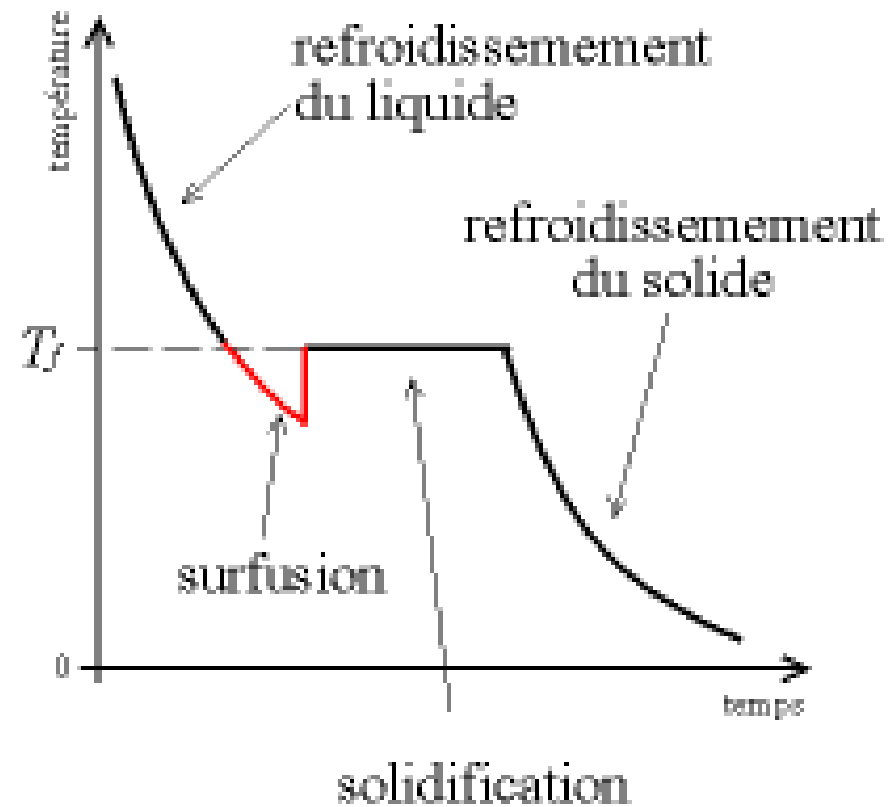
Définitions et intérêt du stockage thermique latent

- Inconvénients (résumé)
 - Hystérésis et durée des cycles différents
 - Convection naturelle dans la phase liquide
 - Phase solide moins conductrice que liquide
 - Pas complètement réversible
 - Surfusion (nucléation faible pour les sels)
 - Données des manufacturiers (niveau de confiance)
 - Performances
 - Durabilité
 - Toxicité de certains MCPs.

**La fusion peut prendre 4 fois
moins de temps que la
solidification**

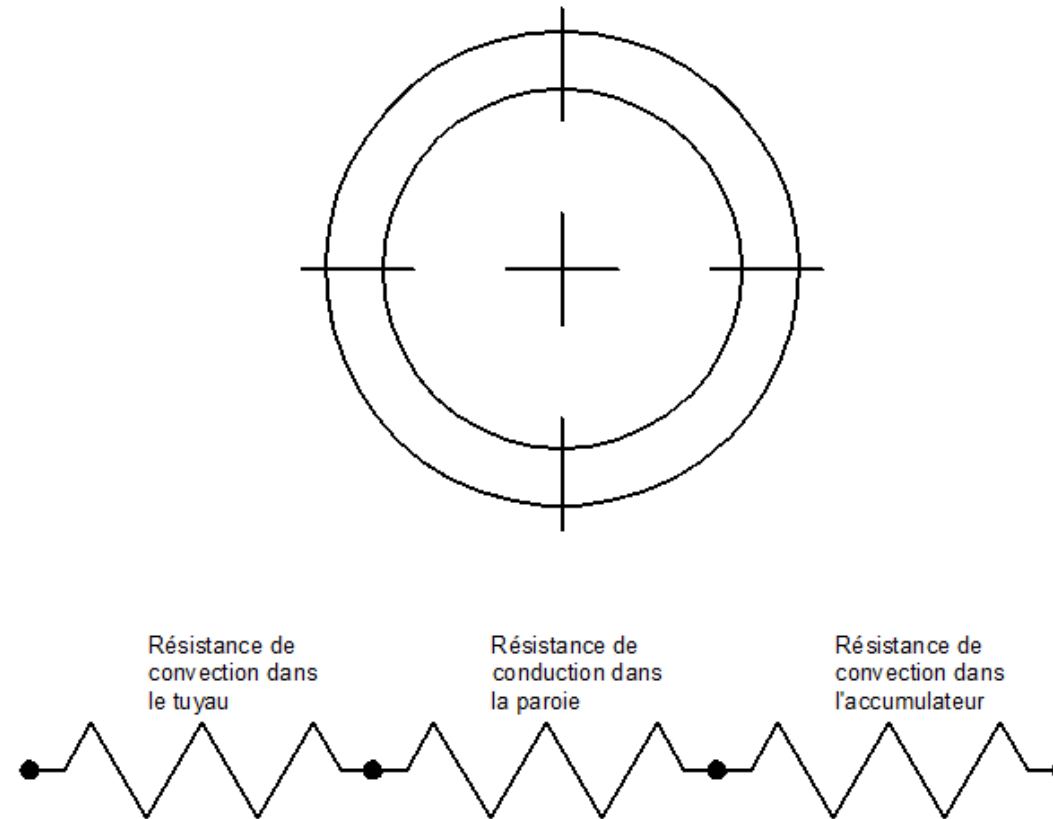
Définitions et intérêt du stockage thermique latent

- La surfusion



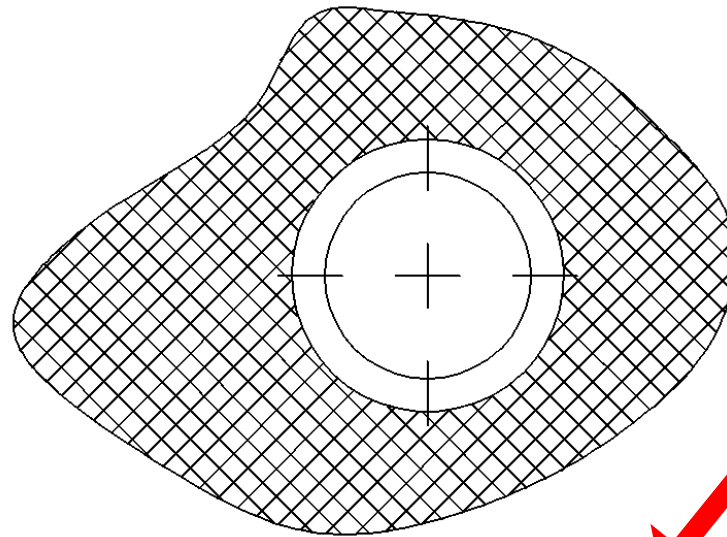
Définitions et intérêt du stockage thermique latent

- Au départ, d'un refroidissement

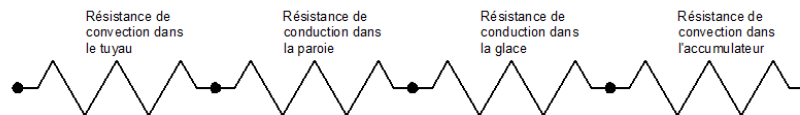


Définitions et intérêt du stockage thermique latent

- Au temps t , le transfert thermique sera limité par la couche isolante formée par la glace.



Augmente à mesure que la glace se forme!



Définitions et intérêt du stockage thermique latent

- Autres caractéristiques (résumé)
 - Les systèmes TES latents ont l'avantage de compacité par rapport aux appareils TES sensibles (ainsi que l'avantage opérationnel d'une température du cycle de stockage presque constante).
 - Parmi les changements de phase thermodynamiques à température constante avec l'absorption ou la libération de chaleur latente, les plus appropriées pour les TES sont les transitions solide-liquide et liquide-solide.
 - Les transitions solide-gaz, même si elles impliquent souvent les interactions thermiques les plus importantes par unité de poids (2200 vs 330 kJ/kg), présentent l'inconvénient de très grands changements de volume.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions et intérêt du stockage thermique latent
- ***Les matériaux à changement de phase (MCP)***
- Exemples d'applications
- Conclusion

Les matériaux à changement de phase (MCP)

- Les 3 grandes familles de MCP :
 - Les composés *minéraux* (ou *inorganiques*).
 - Parmi ces composés, surtout les sels hydratés présentent un intérêt pour leur utilisation en tant que MCP. Ils sont issus d'un alliage de sels organiques et d'eau. Ils ont l'avantage de posséder des grandes chaleurs latentes et des prix bas. En revanche, leur principal défaut concerne leur tendance à la [surfusion](#).
 - Les composés *organiques*.
 - De propriétés thermiques (chaleur latente et [conductivité thermique](#) en particulier) légèrement moindre que les sels hydratés, ceux-ci présentent l'avantage de être moins ou très peu concernés par la surfusion. On utilise en particulier, pour le stockage de chaleur latente, les paraffines et les acides gras qui appartiennent à cette famille.
 - Les composés *eutectiques*.
 - Les eutectiques sont un mélange de sels possédant une température de fusion constante pour une valeur particulière de concentration. Ils peuvent être inorganiques et/ou organiques.

Les matériaux à changement de phase (MCP)

- Inorganiques

- Sels hydratés, Métaux (300°C – 3000 °C) et +

Compound	Melting temp. (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/mK)	Density (kg/m ³)
Inorganics				
MgCl ₂ · 6H ₂ O	117	168.6	0.570 (liquid, 120 °C) 0.694 (solid, 90 °C)	1450 (liquid, 120 °C) 1569 (solid, 20 °C)
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	89	162.8	0.490 (liquid, 95 °C) 0.611 (solid, 37 °C)	1550 (liquid, 94 °C) 1636 (solid, 25 °C)
Ba(OH) ₂ · 8H ₂ O	78	265.7	0.653 (liquid, 85.7 °C) 1.255 (solid, 23 °C)	1937 (liquid, 84 °C) 2070 (solid, 24 °C)
Zn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	36			1828 (liquid, 36 °C)
CaBr ₂ · 6H ₂ O	34	146.9	0.464 (liquid, 39.9 °C) –	1937 (liquid, 84 °C) 1956 (liquid, 35 °C)
CaCl ₂ · 6H ₂ O	29	115.5	–	2194 (solid, 24 °C)
		190.8	0.540 (liquid, 38.7 °C) 1.088 (solid, 23 °C)	1562 (liquid, 32 °C) 1802 (solid, 24 °C)

Les matériaux à changement de phase (MCP)

- Organiques
 - Paraffines, Sous-produits pétroliers, Acides gras

Compound	Melting temp. (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/mK)	Density (kg/m ³)
Organics				
Paraffin wax	64	173.6	0.167 (liquid, 63.5 °C) 0.346 (solid, 33.6 °C)	790 (liquid, 65 °C) 916 (solid, 24 °C)
Polyglycol E400	8	99.6	0.187 (liquid, 38.6 °C) –	1125 (liquid, 25 °C) 1228 (solid, 3 °C)
Polyglycol E600	22	127.2	0.187 (liquid, 38.6 °C) –	1126 (liquid, 25 °C) 1232 (solid, 4 °C)
Polyglycol E6000	66	190.0	– –	1085 (liquid, 70 °C) 1212 (solid, 25 °C)
Fatty acids				
Stearic acid	69	202.5	–	848 (liquid, 70 °C) 965 (solid, 24 °C)
Palmitic acid	64	185.4	0.162 (liquid, 68.4 °C) –	850 (liquid, 65 °C) 989 (solid, 24 °C)
Capric acid	32	152.7	0.153 (liquid, 38.5 °C) –	878 (liquid, 45 °C) 1004 (solid, 24 °C)
Caprylic acid	16	148.5	0.149 (liquid, 38.6 °C) –	901 (liquid, 30 °C) 981 (solid, 13 °C)

Les matériaux à changement de phase (MCP)

- Les critères de sélection (en bref)
 - Les critères les plus importants auxquels le matériau de stockage doit satisfaire pour un TES latent dans lequel le matériau subit une transition solide-liquide ou solide-solide sont les suivantes:
 - enthalpie de transition élevée par unité de masse;
 - capacité d'inverser complètement la transition;
 - température de transition adéquate;
 - stabilité chimique et compatibilité avec le conteneur (si présent);
 - changement de volume limité avec la transition;
 - non-toxicité;
 - faible coût, par rapport à l'application envisagée.

Les matériaux à changement de phase (MCP)

- Les critères de sélection (thermodynamique)
 - un point de fusion à la température de fonctionnement souhaitée;
 - une chaleur latente de fusion élevée par unité de masse, afin qu'une quantité donnée de matière stocke une plus grande quantité d'énergie;
 - une densité élevée, afin que le matériau occupe un volume plus petit;
 - une chaleur spécifique élevée, afin que des TES sensibles significatifs puissent également se produire;
 - une conductivité thermique élevée, afin que de petites différences de température soient suffisantes pour charger et décharger le stockage;
 - Une fusion congruente, c'est-à-dire que le matériau doit fondre complètement, afin que les phases liquide et solide soient homogènes (cela évite la différence de densité entre solide et liquide, qui provoque la ségrégation et entraîne des changements dans la composition chimique du matériau); et
 - de petits changements de volume pendant la transition de phase, afin qu'un confinement et un échangeur de chaleur simples puissent être utilisés.

Les matériaux à changement de phase (MCP)

- Les critères de sélection (cinétique)
 - peu ou pas de surfusion pendant la solidification, c'est-à-dire que la masse fondue doit cristalliser à son point de congélation, pas en dessous!
 - Ce critère peut être atteint grâce à une vitesse élevée de nucléation et de croissance des cristaux.
 - La surfusion peut être supprimée en introduisant un agent de nucléation ou un déclencheur à froid dans le matériau de stockage.

Les matériaux à changement de phase (MCP)

- Les critères de sélection (chimique)
 - Stabilité chimique;
 - Pas de décomposition pendant la période de vie utile;
 - La surfusion peut être supprimée en introduisant un agent de nucléation ou un déclencheur à froid dans le matériau de stockage;
 - Pas de corrosion causée au réservoir;
 - Pas de toxicité, d'inflammabilité ou de risque d'explosion.

Les matériaux à changement de phase (MCP)

- Les critères de sélection (technique)
 - Simplicité;
 - Efficacité;
 - Compacité;
 - Compatibilité;
 - Viabilité;
 - Fiabilité.



Les matériaux à changement de phase (MCP)

- Les critères de sélection (économique)
 - Disponibilité;
 - Coût du système (CAPEX);
 - Coût d'opération, d'entretien, de maintien d'actif (OPEX).

Les matériaux à changement de phase (MCP)

- Caractérisation
 - De nombreuses caractéristiques sont souhaitées pour un MCP. Puisqu'aucun matériau ne peut satisfaire tous les désirs, le choix d'un MCP pour une application donnée nécessite un examen attentif des propriétés de divers candidats, en tenant compte de leurs mérites et défauts relatifs et, dans certains cas, d'un certain degré de compromis.
 - Les propriétés de nombreux MCP ont été étudiées. Il convient de noter, cependant, que les propriétés des produits de qualité industrielle, qui sont utilisés dans les applications pratiques, peut s'écarter largement des valeurs rapportées en raison de la présence d'impuretés, de variations de composition (mélanges, coupes de distillation) et distribution de longueur de chaîne (dans le cas des polymères).
 - La dilution par des additifs, tels que les agents stabilisants nécessaires aux hydrates de sel, modifient également les propriétés thermiques et, en particulier, la capacité de stockage.
 - Les sélections doivent ainsi être basées sur des valeurs testées des produits et non simplement sur la fiche de manufacturier (lorsque possible).

Les matériaux à changement de phase (MCP)

- Les exigences à l'égard des MCP
 - Le MCP dans la plage de température 0 – 120 °C sont intéressants pour une variété d'applications à basse température, tels que le chauffage des locaux, la production d'eau chaude sanitaire, le chauffage des locaux assisté par pompe à chaleur, le chauffage de serres, le refroidissement solaire, etc.
 - Le développement de systèmes TES fiables pour ces applications et d'autres nécessitent une bonne compréhension des chaleurs latentes de fusion des matériaux de stockage et des échangeurs de chaleur.
 - La connaissance des caractéristiques de fusion et de solidification des PCM, de leur capacité à subir de nombreux cycles, et leur compatibilité avec les matériaux de construction est essentielle pour évaluer leur performance à court et à long terme.
 - En utilisant deux techniques de mesure différentes (par exemple, calorimétrie à balayage différentiel et analyse thermique), le comportement de fusion et de solidification des MCP peut être déterminé.

Les matériaux à changement de phase (MCP)

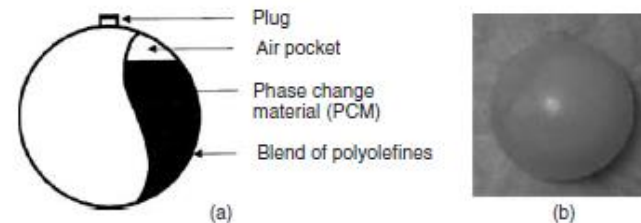
- Les paraffines
 - Dans le cadre de la recherche de bons supports de stockage pour le chauffage solaire, un grand nombre de composés organiques ont été étudiés au cours des dernières décennies. Les candidats les plus prometteurs semblent être les paraffines normales.
 - Leur transition solide-liquide (fusion) répond de manière satisfaisante à sept critères importants pour les MCP. Par exemple, la chaleur de fusion a une valeur moyenne de 35–40 kcal / kg, l'inversion de phase ne pose aucun problème, et les points de transition varient considérablement avec le nombre d'atomes de carbone dans les chaînes.
 - De plus, les paraffines normales sont chimiquement inertes, non toxiques et disponibles à un coût raisonnablement bas. Le changement de volume avec la transition, qui est de l'ordre de 10%, pourrait représenter un problème mineur.

Les matériaux à changement de phase (MCP)

- L'encapsulage des MCP
 - Le MCP est souvent encapsulé dans des conteneurs robustes, aisément empilables et imperméables à l'eau, constitués d'un polyéthylène de haute densité. Les conteneurs sont conçus avec un rapport surface/volume élevé pour maximiser le transfert thermique. Le sel eutectique ne se dilate pas ou ne se contracte pas lorsqu'il gèle ou fond; ainsi, il n'y a aucune fatigue mécanique sur le récipient en plastique. Les conteneurs remplis de sel eutectique sont placés dans un réservoir, habituellement une structure en béton souterraine. Les conteneurs occupent environ les deux tiers du volume du réservoir, et le tiers restant est occupé par l'eau utilisée comme fluide caloporteur. Aucun glycol n'est utilisé.

Les matériaux à changement de phase (MCP)

- L'encapsulation des MCP
 - Le MCP peut aussi être encapsulé dans des récipients sphériques de très petite taille pour maximiser la surface d'échange et être incorporé à des enduits muraux;
 - Ceci permet d'augmenter le confort des pièces d'un bâtiment en améliorant la thermorégulation.
 - Il peut aussi être encapsulé dans des sphères de plus grande taille, elles-mêmes enfouies dans des dalles de béton
 - Ceci allège la dalle et augmente sa capacité de thermorégulation, tout en conservant son inertie.



Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions et intérêt du stockage thermique latent
- Les matériaux à changement de phase (MCP)
- ***Exemples d'applications***
- Conclusion

Exemples d'applications

- Applications communes:
 - Condenseurs
 - Évaporateurs et bouilloires industrielles
 - Caloducs (*heat pipes*)
 - Tours de refroidissement
 - Séchoirs
 - Régénérateurs

Exemples d'applications

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

Exemples d'applications

- **Stockage de chaleur dans les chaufferettes « chimiques »**
 - Le terme chimique est utilisé à tort car le processus est purement physique
 - Une pochette contenant une solution aqueuse saturée en acétate de sodium en surfusion, la température de fusion étant à 54°C pour une solution à 20 %, ce qui est bien au-dessus de la température ambiante
 - Une pièce métallique permet alors de créer une onde de choc dans la solution pour amorcer la cristallisation
 - Cette transition de phase est exothermique
 - Pour « recharger » le système, on place la chaufferette dans de l'eau très chaude pour liquéfier la solution et retrouver l'état de surfusion

Exemples d'applications

- **Stockage de chaleur dans les chaufferettes « chimiques »**

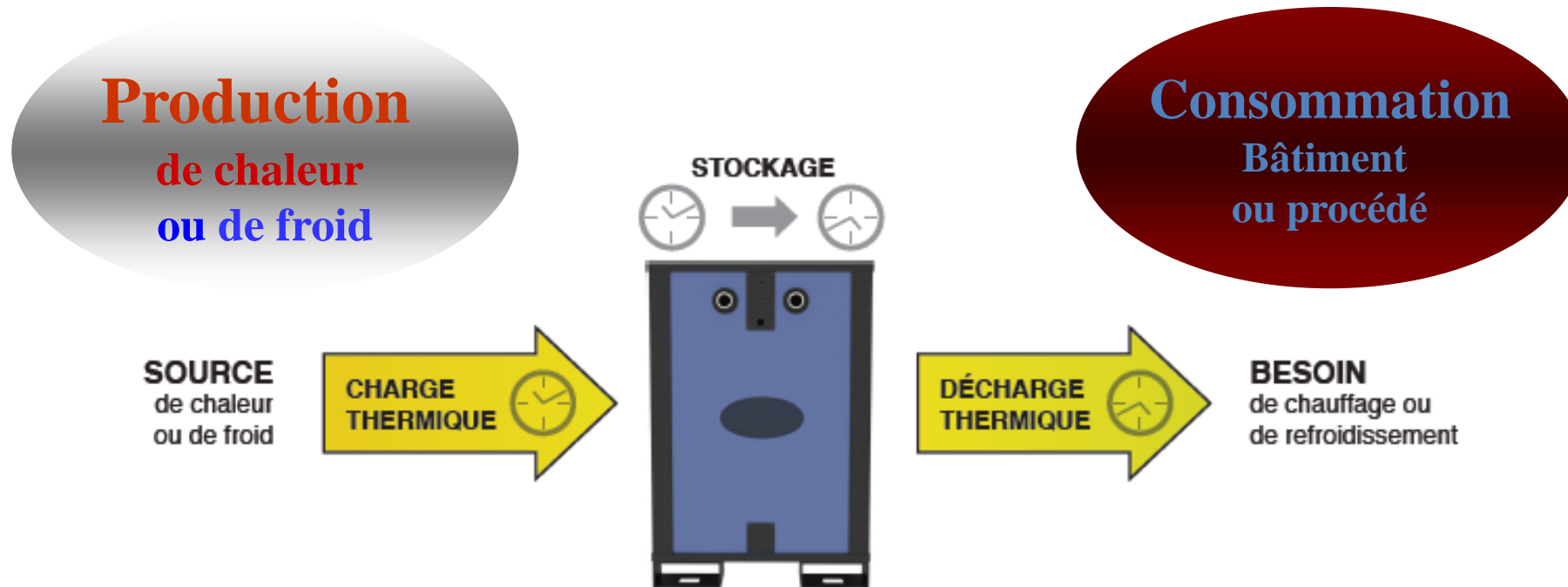
Chaufferette d'acétate de sodium avec cristallisation partielle (en blanc). Source : Wikipédia



- 45°C environ
- 30min à 1h30
- Pour comprendre en détail le principe de déclenchement de la cristallisation
- <https://www.pourlascience.fr/sd/physique/les-chaufferettes-chimiques-892.php>

Exemples d'applications

- Accumulateur à changement de phase



Exemples d'applications

- Accumulateur à changement de phase

GROUPE  **ÉNERSTAT** inc.

Le stockage (de chaud ou de froid) et la récupération d'énergie



Agissant comme une pile thermique, notre module de stockage intègre un système de recharge à haute efficacité. Ce principe contribue efficacement à la gestion de la pointe électrique.



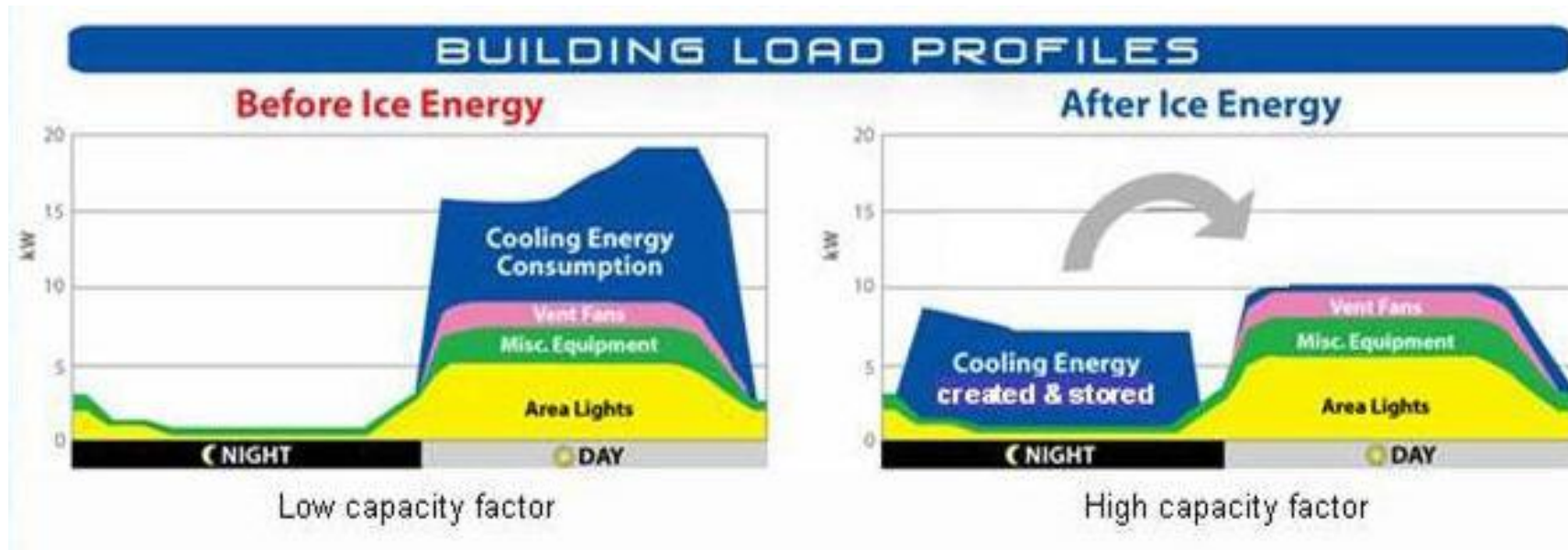
Exemples d'applications

- Arizona, Solana solar generating plant
 - 280MW
 - Sel fondu (6h de stockage)



Exemples d'applications

- Déplacement de l'appel de puissance



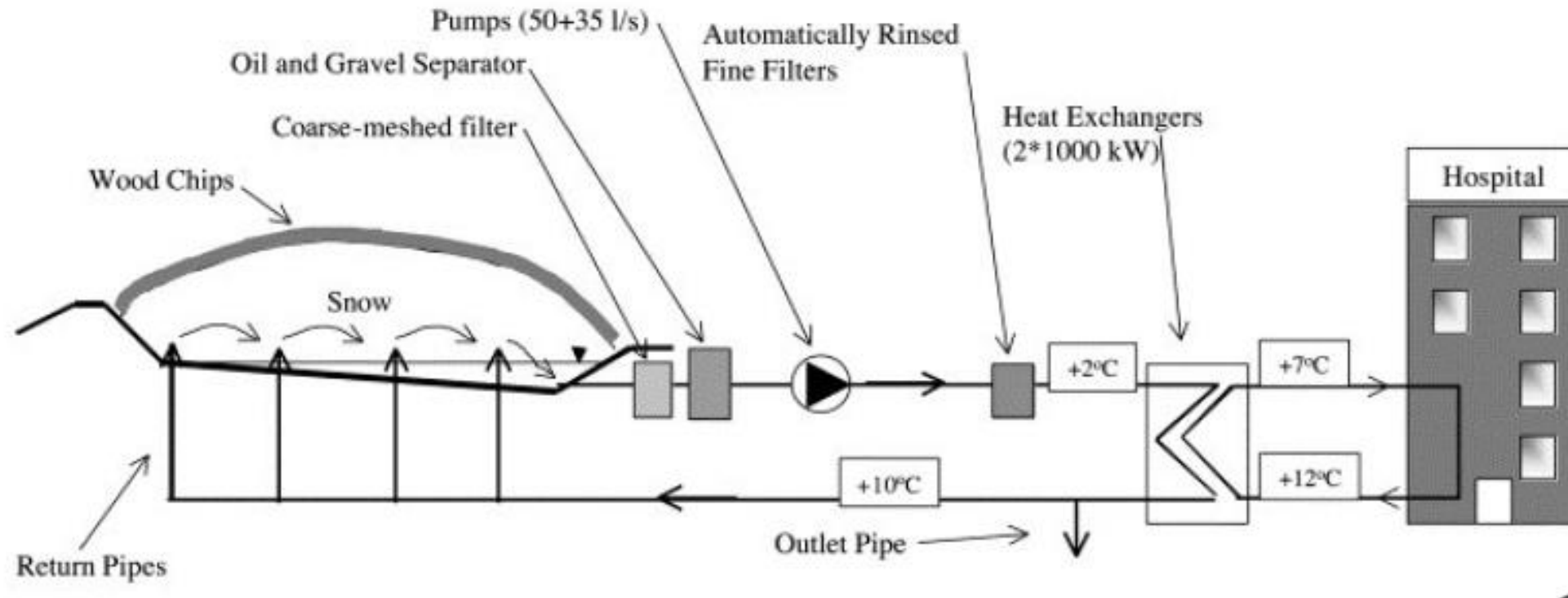
Exemples d'applications

- Déplacement de l'appel de puissance
 - À titre d'exemples, le stockage s'applique lorsque :
 - les pointes de consommation thermique sont importantes (fluctuations);
 - des rejets thermiques sont disponibles, mais non en phase avec la demande;
 - les équipements en place sont fréquemment sollicités pour des charges partielles (p/r à la capacité nominale);
 - la consommation d'énergie électrique est fluctuante et la consommation d'énergie thermique est importante (délestage).



Exemples d'applications

- Sundsvall hospital snow storage, Sweden



Ref: Skogsberg & Nordell

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Définitions et intérêt du stockage thermique latent
- Les matériaux à changement de phase (MCP)
- Exemples d'applications
- ***Conclusion***

Conclusion

- Les MCP possèdent théoriquement des avantages indéniables sur des matériaux de stockage thermique sensibles;
- Leur utilisation comporte cependant de nombreuses difficultés;
- Ainsi, les applications sont encore limitées et beaucoup de recherche est en cours pour réduire les coûts, augmenter la longévité des systèmes et élargir la plage des applications possibles.

Références

- Consultez le site de Science Direct à l'adresse:
<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/phase-change-materials>.
- Dans Science Direct , tapez "Phase change materials" et obtenez 18 538 résultats, dont 1 559 articles de revue pour commencer vos recherches:
 - Phase Change Materials in Solar Domestic Hot Water Systems: A review
 - Comprehensive review of the application of phase change materials in residential heating applications
 - Recent development on heat transfer and various applications of phase-change materials
 - Review on cold thermal energy storage applied to refrigeration systems using phase change materials
 - Et beaucoup plus...

Références

- Groupe t3e
 - A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations, RSER (citée plus de 500 fois)
 - Synthesis and characterization of multifunctional energy composite: Solar absorber and latent heat storage material of high thermal conductivity
 - A review of dendritic growth during solidification: Mathematical modeling and numerical simulations
 - A Novel Technique for Experimental Thermophysical Characterization of Phase-Change Materials
 - A numerical study of the melting of phase change material heated from a vertical wall of a rectangular enclosure
 - Experimental and numerical investigation of a phase change material: Thermal-energy storage and release

Disponibles en ligne et sur demande



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

