



Stockage de chaleur solaire à long terme

N'Tsoukpoe, Kokouvi Edem; Le Pierres, N.; Luo, L.

Published in:

Actes du Colloque International Francophone d'Energétique Et Mécanique, CIFEM 2010

Publication date:

2010

Document Version

Begutachtete Fassung (Peer reviewed)

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

N'Tsoukpoe, K. E., Le Pierres, N., & Luo, L. (2010). Stockage de chaleur solaire à long terme. in: Actes du Colloque International Francophone d'Energétique Et Mécanique, CIFEM 2010 (S. 13-17).

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

STOCKAGE DE CHALEUR SOLAIRE A LONG TERME

K. Edem N'TSOUKPOE^a, Nolwenn LE PIERRÈS^{a,*}, Lingai LUO^a

^a LOCIE, CNRS FRE3220-Université de Savoie, Polytech'Savoie, Campus Scientifique, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget-Du-Lac Cedex, France

RÉSUMÉ

Dans la perspective d'une meilleure efficacité dans l'utilisation des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, nous étudions un procédé de stockage de chaleur solaire à long terme. Après avoir exposé brièvement les principes des différents procédés actuellement utilisés ou en phase de recherche dans le domaine du stockage de la chaleur solaire, cette communication en présente les limites. Elle met l'accent sur le stockage par sorption et par voie thermochimique, un axe de recherche qui s'avère prometteur pour des systèmes de stockage de chaleur sur le long terme, cycles saisonniers ou pluriannuels. Un projet de stockage par absorption actuellement développé ainsi que les performances issues des simulations dynamiques du procédé sont présentés.

Mots Clés : sorption, stockage thermochimique, stockage à long terme, stockage de chaleur, efficacité énergétique, systèmes et procédés énergétiques

1. INTRODUCTION

Le stockage de l'énergie solaire s'avère aujourd'hui nécessaire si on veut atteindre une meilleure efficacité énergétique et une utilisation à grande échelle de cette ressource. Le stockage de la chaleur solaire, en particulier le stockage à long terme, a suscité beaucoup d'intérêts au moment des chocs pétroliers [1, 2] mais l'effondrement du prix du baril à partir du milieu des années 80 a fait baisser cet attrait. Avec le nouveau regain d'intérêt pour les énergies renouvelables, beaucoup d'études de systèmes de stockage de chaleur sont relancées. Une grande partie de la recherche dans ce domaine s'oriente vers une application dans le bâtiment, domaine consommateur de plus de 40% de l'énergie en Europe. Les systèmes basés sur le stockage de chaleur sensible et latente ont connu un développement relativement avancés et aujourd'hui, les recherches se tournent vers le stockage de la chaleur sous forme de potentiel chimique.

2. LES DIFFERENTS MODES DE STOCKAGE DE LA CHALEUR SOLAIRE A LONG TERME

Les différents modes de stockage de chaleur solaire à long terme sont présentés figure 1.

2.1. LE STOCKAGE PAR CHALEUR SENSIBLE

On y retrouve quatre formes de stockage, avec la chaleur essentiellement stockée dans l'eau. La densité de stockage étant faible dans ce mode de stockage, les importants volumes généralement mis en jeu pour le

stockage à long terme conduisent préférentiellement à des stockages souterrains ou installés près du sol [3]:

Le stockage d'eau chaude en cuve (fig. 2) : c'est le système le plus classique car l'eau a une excellente capacité calorifique spécifique et une bonne conductivité thermique d'où de bons coefficients de transferts thermiques. L'énergie solaire est recueillie pour porter l'eau contenue dans une cuve à une température élevée, comme c'est le cas des ballons d'eau chaude sanitaire. A cause de l'importance des volumes en jeu, le coût du génie civil et l'isolation demeure les principaux handicaps de ces systèmes puisque pour un stockage saisonnier, il faut de 50 à 100 cm d'isolant par exemple avec la laine minérale [4]. Une solution intermédiaire utilise des réservoirs enterrés ou fosses (fig. 2) proche de la surface du sol pour réduire les coûts élevés d'excavation et celui d'isolation qui peut se réduire alors simplement à la partie supérieure du réservoir. Pour des raisons de tenue mécanique, un stockage utilisant un mélange d'eau et de gravier comme matériau de stockage (60 à 70% de gravier en volume) [5] est parfois le plus économique [6, 7]: en effet, dans les cas où la partie supérieure du réservoir doit être utilisée pour une construction, les coûts de travaux conduisent à ce choix qui renforce la tenue mécanique de l'ouvrage. Puisque la chaleur spécifique du gravier est inférieure à celle de l'eau, la densité de stockage est de fait réduite de moitié environ.

Le stockage en caverne: l'eau dans laquelle est stockée la chaleur est contenue dans une cavité souterraine rocheuse (fig. 2) ce qui permet de réduire considérablement les pertes thermiques, les roches sèches étant peu conductrices.

Le stockage par champ de sondes (fig. 2): la chaleur est stockée directement dans le sous-sol (sable, argile, roche, etc.) au moyen d'échangeurs verticaux introduits

* auteur correspondant

Adresse électronique : nolwenn.le-pierres@univ-savoie.fr

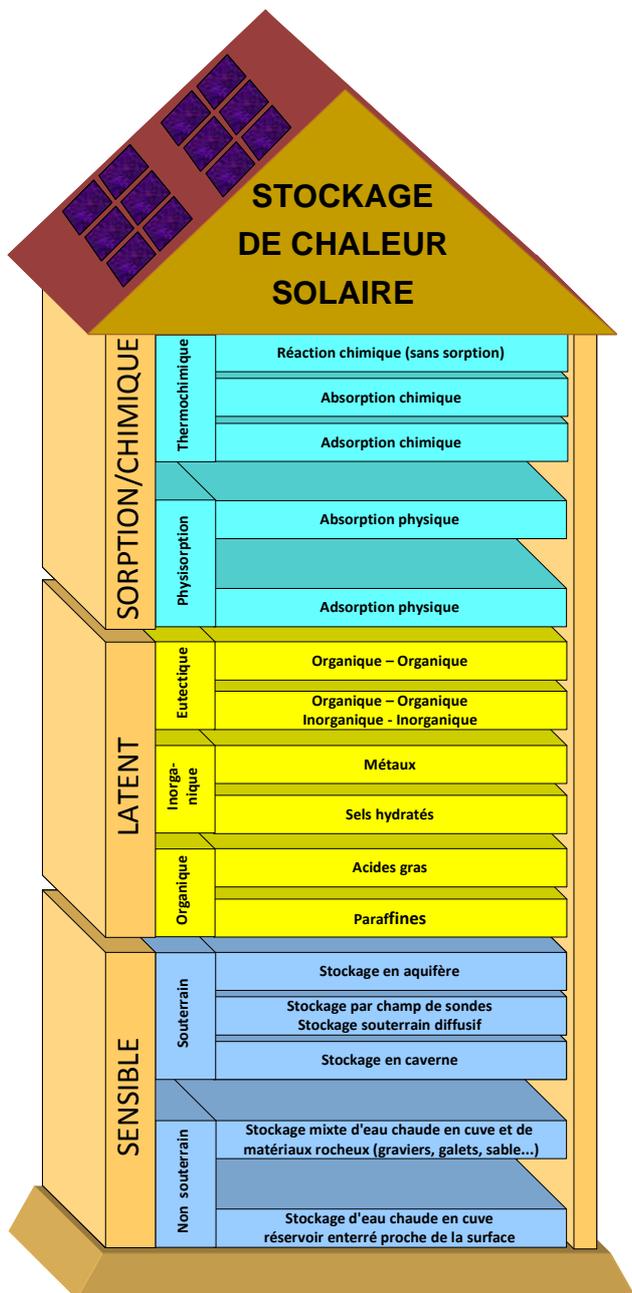


Fig. 1. Les différents modes de stockage de la chaleur solaire

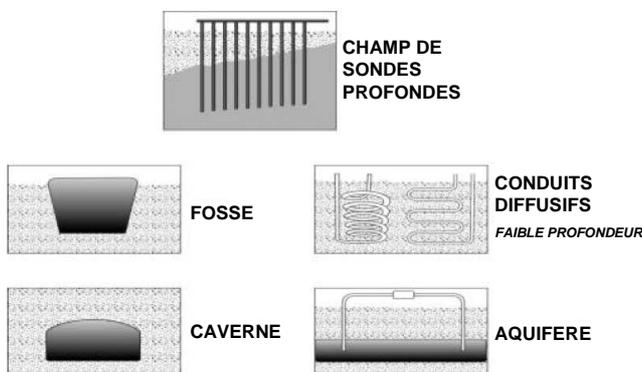


Fig. 2. Principaux concepts pour le stockage souterrain de la chaleur [8]

en profondeur (100-200 m) [8]. Ils sont notamment utilisés pour « charger » des terrains dans lesquels sont

implantés des puits géothermiques. Une variante de cette technique est le stockage souterrain diffusif qui utilise le même principe mais avec des sondes peu profondes et parfois horizontales ou inclinées.

Le stockage en aquifère : la chaleur est stockée dans de l'eau naturellement présente dans un aquifère (fig. 2). C'est une technologie relativement rentable [9] mais la contrainte majeure demeure la nécessité de la présence d'une formation géologique adaptée.

Chacun des concepts sus-décrits a été mis en œuvre en Allemagne [6]. Les coûts spécifiques de ces types de stockage demeurent encore très élevés actuellement et beaucoup d'efforts restent à faire pour atteindre une faisabilité technique et économique convenables [3].

2.2. LE STOCKAGE PAR CHALEUR LATENTE

Le stockage par chaleur latente est basé sur la chaleur latente libérée ou absorbée par un corps lorsqu'il change d'état. Les chaleurs latentes de changement de phase étant généralement très élevées par rapport à la capacité calorifique spécifique, les densités de stockage obtenues dans ce mode de stockage sont plus élevées que dans le cas du stockage par chaleur sensible : 5 à 14 fois d'énergie par unité de volume (kWh/m^3) [10] en théorie. Les matériaux à changement de phase (MCP) sont cependant peu utilisés dans le stockage à long terme [11]. Parmi les principales difficultés rencontrées dans l'utilisation des MCP se trouvent leur caractère corrosif, leur faible conductivité thermique et la stabilité chimique des matériaux: en général, le matériau tend à perdre sa stabilité après plusieurs cycles (parfois juste après deux cycles) et les performances peuvent diminuer rapidement. Des mélanges de matériaux sont parfois réalisés pour profiter des avantages de différents MCP organique ou inorganique : c'est ce qui donne les eutectiques. Suite à la récente tâche de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) sur le stockage thermique (tâche 32), il ressort que les améliorations apportées par l'utilisation des MCP sont très limitées comparativement au stockage par chaleur sensible (eau) [11]. Leur densité de stockage n'est vraiment supérieure par rapport à celle de l'eau que lorsque la plage de température de fonctionnement du procédé est relativement faible. De plus, au point de vue économique, les systèmes utilisant les MCP sont deux fois plus chers [12].

Plusieurs matériaux ont été étudiés [13] mais l'enjeu aujourd'hui reste la recherche du matériau présentant la plus grande chaleur de fusion, ce à quoi s'attelle l'industrie en sachant que ces matériaux doivent être abondamment disponibles et à moindre coût. Cette recherche doit se faire, non plus au niveau principe mais en intégrant la dimension application-système car même lorsque la chaleur de fusion du matériau est théoriquement importante, des difficultés pratiques (transfert de chaleur, plage d'utilisation, stabilité, coût, etc.) viennent entraver les performances.

2.3. LE STOCKAGE PAR SORPTION ET PAR VOIE THERMOCHIMIQUE

Un état de l'art sur le stockage solaire par sorption est donné dans [14]. Le stockage chimique d'énergie utilise des réactions chimiques réversibles pour stocker la chaleur. Suivant la forme de l'énergie fournie à la réaction, on parlera de stockage thermochimique (énergie thermique), stockage électrochimique (énergie

électrique) ou de stockage photochimique / photosynthèse (rayonnement électromagnétique) (fig. 3).

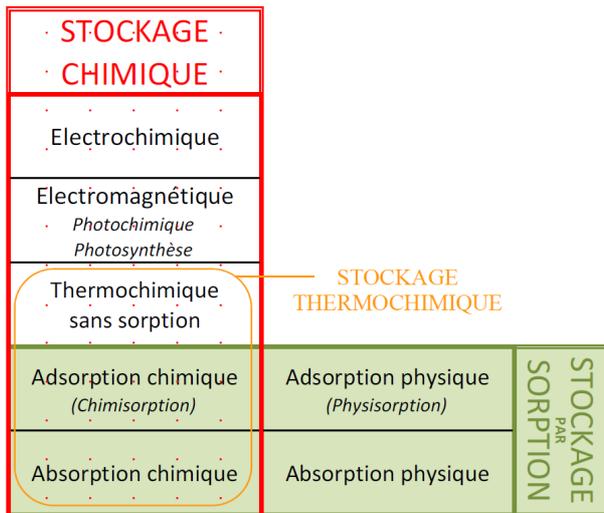


Fig. 3. Classification du stockage chimique et du stockage par sorption

La sorption est une rétention de gaz ou de vapeur (le sorbat) par un solide ou un liquide (le sorbant) [15, 16]. Elle désigne soit l'absorption, soit l'adsorption. Cette dernière, un phénomène de surface, est définie comme la rétention de gaz ou de liquide par un solide ou un liquide par adhésion superficielle, ou plus usuellement la rétention de gaz à la surface d'un solide ou d'un matériau poreux [16-18]. On parle d'adsorption chimique (chimisorption), qui met en jeu les liaisons de covalences, et d'adsorption physique (physisorption), qui est due aux forces de Van der Waals [13, 15, 17-21]. L'absorption désigne un phénomène dans lequel une substance (liquide ou gaz) pénètre dans une autre (solide ou liquide) [15, 18, 19]. Dans les applications de stockage de chaleur, l'absorption correspond généralement à l'absorption d'une vapeur par un liquide. La sorption chimique est caractérisée par une variance égale à un et met en jeu plus d'énergie que la sorption physique, qui a une variance égale à deux [20-22]. Ainsi, il suffit d'une variable d'état (par exemple la température ou la pression) pour décrire complètement un phénomène en équilibre de chimisorption tandis qu'il en faut deux (par exemple la température, la pression ou la concentration du sorbat dans le sorbant) pour décrire complètement un équilibre de sorption physique. Les stockages par sorption et par voie thermochimique sont basés sur des phénomènes physico-chimiques réversibles :



La chaleur est fournie au couple de sorption AB qui se dissocie en absorbant la chaleur pour donner deux composés A et B qu'on peut stocker séparément : c'est le phénomène endothermique. Lorsque ces deux produits de réaction sont mis en contact, la réaction inverse se produit et le composé AB se forme de nouveau, ce qui libère de la chaleur.

Ce principe de sorption est déjà utilisé dans les technologies de pompe à chaleur, les machines à absorption de froid solaire, les systèmes thermochimiques de transport à longue distance [23, 24] de chaleur et/ou de froid, la récupération de la chaleur et l'utilisation des rejets thermiques.

En ce qui concerne le stockage de chaleur par sorption, il existe des systèmes ouverts et fermés, les derniers étant les plus étudiés actuellement.

Le système fonctionne en charge en périodes ensoleillées (régénération) et en décharge en périodes de demande de chaleur. Pendant les périodes ensoleillées, l'énergie solaire est captée par des capteurs solaires et délivrée au sorbant. Ce dernier libère alors le sorbat qui est recueillie dans un réservoir : c'est la réaction de l'équation (1) (sens direct). Le sorbant et le sorbat sont stockés séparément aussi longtemps que nécessaire. L'énergie étant stockée sous forme de potentiel chimique, il n'y a pratiquement pas de perte thermique même si les réservoirs sont à température ambiante. Au moment de la demande de chaleur, les deux produits de la réaction sont mis en contact : la réaction inverse de l'équation (1) se produit et libère la chaleur.

Les récents programmes internationaux liés au stockage de chaleur, tels que HYDES [25-27], MODESTORE [26-28] et la Tâche 32 de l'AIE, se sont intéressés à ce mode de stockage perçu comme le plus efficace pour le stockage de chaleur solaire à long terme en particulier pour le bâtiment. C'est dans ce cadre que le projet PROSSIS, PROCédé de Stockage Inter Saisonnier, a été initié par le Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE).

3. PROCEDE DE STOCKAGE SOLAIRE INTER SAISONNIER PAR ABSORPTION AVEC LE BROMURE DE LITHIUM/EAU

L'objectif du projet est de développer un procédé innovant pour le stockage saisonnier de l'énergie solaire par absorption pour couvrir les besoins de chauffage dans l'habitat. Le procédé étudié est basé sur l'absorption de l'eau par le bromure de lithium (LiBr), un couple largement utilisé dans les machines à absorption pour la production de froid solaire. L'absorption présente l'avantage d'offrir un bon coefficient de transfert de chaleur du sorbant aux échangeurs de chaleur puisque la conductivité thermique des liquides est généralement plus élevée que celle des solides : la densité de puissance est en effet un des problèmes rencontrés dans les procédés à adsorption qui utilisent des matériaux poreux. En outre, les phases liquides peuvent aisément être pompées d'un réservoir vers un autre à travers un réacteur.

3.1. DESCRIPTION DU PROCEDE

Le système comprend quatre composants principaux (fig. 4) : un générateur, un évaporateur/condenseur, un réservoir de stockage de solution aqueuse de LiBr et un réservoir de stockage d'eau. Pendant les périodes ensoleillées, comme en été, l'eau contenue dans la solution de LiBr est désorbée dans le générateur à partir de la chaleur reçue par des capteurs solaires thermiques. La vapeur d'eau libérée est condensée dans un condenseur puis stockée dans le réservoir de stockage d'eau tandis que la solution concentrée rejoint le réservoir de solution. La chaleur de sorption est alors stockée avec une perte négligeable puisque conservée sous forme de potentiel chimique. En période de demande de chaleur, en particulier en hiver, la solution absorbe dans le générateur la vapeur d'eau qui est

évacuée dans l'évaporateur: la chaleur de ce phénomène exothermique est récupérée pour le chauffage du bâtiment. Les pompes (W1 à W4 sur fig. 4) assurent la circulation des différents fluides. La quantité l'énergie stockée est pratiquement proportionnelle à la quantité d'eau désorbée : plus il y a d'eau stockée, plus il y a d'énergie en stock et plus la solution finale est concentrée. Ceci conduit à envisager de désorber la solution au point d'y admettre des cristaux : la densité de stockage du système est ainsi améliorée. Cela pose toutefois quelques difficultés technologiques.

3.2. SIMULATION DYNAMIQUE DU PROCÉDE

Un modèle basé sur les équations de bilans d'énergie et de masse ainsi que les propriétés du couple LiBr/H₂O a été développé pour dimensionner et simuler les performances du système sous différentes conditions climatiques. Les principaux paramètres du modèle sont les données météorologiques (rayonnement solaire et température), la surface des capteurs solaires et la demande en puissance du bâtiment à chauffer. Différentes variables telles que la température ou la pression interne des composants, les masses d'eau et de solution ainsi que de cristal d'hydrate de LiBr, la concentration de la solution, les pertes thermiques vers l'ambiance des différents composants... peuvent être prédites.

Des simulations dynamiques ont été réalisées pour une maison individuelle (120m²) satisfaisant au standard Maison Passive. Les données météorologiques sont celles de la région de Chambéry, mesures prises en 2005.

Les principaux résultats sont présentés dans le tableau 1. r y représente la valeur maximale, durant un cycle, du rapport masse de solide présent dans le réservoir sur la masse de liquide présent dans le réservoir. $r = 4$ veut par exemple dire que le pourcentage (massique) maximal de solide observé dans le réservoir durant ce cycle est égal à 80%. Un stockage sans cristallisation correspond à $r = 0$. Le rendement est défini par le rapport de l'énergie délivrée au bâtiment sur énergie solaire utile. Il est de l'ordre de 32%.

Ces simulations montrent l'intérêt de la cristallisation dans le stock, qui permet de plus que doubler la densité de stockage énergétique. Elle requiert toutefois un peu plus d'énergie et donc a priori plus de surface de capteur solaire. On remarque aussi que malgré la densité de stockage élevée de ce système (200 kWh/m³ contre 50 kWh/m³ pour l'eau entre 35 et 80°C), le volume requis pour stocker les besoins annuels de 1800 kWh d'une maison récente demeure important puisqu'il

faut prendre en compte également les volumes du réservoir d'eau et celui des échangeurs. La cristallisation apparaît comme nécessaire pour une meilleure compétitivité du procédé.

Le coût élevé du LiBr, matériau utilisé dans le cadre de ce projet de démonstration de faisabilité, ne permet pas a priori d'envisager une application commerciale de cette technologie à l'échelle d'une maison individuelle. D'autres matériaux moins coûteux seront examinés à l'avenir.

Tableau 1. Principaux résultats de la simulation dynamique du système pour une maison passive (1800 kWh de besoin annuel en chauffage)

Paramètre	Unité	r = 0	r = 1.75	r = 4
Surface de capteur solaire	m ²	13	14	15
Masse de sel de LiBr contenu dans la solution	t	18.4	7.5	6.9
Volume utile du réservoir de solution de LiBr	m ³	22.3	9.7	9.0
Volume utile du réservoir d'eau	m ³	3.8	3.8	3.8
Concentration massique maximale en LiBr dans le stock	%	58.1	66.3	68.2
Température moyenne du caloporteur vers le bâtiment	°C	33	33	34
Rendement	%	32	32	32

4. CONCLUSION

Les stockages par chaleur sensible et latente ont été explorés de façon relativement avancées par les chercheurs. Les limites qu'ils présentent ont conduit à se lancer dans l'étude de procédés de stockage par sorption ou par voie thermochimique, perçus comme potentiellement plus adaptés au stockage à long terme. Un procédé de stockage basé sur l'absorption de l'eau par le bromure de lithium est actuellement. Une modélisation dynamique du procédé a été développée et un prototype est actuellement en cours de construction pour valider cette modélisation. Le système sera alors intégré dans une modélisation plus globale du bâtiment et le procédé optimisé.

REMERCIEMENTS

Ce projet PROSSIS est financé par l'Agence Nationale de la Recherche : ANR-07-Stock-E-08.

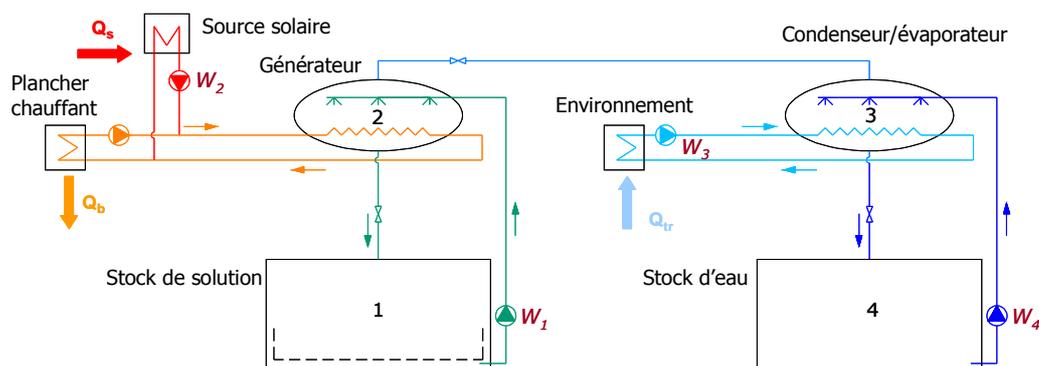


Fig. 4. Schéma du procédé de stockage de chaleur par sorption

REFERENCES

- [1] Johansson S. Design of aquifer thermal energy storage : a case study. Stockholm: Swedish Council for Building Research, 1989.
- [2] Citherlet S. A brief history of PCMs for heat storage. In: Thermal energy storage for solar and low energy buildings - State of the Art. Hadorn J-C, editor. Lleida, Spain: Servei de Publicacions de la Universitat de Lleida, 2005, pp. 63 - 69.
- [3] Novo AV, Bayon JR, Castro-Fresno D, Rodriguez-Hernandez J. Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel-water pits. Applied Energy 2009;87(2):390-397.
- [4] Hadorn J-C, editor. Thermal energy storage for solar and low energy buildings - State of the Art. Lleida, Spain: Servei de Publicacions de la Universitat de Lleida, 2005.
- [5] Silke Köhler, Kabus F, Huenges E. Seasonal Storage of Thermal Energy. In: Renewable Energy Sustainable Energy Concepts for the Future. Roland Wengenmayr, Bührke T, editors.: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2008, pp. 89 -95.
- [6] Ochs F, Nußbicker-Lux J, Marx R, Koch H, Heidemann W, Müller-Steinhagen H. Solar assisted district heating system with seasonal thermal energy storage in Eggenstein-Leopoldshafen. Proceedings of the Eurosun 2008, 1st International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings. Lisbon, Portugal, 2008.
- [7] Ochs F, Heidemann W, Müller-Steinhagen H. Performance of Large-Scale Seasonal Thermal Energy Stores. Journal of Solar Energy Engineering 2009;131(4):041005-041007.
- [8] Nielsen K. Thermal Energy Storage -A State-of-the-Art. A report within the research program Smart Energy-Efficient Buildings at the Norwegian University of Science and Technology and SINTEF 2003.
- [9] International Energy Agency. Energy Conservation through Energy Storage Programme. 2006. <http://www.iea-eces.org>.
- [10] Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009;13(2):318-345.
- [11] Streicher W. Final report of Subtask C "Phase Change Materials" - The overview. 2008. www.iea-shc.org.
- [12] Cassidy ES. Prospects for sustainable energy: a critical assessment. Cambridge University Press, 2000.
- [13] Zalba B, Marín JM, Cabeza LF, Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering 2003;23(3):251-283.
- [14] N'Tsoukpoe KE, Liu H, Le Pierrès N, Luo L. A review on long-term sorption solar energy storage. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009;13(9):2385-2396.
- [15] Office de la Langue Française (OLF). Grand Dictionnaire Terminologique. Québec, Canada. www.olf.gouv.qc.ca.
- [16] Hauer A. Sorption theory for thermal energy storage. In: Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption. Springer Netherlands, editor., 2007, pp. 393-408.
- [17] Inglezakis VJ, Pouloupoulos S. Adsorption, Ion Exchange and Catalysis: Design of Operations and Environmental Applications. Elsevier, 2006.
- [18] Armstrong F, Blundell K. Energy... beyond oil. Oxford University Press, 2007.
- [19] Global Encyclopaedia of Environmental Science, Technology and Management. Vol. 1. Madan S, Madan P, editors. Delhi, INDIA: Dr. N.K. Singh, 2009.
- [20] Wang LW, Wang RZ, Oliveira RG. A review on adsorption working pairs for refrigeration. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009;13(3):518-534.
- [21] 2005 ASHRAE Handbook: Fundamentals. I-P Edition. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2005, pp. 1.13-11.15
- [22] Wongsuwan W, Kumar S, Neveu P, Meunier F. A review of chemical heat pump technology and applications. Applied Thermal Engineering 2001;21(15):1489-1519.
- [23] Berthiaud J, Mazet N, Luo L, Stitou D, Descamps I. Long-distance transport of thermal energy using sorption cycles. Proceedings of ATI Conference. Milano, Italy, 2006.
- [24] Ma Q, Wang RZ, Luo L, Zaizhong X, Peng L. Transportation of low-grade thermal energy over long distance by ammonia-water absorption. Chinese Science Bulletin 2009;54(6):948-957.
- [25] Núñez T, Mittelbach W, Henning H-M. Development of an adsorption chiller and heat pump for domestic heating and air-conditioning applications. Applied Thermal Engineering 2007;27(13):2205-2212.
- [26] Hauer A. Adsorption systems for TES-Design and demonstration projects. In: Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption, 2007, pp. 409-427.
- [27] MODESTORE Modular High Energy Density Sorption Storage. [cited 2010 15 january]; www.ise.fhg.de.
- [28] Gartler G, Jähnig D, Purkarthofer G, Wagner W. Development of a High Energy Density Sorption Storage System. Proceedings of the Eurosun 2004. Freiburg, Germany, 2004.