

Stockage de chaleur solaire par sorption : Analyse et contrôle du système à partir de sa simulation dynamique

Kokouvi Edem N'TSOUKPOE¹, Nolwenn LE PIERRÈS^{1*}, Lingai LUO¹

¹LOCIE, CNRS FRE3220-Université de Savoie, Polytech Annecy-Chambéry, Campus Scientifique, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget-Du-Lac Cedex, France

* (auteur correspondant : nolwenn.le-pierres@univ-savoie.fr)

Résumé - Une étude théorique d'un procédé de stockage saisonnier de chaleur solaire par sorption et utilisant le bromure de lithium/eau comme fluides de travail a été présentée. A partir d'un modèle brièvement décrit dans la présentation, des simulations paramétriques sur des périodes de trois jours ont permis d'analyser les effets de deux éléments du contrôle du procédé sur ses performances: le débit de circulation de la solution de bromure de lithium et la température minimale du caloporteur admissible dans le générateur.

1. Introduction

Le stockage sous forme de potentiel chimique se révèle être adapté au stockage de chaleur sur le long terme parce qu'il a peu de perte thermique à l'ambiance. Quoique des avancées significatives aient été faites ces dernières années dans ce domaine, il n'existe pas aujourd'hui de système achevé dédié à ce type de stockage [1]. Le but du présent travail est de développer un procédé de stockage de chaleur solaire à long terme par absorption pour le chauffage dans l'habitat. Cette communication présente les résultats de diverses simulations dynamiques paramétriques sur des courtes périodes dans le but de définir certains paramètres à utiliser pour le contrôle du procédé lui-même.

2. Présentation et fonctionnement du système

Le système comprend quatre composants principaux (Fig. 1): un générateur (désorbeur/absorbeur), un évaporateur/condenseur, un réservoir de stockage de solution aqueuse de bromure de lithium (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 la chaleur de ce phénomène endothermique (désorption) est 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 évaporée dans l'évaporateur: la chaleur de cette réaction exothermique est récupérée pour le chauffage du bâtiment. Le diagramme de la figure 2 présente le cycle annuel de la solution de LiBr. En début d'été, la solution est à la température T_s de l'environnement dans lequel est installé le réservoir (point 1). Lorsqu'il y a des apports solaires, la solution diluée est pompée du réservoir de solution vers le désorbeur. Elle est alors chauffée par le fluide caloporteur (circuit solaire) et sa pression augmente jusqu'à l'équilibre (point 2) avec la pression de l'eau régnant dans le condenseur: il s'agit d'un apport de chaleur sensible. Si les apports continuent et le niveau de température est suffisant, la solution bout alors et libère la vapeur d'eau, se concentre jusqu'à atteindre une concentration plus grande (point 3) tandis que la vapeur d'eau

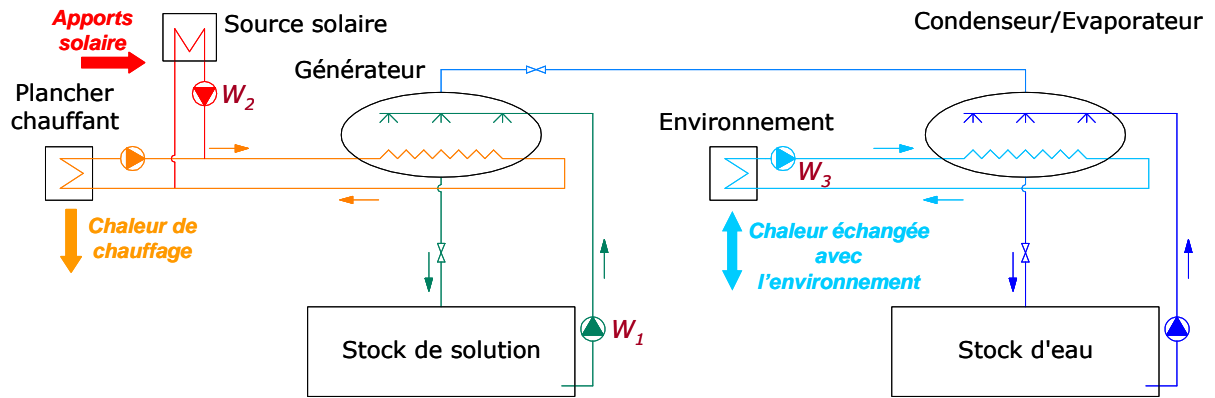


Figure 1 : Schéma des composants du système pour la simulation dynamique

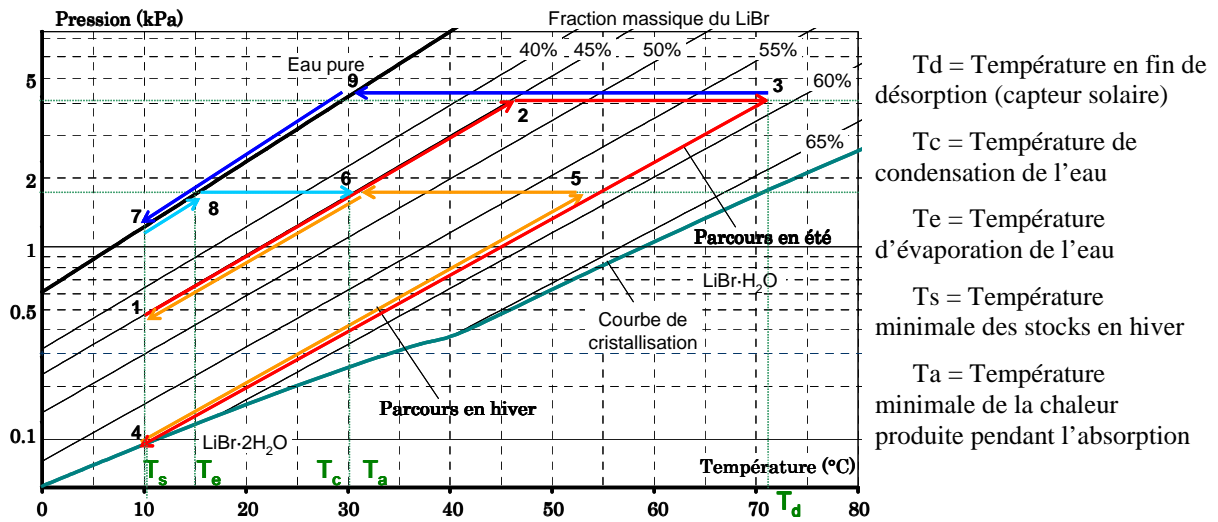


Figure 2 : Cycle thermodynamique annuel du procédé de stockage

désorbée se condense dans le condenseur (point 9) : c'est la phase « efficace » de la désorption. L'eau condensée sort du condenseur et rejoint le réservoir de stockage de l'eau (point 7). La solution concentrée sort du désorbeur pour rejoindre le réservoir de solution concentrée, a priori non isolé, où elle se refroidit (point 4) : la chaleur sensible est ainsi perdue. En phase de décharge, le générateur, qui fonctionne alors en absorbeur, est alimenté en solution concentrée par l'intermédiaire d'une pompe de circulation. La solution commence à absorber de l'eau afin d'équilibrer sa pression avec celle de l'eau dans l'évaporateur (point 5). Suit l'absorption à pression constante de la vapeur d'eau produite à l'évaporateur, ce qui se traduit par la diminution en concentration et en température de la solution (point 6). La solution diluée ainsi obtenue regagne le réservoir de stockage de solution (point 1). 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 amène à envisager de désorber la solution jusqu'à y admettre des cristaux en dépassant sa solubilité à la température du stock : la densité de stockage du système est ainsi améliorée.

3. Modélisation du procédé

Un modèle basé sur les équations d'échanges de chaleur et de masse ainsi que les propriétés du couple LiBr/H₂O été développé. Les principaux paramètres du modèle sont les données météorologiques (rayonnement solaire et température) et la surface des capteurs solaires, 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.

4. Simulation dynamique

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. Le pas de temps des données météo est de cinq minutes et le pas de temps de simulation égal à la seconde. Comme les paramètres sont relativement nombreux, nous ne pouvons pas tous les décrire ici. La concentration minimale massique de solution dans le réservoir a été fixée à 52%. Les réservoirs ne sont pas isolés et sont enterrés, donc supposés à la température du sol supposée elle-même constante à 5°C. Lorsque la température de la solution est très élevée dans le générateur mais la pression de condensation est basse, il y a un risque de cristallisation de la solution dans le générateur si elle croise dans la zone métastable, ou, pour simplifier, la ligne de cristallisation (Fig. 2). On a donc fixé à 90°C la température maximale du fluide caloporteur qui entre dans l'échangeur du générateur. Les coefficients de transferts de chaleur des échangeurs du générateur et du condenseur ont été supposés constants et égaux à 0.4 kW/°C.

L'objectif visé est de recueillir la plus grande quantité d'eau possible dans le réservoir d'eau, en utilisant le moins d'énergie solaire possible, et donc une moindre surface de capteur solaire et un meilleur coefficient de performance (énergie déstockée/énergie solaire fournie au système pour la charge), avec la moindre durée de fonctionnement des pompes de circulation (W1 à W4, Fig. 1) et donc une moindre consommation d'énergie électrique.

4.1. Débit de circulation de la solution de bromure de lithium en période de charge

Un des premiers paramètres à optimiser est le débit de circulation de la solution de LiBr. La technologie d'échangeur retenue pour le générateur est le film tombant [2]. Lorsque le débit de solution est élevé, les parois sont bien mouillées et les transferts de chaleur améliorés quoique les coefficients d'échange de chaleur varient peu, le régime étant laminaire. En plus, le risque de cristallisation de la solution dans le générateur est moins élevé puisque la température de désorption serait a priori plus faible. L'inconvénient est que les transferts de chaleur sensible soient un peu trop importants, ce qui joue négativement sur les performances du système. Un débit élevé suggère également une énergie électrique plus importante pour assurer la circulation de la solution par les pompes. Notre simulation prend en compte des contraintes relatives à l'échangeur qui exigent, notamment un débit de solution de supérieur à environ 0.01 kg/s. La température minimale du caloporteur qui rentre au générateur est fixée à 45°C. Plusieurs simulations avec d'autres températures minimales ont été réalisées, et ce choix ne change pas les conclusions qui suivront. Quatre simulations sur une période de trois jours (22-24 avril) en variant simplement le débit de la solution de LiBr de lithium ont été réalisées. Les résultats sont présentés dans le tableau 1. La simulation n°1 a été réalisée pour examiner les tendances en performance du système pour un débit inférieur à 0.01 kg/s.

n° simulation	1	2	3	4
Débit (kg/s)	0.005	0.01	0.02	0.04
Masse d'eau désorbée (kg)	34.2	39.63	35.88	23.6
Energie solaire délivrée au générateur (kWh)	33.24	41.76	46.53	50.07
Durée de fonctionnement des pompes (h)	12.50	11.78	11.03	10.31

Tableau 1 : Période de charge : performances du système pour différentes valeurs de débit

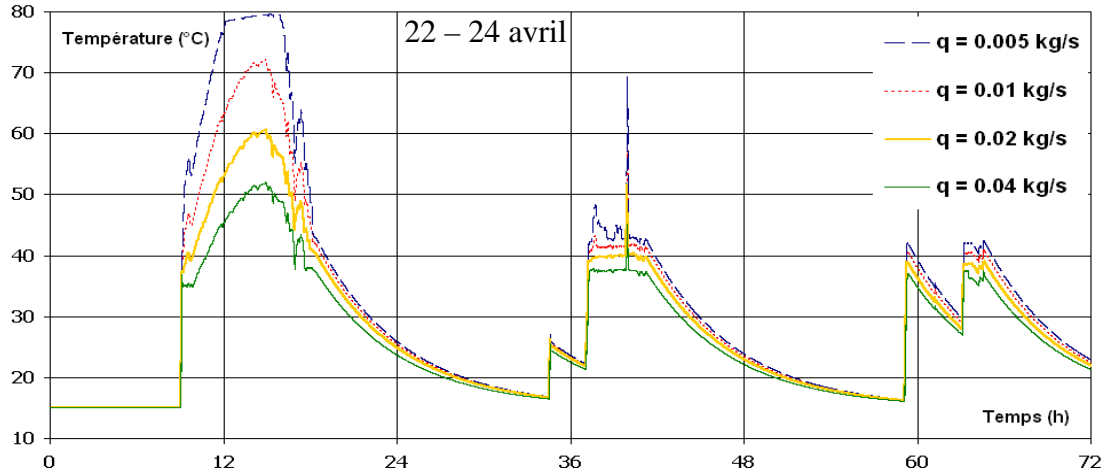


Figure 3 : Charge : température dans le générateur pour différents débits

Dans les simulations avec les débits les plus élevés (n°3 et n°4), une part plus importante de la chaleur du fluide caloporteur a été utilisée pour chauffer la solution de LiBr (transfert de chaleur sensible, phase 1–2 sur la figure 2) que dans la simulation n°2 : cela résulte en une moindre quantité d'eau désorbée. Toutefois, les capteurs solaires affichent un meilleur rendement dans ces deux cas : l'énergie évacuée au générateur est à chaque passage plus importante que dans le cas de la simulation n°1, ce qui abaisse la température du caloporteur retournant aux capteurs d'où un meilleur rendement. Cette énergie est malheureusement « perdue » sous forme de chaleur sensible une fois que la solution de LiBr retourne dans son réservoir. La différence entre les quantités d'eau désorbées dans les simulations n°1 et n°2 s'explique autrement. Pour libérer la même quantité d'eau que dans le cas n°2, le bilan de masse impose que la solution dans la simulation n°1 sorte du générateur en étant plus concentrée que pour un débit plus élevé (n°2). Lorsque la pression de condensation est fixée, la solution sortant dans la simulation n°1 n'atteint pas la concentration nécessaire pour que les quantités d'eau désorbée soient équivalentes parce que sur les quasi isobares de désorption la variation d'enthalpie spécifique croît avec et la concentration et la température. Pour les mêmes quantités d'énergie transférées au générateur, le cas n°1 se trouve défavorisé. Or, les apports ne sont pas identiques parce que le rendement du capteur solaire est meilleur dans le cas n°2, la température de désorption et donc la température retour au capteur étant plus basse (Fig. 3). En plus, puisque la désorption se fait à une température relativement plus élevée, la pression de condensation l'est également (mais dans une moindre mesure) ce qui va toujours dans le sens défavorable pour le cas n°1. Il est à souligner également que les concentrations à la fin de la désorption dans la simulation n°1 exposent plus au risque de cristallisation dans le générateur. Le débit de 0.01 kg/s a donc été retenu pour les simulations suivantes parce qu'il permet de désorber la plus importante quantité d'eau, ce qui signifie la plus grande quantité d'énergie stockée, et ce, à un coût électrique « raisonnable ».

4.2. Température minimale du fluide caloporteur admissible dans le générateur en période de charge

Lorsque la température du fluide caloporteur entrant dans le générateur est basse, elle peut s'avérer insuffisante pour désorber la solution et il n'y a qu'un transfert de chaleur sensible. Le COP du système s'en trouve dégradé. En plus, la durée de fonctionnement des pompes de circulation est a priori plus grande. Il convient donc de fixer une température minimale du fluide caloporteur admissible au générateur durant la période de charge. Si ce seuil est trop élevé, on risque cependant de ne pas suffisamment profiter de la ressource solaire, surtout les jours de faibles ensoleillements. Des simulations du procédé avec différentes valeurs de

température seuil ont été réalisées afin d'estimer un ordre de grandeur convenable. Le tableau 2 récapitule les performances sur une période de trois jours (22-24 avril).

n° simulation	5	6	7	8
Température seuil (°C)	30	40	50	60
Masse d'eau désorbée en fin du premier jour (kg)	37.09	37.08	37.02	36.48
Masse totale d'eau désorbée sur les trois jours (kg)	39.35	39.55	39.08	37.33
Energie solaire délivrée au générateur (kWh)	46.12	43.17	40.32	37.72
Durée de fonctionnement des pompes (h)	20.37	14.07	10.25	8.58

Tableau 2 : Charge : performances du système pour différentes valeurs de température seuil

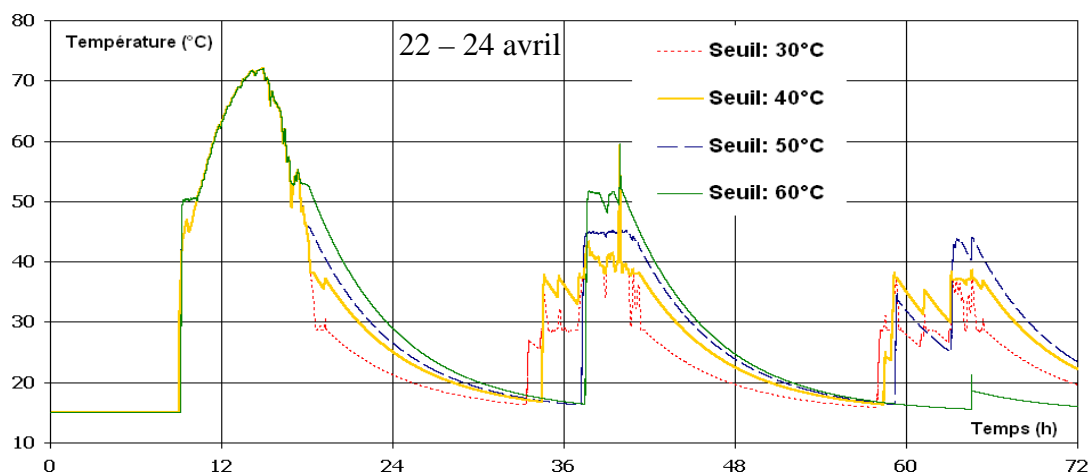


Figure 4 : Charge : température dans le générateur pour différentes valeurs de la température seuil

L'essentiel de l'eau est stockée le premier jour : quand la période est très bien ensoleillée, la température seuil ne joue pas un rôle important sur le fonctionnement du système puisque toutes les pompes démarrent et s'arrêtent presque à la même heure (Fig. 4). On a donc intérêt à choisir une température seuil élevée, comme 50°C, ce qui permet de réduire la consommation électrique des auxiliaires et un d'avoir un meilleur COP thermique. Lorsque la période est par contre peu ensoleillée et que le niveau de température du capteur solaire est relativement bas, des différences, dues notamment à la durée de fonctionnement du système, apparaissent : le système ne fonctionne pratiquement pas le troisième jour pour le seuil fixé à 60°C (Fig. 4). Plus généralement, ceci s'observe particulièrement pendant les périodes de chauffage où le rayonnement solaire est relativement faible mais suffisante pour charger le système et chauffer directement le bâtiment. Toutefois, si la température seuil est très basse, une part importante de l'énergie solaire sera transférée à la solution sous forme de chaleur sensible et la quantité d'eau désorbée est également basse. Les résultats précédents suggèrent que soient définis deux niveaux de température seuil : une sur la période bien ensoleillée de l'année et l'autre en mi-saison ou période chauffage. Nous avons opté respectivement pour 50°C et 40°C qui apparaissent comme un compromis raisonnable.

4.3. Débit de circulation de la solution de bromure de lithium en période de décharge

Un débit de solution élevé permet d'avoir des températures relativement plus élevées en sortie d'absorbeur car la concentration de la solution diminue plus faiblement durant l'absorption, à température d'évaporation égale. Il favorise en outre un mouillage suffisant des parois de l'absorbeur. L'inconvénient d'un débit élevé est la dégradation de la densité de

stockage. Ceci est en fait une conséquence du premier avantage énoncé: une plus grande quantité d'énergie est alors « perdue » puisque l'enthalpie spécifique de la solution sortant de l'absorbeur est plus élevée (masse, température et concentration élevées). Les résultats de trois jours de simulation (10-12 décembre) sont présentés dans le tableau 3. Les besoins totaux en chauffage sont de 51 kWh.

n° simulation	9	10	11	12
Débit (kg/s)	0.005	0.01	0.02	0.04
Masse d'eau absorbée (kg)	99.15	130.59	189.65	297.19
Energie thermique fournie au bâtiment (kWh)	50.9	50.9	50.9	50.9
Température moyenne de caloporteur (°C)	34	36	36	35

Tableau 3 : Décharge : performances du système pour différentes valeurs de débit

Si la quantité de chaleur fournie au bâtiment est la même, la quantité d'eau absorbée double pratiquement quand le débit passe de 0.005 kg/s à 0.02 kg/s. La valeur moyenne, sur les trois jours, de la température du fluide caloporteur allant vers le bâtiment varie également de quelques degrés. Cette simulation est faite dans une période où il y a encore du cristal dans le réservoir de solution, ce qui veut dire que c'est la période la plus favorable (comme une grande partie de l'hiver) pour obtenir des températures de caloporteur élevées. Vers la fin de l'hiver, les différences entre ces températures peuvent être plus importantes et sont généralement à l'avantage des systèmes avec les gros débits. Néanmoins, quand ces débits deviennent trop importants, la température, et donc la pression, baisse dans l'évaporateur puisqu'il y a beaucoup d'eau qui s'évapore tandis que la source de chaleur n'a pas changé. Cela se traduit par des températures en fin d'absorption plus basse. Nous avons donc retenu le débit de 0.01 kg/s pour la décharge également.

5. Conclusion

Cette étude a montré la nécessité d'un contrôle adapté et d'un bon choix des paramètres du procédé présenté en vue d'en tirer les meilleures performances. Le modèle utilisé a supposé un coefficient d'échange de chaleur constant, ce qui est peut-être proche de la réalité, mais changerait sans doute les performances au point de réduire les différences. La part éventuelle des variations de ces coefficients reste à évaluer, une modélisation fine de ces phénomènes n'étant pas encore disponible. Les résultats, issus des simulations et présentés dans [2], indiquent qu'avec 14 m² de capteurs solaires, il faut environ 7 t de LiBr (soit environ 8 m³ de solution de LiBr) pour satisfaire totalement les 1800 kWh des besoins annuels d'une maison passive située dans la région de Chambéry. Ces résultats seront confrontés avec ceux issus de l'expérimentation sur un prototype en construction.

Références

- [1] K. E. N'Tsoukpoe, H. Liu, N. Le Pierrès, L. Luo, A review on long-term sorption solar energy storage, *Ren. and Sus. Energy Rev.*, 13 (2009), 2385–2396.
- [2] N. Le Pierrès, L. Luo, K. E. N'Tsoukpoe, D. Mangin, L. Fan, P. Marty, C. Marvillet, C. Paulus, P. Lancereau, Procédé de stockage intersaisonnier de chaleur solaire pour le chauffage du bâtiment par procédé à absorption LiBr-H₂O, *Proc. Congrès français de thermique 2010* (Le Touquet, 25-28 mai 2010).

Remerciements

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