

# Pré-dimensionnement par simulations dynamiques d'un réacteur de stockage thermochimique assurant l'autonomie d'un système solaire combiné.

Samuel HENNAUT<sup>1\*</sup>, Sébastien THOMAS<sup>1</sup>, Philippe ANDRE<sup>1</sup>, Emilie COURBON<sup>2</sup>, Tangi LE BERIGOT<sup>2</sup>, Marc FRERE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université de Liège – équipe BEMS (Building Energy Monitoring & Simulation)  
185, Avenue de Longwy – 6700 Arlon – Belgique

\* (auteur correspondant : shennaut@ulg.ac.be)

<sup>2</sup>Université de Mons – Service Thermodynamique – Pôle Energie  
31, Boulevard Dolez – 7000 Mons – Belgique

**Résumé** – Etude du stockage de l'énergie solaire thermique sous forme thermochimique comme moyen d'assurer l'autonomie thermique d'une habitation basse énergie. La surface de capteurs nécessaire et les caractéristiques du stockage sont étudiées par simulation dynamique (TRNSYS), de manière générale et pour des couples adsorbant/adsorbat particuliers ( $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  et Charbon actif/Méthanol). Un système solaire combiné avec  $14,4 \text{ m}^2$  de capteurs plans et un stockage thermochimique de  $12,35 \text{ m}^3$  de  $\text{CaCl}_2$  permet d'assurer l'autonomie thermique d'une habitation « basse énergie » située en Belgique et une grande part de la production d'eau chaude sanitaire (ECS).

## 1. Introduction

Dans un climat tempéré froid, une installation solaire thermique traditionnelle nécessite toujours une énergie d'appoint pour rencontrer les besoins de chaleur d'un bâtiment résidentiel, même bien isolé. Cette contrainte est créée par le déphasage temporel saisonnier existant entre la disponibilité de la ressource solaire et les besoins du bâtiment. Pour y remédier, il est nécessaire de développer des dispositifs de stockage de l'énergie solaire thermique efficaces et peu coûteux [1-2] qui permettent d'accumuler l'énergie solaire excédante durant l'été pour la restituer en hiver lorsque l'apport solaire direct est insuffisant.

Le stockage thermochimique, qui utilise la chaleur de réaction des phénomènes de sorption pour stocker l'énergie thermique, peut constituer une solution intéressante pour rendre le chauffage solaire autonome (sans énergie d'appoint). En effet, ce mode de stockage offre une haute densité énergétique et des pertes thermiques négligeables [2]. Cette méthode de stockage est cependant relativement complexe. De plus, elle nécessite un apport de chaleur à basse température pour évaporer le sorbat en période de déstockage et il est nécessaire d'évacuer la chaleur restituée lors de la condensation du sorbat en mode stockage.

## 2. Démarche

L'objectif du présent travail est d'évaluer les caractéristiques auxquelles doivent répondre le système solaire thermique et le réacteur de stockage thermochimique pour assurer l'autonomie solaire d'une maison « basse énergie », c'est-à-dire fournir l'entièreté des besoins thermiques (chauffage et ECS) uniquement grâce au solaire. Cette étude est réalisée par étapes grâce au logiciel de simulation dynamique TRNSYS. Le bâtiment est d'abord considéré seul, puis les simulations sont enrichies successivement par le système solaire et enfin le réacteur de stockage thermochimique.

### 3. Bâtiment de référence

#### 3.1. Description et simulation du bâtiment de référence

Le bâtiment de référence est une habitation résidentielle unifamiliale d'une surface utile d'environ 100 m<sup>2</sup>. Il s'agit d'une construction à ossature bois récente à basse consommation. Un des pans de toiture de l'habitation est orienté au Sud avec une inclinaison de 40° par rapport à l'horizontale.

L'évaluation des besoins de chauffage du bâtiment de référence est réalisée grâce à un calcul dynamique [3], en soumettant le bâtiment au climat d'Uccle en Belgique (données Meteonorm). La température de consigne est constante à 20° au rez-de-chaussée et 18°C à l'étage. La consommation d'ECS est fixée à 200 litres par jour à 45°C. A ce stade la consommation énergétique pour la production d'ECS est simplement évaluée en supposant que la température de l'eau froide est constante à 5°C et sans tenir compte d'un éventuel rendement du système.

#### 3.2. Résultats

La demande en énergie thermique totale du bâtiment s'élève à 3431 kWh/an pour le chauffage et 3390 kWh/an pour l'ECS. Le rayonnement solaire sur la toiture est également évalué pour différentes surfaces de captation et les différentes configurations sont comparées au moyen de l'indice FSC (*Fractional Solar Consumption*) qui peut être défini comme la fraction solaire théorique maximale qui peut être atteinte sans perte thermique du système solaire combiné [4].

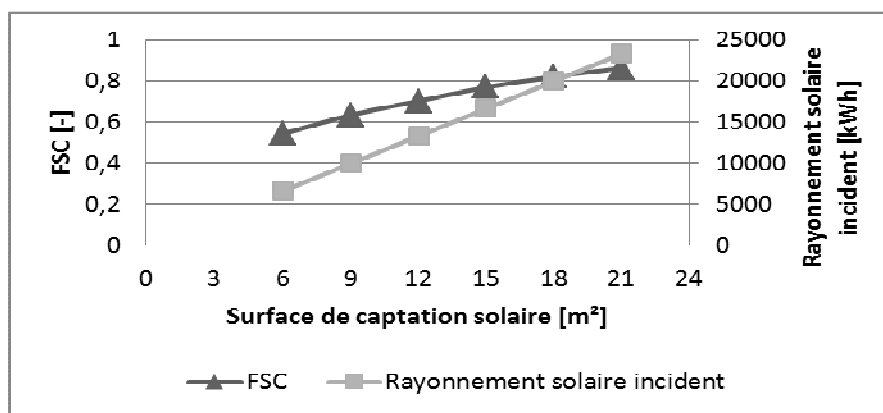


Figure 1 – Rayonnement solaire et indice FSC en fonction de la surface de captation

Malgré une faible demande énergétique, ces résultats indiquent que l'autonomie solaire du bâtiment n'est pas envisageable en conservant une surface de capteurs raisonnable, sans un dispositif de stockage inter-saisonnier.

### 4. Intégration d'un système solaire combiné au bâtiment de référence

#### 4.1. Description du système solaire combiné

Pour affiner les résultats précédents, un système solaire combiné (SSC) est intégré aux simulations du bâtiment de référence. Dans ce SSC, l'énergie solaire est convertie en chaleur au moyen de capteurs solaires plans à haute performance (rendement optique ( $a_0$ ) = 0.80 ; coefficient de perte linéaire ( $a_1$ ) = 1.57 W/(m<sup>2</sup>K) ; coefficient de perte quadratique ( $a_2$ ) = 0.0072 W/(m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>)). Le débit de la boucle solaire est fixé à 21,55 kg/(h.m<sup>2</sup>).

La chaleur récupérée par les capteurs est stockée dans un ballon de 500 litres servant à la production d'ECS et un ballon de 1000 litres qui alimente un plancher chauffant (au rez-de-chaussée et à l'étage) à une température de 35°C. Dans ce système, le ballon de chauffage est alimenté en priorité. Un appoint électrique est ajouté aux deux ballons afin d'évaluer les besoins en énergie d'appoint pour assurer la température de consigne, soit respectivement 40°C pour le ballon de chauffage et 50°C pour le ballon d'ECS. Une vanne mélangeuse permet d'obtenir de l'ECS à 45°C.

Pour toutes les simulations, il est supposé que la période de chauffage s'étend du 1<sup>er</sup> octobre au 30 avril. En dehors de cette période, le ballon de chauffage n'est pas utilisé, l'appoint du ballon d'ECS est coupé et l'énergie solaire peut être stockée thermochimiquement. La température des ballons est limitée à 95°C durant la période de chauffage. Pour l'ECS, cette température maximale est abaissée à 75°C durant la période de stockage afin d'accroître la quantité de chaleur disponible pour le stockage.

## 4.2. Résultats

L'objectif des simulations réalisées sur base de ce système est d'estimer la surface de capteurs et la quantité d'énergie qui devrait être stockée sous forme thermochimique pour assurer l'autonomie solaire du bâtiment de référence. Les apports solaires et les besoins en énergie d'appoint sont calculés pour chaque ballon en variant la surface de capteurs. De plus, les simulations permettent de connaître le rayonnement solaire « excédentaire », c'est à dire le rayonnement solaire qui atteint les capteurs durant la période de stockage, lorsque la pompe solaire est à l'arrêt.

La quantité d'énergie que le stockage inter-saisonnier doit fournir pour assurer l'autonomie solaire du système correspond à l'énergie consommée par les appoints électriques des ballons. La quantité d'énergie solaire disponible pour le réacteur de stockage est calculée en considérant un rendement de captation de 45 % du rayonnement solaire « excédentaire ». Dans ces conditions, la capacité du système à assurer son autonomie solaire est évaluée en calculant le « rendement fictif minimum » que doit atteindre le réacteur lors de la conversion de l'énergie stockable en énergie d'appoint pour les ballons. Ce « rendement fictif minimum » se calcule comme suit :

$$\eta_{min} [-] = \frac{E_{appoint} [kWh]}{45\% * E_{excédentaire} [kWh]} \quad (1)$$

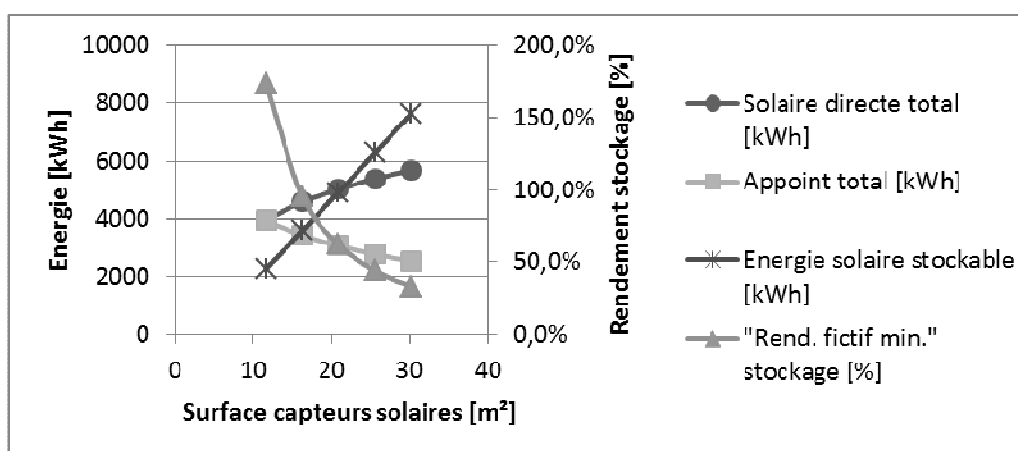


Figure 2 – Consommations annuelles du SSC et capacité de stockage

Un « rendement fictif minimum » supérieur à 1 indique que l'apport solaire total (utilisation directe et après stockage thermochimique) est insuffisant pour maintenir la

température de consigne des ballons. Par conséquent l'autonomie solaire du système ne sera pas assurée dans cette configuration.

A la Figure 2, on peut constater qu'environ 16 m<sup>2</sup> de capteurs solaires sont nécessaires pour que la production solaire annuelle totale rencontre les besoins du SSC, si le rendement du stockage inter-saisonnier est supposé de 100 %. Cette superficie est évidemment dépendante du rendement de captation de 45% imposé pour calculer l'énergie stockable.

## 5. Intégration du stockage thermochimique au système solaire combiné

L'intégration d'un modèle de réacteur thermochimique aux simulations est réalisée en deux étapes. La première étape a pour objectif d'évaluer l'influence de la température du réacteur sur la quantité d'énergie qui peut être stockée durant l'été. Pour ce faire, un modèle très simplifié, de type « boîte noire » a été utilisé.

Ensuite, les performances de différents couples de réactifs présélectionnés ont été évaluées grâce à l'intégration aux simulations d'un modèle plus complet de type « boîte blanche ». Parmi les réactifs sélectionnés, deux couples adsorbant/adsorbat font l'objet d'une attention plus approfondie : le « CaCl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O » ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ ) est un couple d'adsorbant chimique attractif pour son faible coût et le « Charbon actif (CA)/méthanol » est le couple d'adsorbant physique qui offre les meilleures performances en termes de densité énergétique pour l'application considérée.

### 5.1. Modèle simplifié de type « boîte noire »

Dans ce modèle, il est considéré que le réacteur de stockage est à une température d'équilibre constante durant toute la période de stockage et la température de sortie du fluide caloporteur est supérieure de 5°C à la température du réacteur. Toute l'énergie apportée au réacteur est supposée stockable sans perte thermique. Dans les simulations TRNSYS, le stockage thermochimique est intégré au SSC dans la boucle solaire. Le fluide caloporteur provenant des capteurs est envoyé vers le réacteur de stockage lorsque la demande des ballons est nulle. Notons cependant que ce modèle ne prend pas en considération la phase de déstockage. A ce stade, l'appoint des différents ballons est encore assuré électriquement.

### 5.2. Modèle détaillé de type « boîte blanche »

Ce modèle a été développé sous MATLAB et intégré à TRNSYS par l'intermédiaire du Type 155. Ce modèle, purement thermodynamique, est basé sur la courbe d'équilibre du couple adsorbant/adsorbant et de l'équilibre liquide/vapeur de l'adsorbant. Sur base des données fournies par TRNSYS (température et débit à la sortie des capteurs solaires) et à partir de bilans massiques et thermiques, le modèle permet de calculer, pour chaque pas de temps, l'état du système (température, pression) ainsi que les quantités d'adsorbant transférées et les quantités de chaleur échangée. Le modèle indique également à TRNSYS la température de retour du fluide caloporteur. Pour toutes les simulations réalisées sur base de ce modèle, la température d'évaporation et de condensation de l'adsorbant sont respectivement de 0°C et 24°C.

Pendant la phase de stockage, le réacteur est intégré à TRNSYS de la même manière que le modèle simplifié. Mais, contrairement au précédent, ce modèle permet d'envisager la phase de déstockage. Dans ce cas, l'eau sortant du ballon de chauffage traverse le réacteur de stockage pour y être réchauffée avant d'être envoyée vers le plancher chauffant. L'appoint

électrique du ballon de chauffage a donc été supprimé. En revanche, le stockage thermochimique n'est pas utilisé comme appoint pour l'ECS.

Afin de dimensionner au mieux le réacteur de stockage par rapport aux besoins du bâtiment, une optimisation est nécessaire. Les simulations ont porté sur trois cycles charge/décharge du stockage, c'est-à-dire sur trois années complètes. Dès lors pour réduire le nombre de simulations, un plan d'expérience composite centré a été élaboré. L'optimisation porte sur les 7 facteurs de réponse suivants : le nombre de degré-heure de sous-chauffe sur trois ans au rez-de-chaussée et à l'étage, la différence entre la chaleur stockée et déstockée pour chacune des trois années, l'écart-type de la différence entre la chaleur stockée et déstockée et finalement, la température maximale du réacteur. Ce dernier facteur n'est utilisé que dans le cas du CA/Méthanol. L'optimisation est réalisée en faisant varier 5 paramètres dont les plages de variation sont reprises au Tableau 1.

Paramètre / Couple	Unités	CaCl <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	CA/Méthanol
Masse de sel anhydre	[kg]	15 000 – 30 000	10 000 -25 000
Efficacité échangeur	[-]	0.3 -0.9	
Fraction volumique du sel	[-]	0.1-0.9	
Débit boucle solaire	[kg/(h.m <sup>2</sup> )]	15 - 25	
Surface capteurs	[m <sup>2</sup> ]	12 -25.52	12 - 30

Tableau 1 - Plages de variation des paramètres servant à l'optimisation

## 5.3. Résultats

### 5.3.1. Influence de la température du réacteur de stockage

Comme précédemment, l'apport solaire, l'énergie d'appoint, l'énergie stockée et le « rendement fictif minimum » du stockage sont simulés. Les variations de la température du réacteur et de la surface de capteurs sont envisagées simultanément. En fonction de la température du stockage, on constate (Figure 3) que la surface de capteurs doit être comprise entre 15 et 21 m<sup>2</sup> environ pour assurer l'autonomie solaire de l'installation, considérant un rendement de 100 % pour le réacteur de stockage.

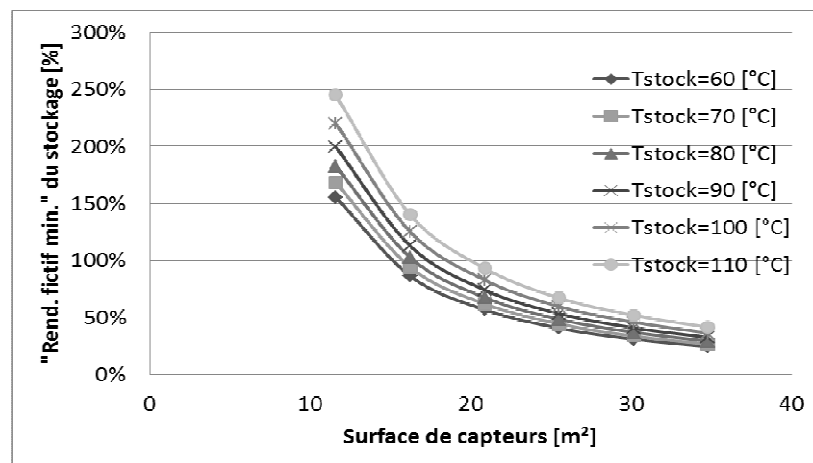


Figure 3 – « Rendement fictif minimum »

Comme on pouvait s'y attendre, pour une surface de capteurs donnée, on constate une diminution de l'énergie solaire stockée et une augmentation du « rendement fictif minimum » (Figure 3) lorsque la température de stockage augmente. La température de stockage n'a cependant pratiquement aucune influence sur l'utilisation directe de l'énergie solaire et sur les appoints. En comparant avec les résultats précédents (§4.2), on constate que le rendement de

captation de 45% imposé pour l'énergie solaire excédentaire donne des résultats équivalents à ceux obtenus pour une température de stockage avoisinant 75 °C.

### 5.3.2. Optimisation pour le couple « CaCl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O » et « Charbon actif/méthanol »

La solution optimale, qui minimise la différence entre la chaleur stockée et déstockée ainsi que le nombre de degré-heure de sous-chauffe du bâtiment, est obtenue pour les valeurs des paramètres repris au Tableau 2. Cette solution a été calculée grâce à un logiciel de statistiques, sur base des résultats obtenus lors des simulations déterminées dans le plan d'expérience. Dans le cas du couple CaCl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O, le volume de réacteur nécessaire s'élève donc à 12,35 m<sup>3</sup> pour une densité de stockage avoisinant les 200 kWh/m<sup>3</sup>.

Pour le couple CA/Méthanol, il est difficile de trouver un optimum qui minimise à la fois la sous-chauffe du bâtiment et l'écart entre l'énergie stockée et déstockée. La solution présentée au Tableau 2 constitue néanmoins un optimum local intéressant, car il offre un compromis et permet de maintenir la quantité de CA nécessaire dans des proportions acceptables. L'autonomie solaire de l'installation de chauffage est cependant légèrement inférieure à 100 % dans ce cas. Pour cette configuration, le volume du réacteur thermochimique est d'environ 40 m<sup>3</sup>, pour une densité énergétique de 60 kWh/m<sup>3</sup>.

Paramètre / Couple	Unités	CaCl <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	CA/Méthanol
Masse de sel anhydre	[kg]	22 470	16 497
Efficacité échangeur	[-]	0.87	0.3
Fraction volumique du sel	[-]	0.85	0.9
Débit boucle solaire	[kg/(h.m <sup>2</sup> )]	16.8	15
Surface capteurs	[m <sup>2</sup> ]	14.4	12.8

Tableau 2 – Paramètres obtenus après optimisation

## 6. Conclusion

L'utilisation d'un système de stockage thermochimique permet d'assurer l'entière des besoins de chauffage d'une habitation basse énergie tout en conservant une dimension relativement raisonnable du système solaire combiné dans le cas du CaCl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O qui nécessite un volume de réacteur de stockage de 12,35 m<sup>3</sup>. C'est plus discutable pour le Charbon actif/Méthanol (40 m<sup>3</sup>). Les densités énergétiques respectives sont de 200 et 60 kWh/m<sup>3</sup>. Pour ces deux couples, une part importante de la production d'ECS est également assurée. Etant donné son faible coût, le couple CaCl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O peut certainement être considéré comme un candidat intéressant pour ce type d'applications. La température de la réaction de stockage joue un rôle important dans le dimensionnement du système.

### Références

- [1] J.-C. Hadorn, "IEA Solar Heating and Cooling Programme Task 32 : Advanced storage concepts for solar and low energy buildings," in *Ecstock 2006 - The 10th International Conference on Thermal Energy Storage*, Richard Stockton College, New Jersey, USA, 2006.
- [2] K. E. NTsoukpoé, *et al.*, "A review on long-term sorption solar energy storage," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2385-2396, 2009.
- [3] "TRNSYS simulation studio," v. 16.00.003, licenced to Université de Liège.
- [4] T. Letz, "Validation and background information on the FSC procedure," IEA SHC2002.

### Remerciements

Les recherches présentées dans cet article sont menées dans le cadre du projet "SOLAUTARK", auquel participent les partenaires suivants : ESE, ArcelorMittal Liège R&D, Atelier d'architecture Ph. Jaspard, ULB, CTIB, M5, UMons et ULg. Projet financé par Plan Marshall Région Wallonne.