

Régulation solaire thermique et stockage de chaleur

Ing. C. PETITJEAN
Ir V. KELNER
Ing. D. MARÉCHAL
GRAMME – Liège

Cet article a pour objet les systèmes solaires thermiques domestiques. Dans un premier temps sont présentés les systèmes de stockage de chaleur innovants basés sur la chaleur latente et l'énergie thermochimique. Ensuite, l'intérêt d'une régulation efficace de ces systèmes est décrit au travers d'un projet de développement.

Mots clés : solaire, thermique, régulation, stockage de chaleur, chaleur latente, stockage thermochimique, adsorption, paraffine, zéolite, Enersol.

This paper focuses on domestic solar thermal systems. First, innovative heat storage systems based on the latent heat and thermochemical energy are introduced. Afterwards, the interest of an effective regulation of these systems is described through a development project.

Keywords: solar, thermal, controller, heat storage, latent heat, thermochemical storage, adsorption, paraffin, zeolite, Enersol.

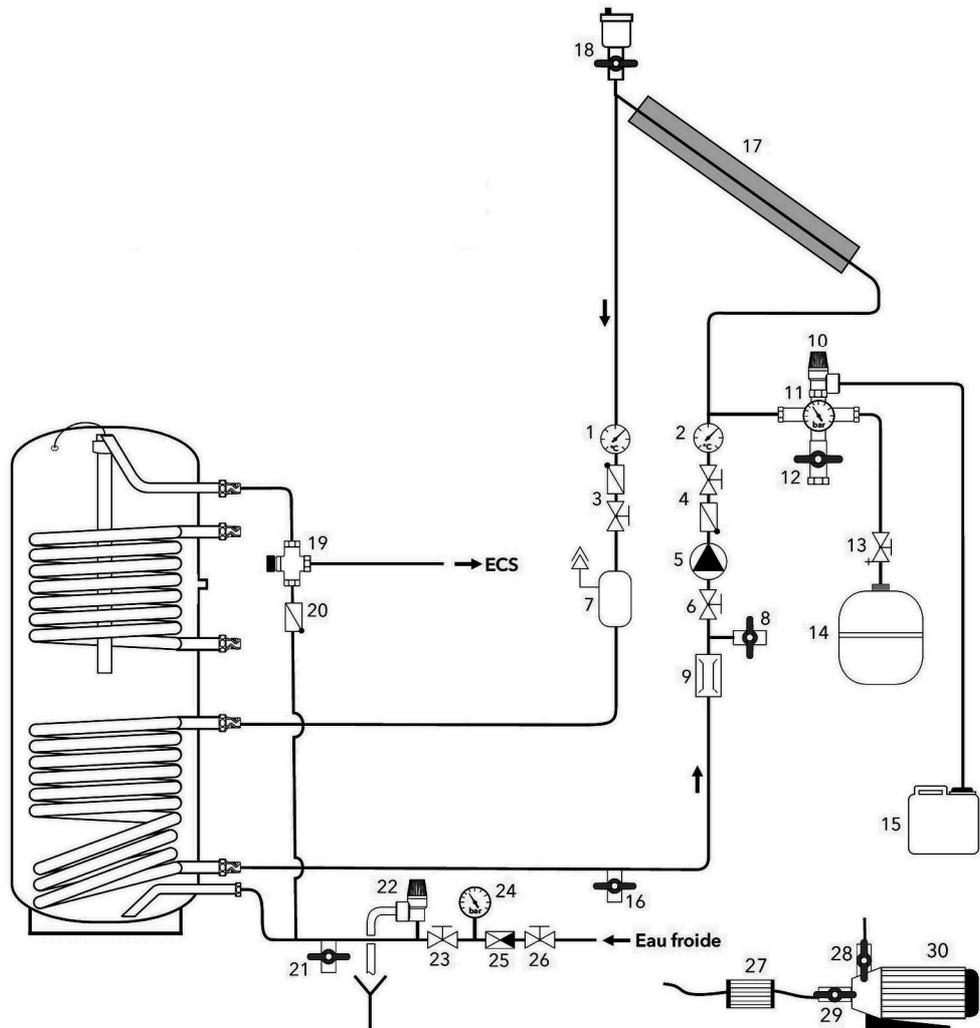
1. Introduction

L'énergie est actuellement au cœur de bien des débats. S'il est vrai que les enjeux économiques ont toujours été l'argument dominant, depuis la prise de conscience de l'impact de l'homme sur le climat, l'environnement est également un argument majeur. Si la question énergétique passionne tant, c'est que l'énergie est indispensable au développement économique et au maintien du niveau de vie élevé des pays développés. Notre mode de vie nous rend effectivement excessivement dépendants de l'énergie pour le chauffage et la production d'eau chaude domestique, pour le transport, pour la préparation des repas, pour les divertissements et pour la production et le transport de tous les biens que nous consommons. Elle est tellement simple d'accès qu'on ne réalise généralement son importance que lorsqu'on en est privé ou lorsque l'élévation de son coût nous contraint à l'économiser.

1.1 L'installation solaire thermique

La figure 1 présente le schéma hydraulique d'une installation solaire domestique classique comprenant les différents éléments nécessaires pour produire de l'eau chaude sanitaire. Il y a cinq éléments principaux dans une installation : les capteurs solaires, le fluide caloporteur, le système de stockage de chaleur, la régulation et le chauffage d'appoint.

Les capteurs solaires ont fait l'objet de nombreuses études depuis les années 80. Leurs performances sont aujourd'hui très élevées et la marge de progrès à réaliser est faible. Les propriétés du fluide caloporteur (de l'eau contenant de l'antigel) sont très bien maîtrisées et aucun progrès n'est à attendre dans ce domaine. Les performances du chauffage d'appoint vont influencer les performances globales mais pas celles du système solaire. Par contre, le système de stockage et la régulation sont des éléments clés qui ont une grande influence sur le comportement du système et dont les développements récents et futurs peuvent améliorer les performances de l'installation solaire thermique. Cet article est donc destiné à introduire ces deux éléments afin de mieux les comprendre et d'apporter un regard critique aux innovations récentes.



- | | | |
|--|--|--|
| 1. thermomètre départ | 11. manomètre | 20. clapet antiretour |
| 2. thermomètre retour | 12. vanne de remplissage et de vidange du groupe de sécurité | 21. vanne de remplissage du circuit d'eau potable |
| 3. vanne avec clapet anti-convection, départ | 13. vanne de maintenance | 22. soupape de sécurité |
| 4. vanne avec clapet anti-convection, retour | 14. vase d'expansion | 23. vanne d'arrêt |
| 5. pompe circuit solaire | 15. bidon de trop-plein | 24. manomètre |
| 6. vanne d'arrêt | 16. vanne de remplissage et de vidange du circuit solaire | 25. clapet antiretour |
| 7. séparateur d'air | 17. capteur | 26. vanne d'arrêt |
| 8. vanne de remplissage | 18. purgeur d'air | 27. filtre à impuretés |
| 9. débitmètre | 19. mitigeur d'ECS | 28. et 29. vannes d'arrêt de la pompe de remplissage |
| 10. soupape de sécurité | | 30. pompe de remplissage |

Figure 1 : Schéma d'un circuit solaire classique (chauffe-eau solaire) [11]

2. Le stockage de chaleur

2.1 Intérêt du stockage

Les installations solaires domestiques sont toujours accompagnées d'un système de stockage de chaleur. La raison en est simple : faire coïncider la disponibilité de l'énergie solaire avec les besoins en chaleur. Le problème est que l'énergie solaire n'est fournie que durant la journée et que la demande de chaleur est surtout située en début de matinée et en soirée. Sans stockage de chaleur, on ne profiterait donc que très peu de l'énergie solaire.

Son principe est simple : accumuler la chaleur en journée dans un système de stockage et la récupérer quand c'est nécessaire. Son rôle est donc de différer la disponibilité de l'énergie solaire.

On en distingue deux catégories : le stockage journalier et le stockage saisonnier. Le premier est celui qui vient d'être expliqué. Il permet de disposer de l'énergie accumulée à court terme. Cela peut être dans les minutes, dans les heures voire dans les quelques jours qui suivent le stockage. Il est indispensable pour profiter de l'énergie solaire au quotidien. Le stockage saisonnier est le stockage à long terme qui va permettre de différer l'apport en énergie solaire de plusieurs mois (fig. 2). Il permet donc d'accumuler l'énergie solaire non exploitée en été pour en bénéficier durant l'hiver.

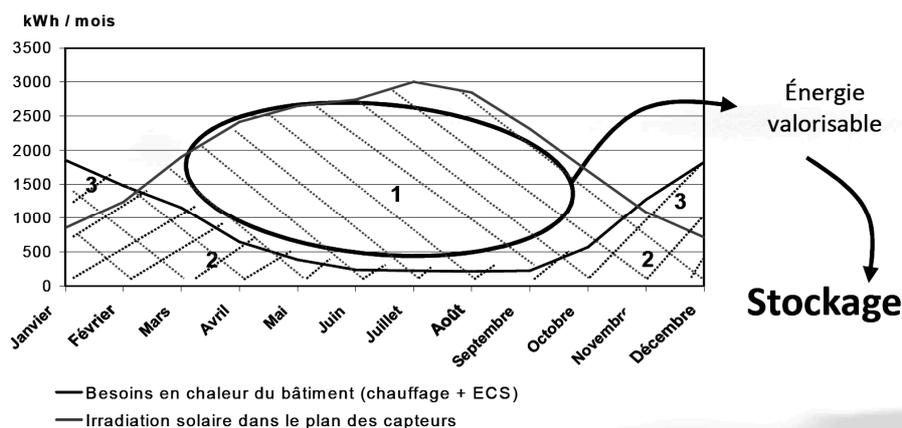


Figure 2 : Évolution de l'apport solaire et de la demande de chaleur dans le secteur résidentiel

2.2 La chaleur sensible

La méthode la plus simple et la moins coûteuse pour stocker de la chaleur est d'utiliser la chaleur sensible d'un matériau (de l'eau dans la majorité des cas, même s'il est possible d'utiliser des matériaux solides par exemple).

$$Q_s = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

avec

- Q_s , la quantité de chaleur sensible échangée [J],
- m , la masse du corps subissant l'échange de chaleur [kg],
- c_p , la chaleur massique à pression constante du matériau également appelée chaleur spécifique (sous 1 atm à 15°C, $c_{p,eau}=4186 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
- ΔT , la variation de température induite par l'échange de chaleur [K].

2.3 La chaleur latente

Pour gagner en densité énergétique, de nombreuses études se sont tournées vers les matériaux à changement de phase (MCP¹) qui, en plus de la chaleur sensible, permettent de stocker l'énergie sous forme de chaleur latente.

$$Q_l = m \cdot L$$

avec

- Q_l , la quantité de chaleur latente échangée [J],
- m , la masse du corps subissant l'échange de chaleur [kg],
- L , la chaleur latente massique (ou spécifique) qui équivaut à l'échange d'énergie nécessaire pour qu'un corps de 1 kg de matériau change entièrement d'état physique (sous 1 atm à 100°C, $L_{vap,eau} = 2256,4 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$) [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$].

Ces matériaux sont sélectionnés pour que leur changement de phase soit de type fusion-solidification, ce qui permet d'éviter les difficultés de mise en œuvre due à une trop grande variation de volume (cas de la vaporisation).

La figure 3 présente les différents matériaux étudiés pour les systèmes solaires. Les paraffines et les sels hydratés sont présentés en détail ci-dessous.

¹ L'abréviation anglaise « PCM » (Phase Change Material) est plus souvent utilisée.

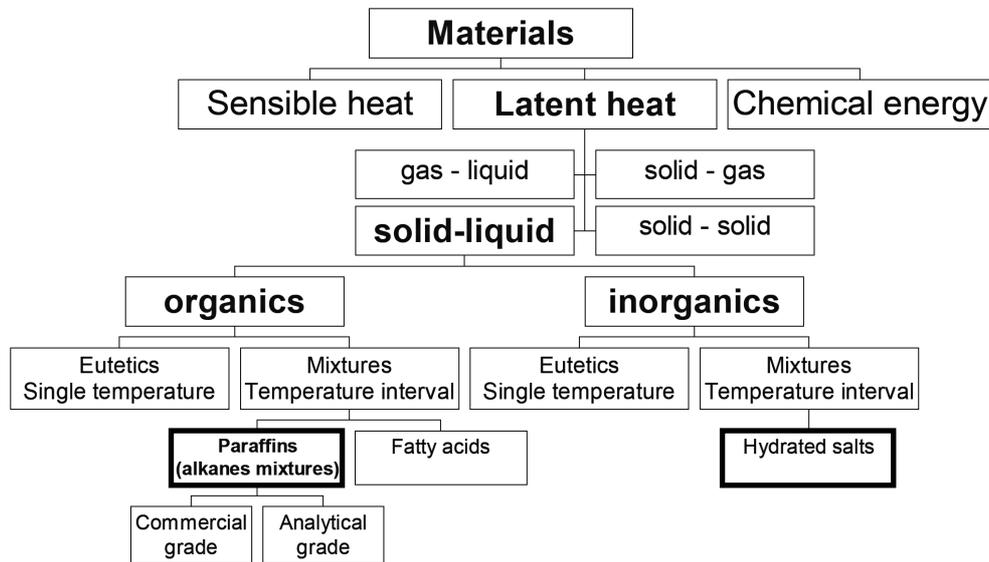


Figure 3 : Classification des PCM selon le modèle de A. Abhat [1]

Les paraffines

Ce sont des alcanes de formule C_nH_{2n+2} issus de l'industrie pétrolière. Leur point de fusion est fonction de la longueur de leur chaîne hydrocarbonée. Dans le domaine du stockage solaire, ce sont les paraffines de C_{18} à C_{50} qui sont intéressantes, leur température de fusion étant comprise entre 30 et 90°C.

Les paraffines sont très stables, ne présentent pas de séparation des phases, ne sont pas toxiques et sont plutôt inertes, ce qui en facilite la mise en œuvre. Elles ne souffrent pas de problèmes de surfusion (état de la matière dit métastable, car la matière se maintient à l'état liquide alors que sa température est inférieure à sa température de solidification), il n'est donc pas nécessaire de leur adjoindre un agent de nucléation. En ce qui concerne les capacités de stockage, on notera la chaleur latente relativement élevée pour un matériau organique tournant aux alentours de 200–250 kJ/kg. Malheureusement, la masse volumique ne joue pas en faveur de la densité d'énergie puisqu'elle est plus faible que celle de l'eau (entre 750 et 930 kg/m³). La chaleur latente de fusion de l'eau est d'ailleurs plus élevée que pour les paraffines ($L_{\text{eau}} = 333,6$ kJ/kg), mais l'avantage des paraffines est de disposer de toute une gamme de températures de fusion contrairement à l'eau.

Leur inconvénient majeur est leur faible conductivité thermique, principalement en phase solide. Elle est en effet d'environ $0,21 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ en phase solide, ce qui est égal à la conductivité de la glace à 0°C ($\lambda_{\text{glace},0^\circ\text{C}} = 0,214 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, [6]), mais largement inférieur à celle de l'eau liquide ($\lambda_{\text{eau},20^\circ\text{C}} = 0,598 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, [6]). Il est donc difficile de récupérer une grande quantité de chaleur lorsque cela est nécessaire, mais également d'en fournir au stockage. Cela peut réduire fortement les performances d'une installation solaire dont la source de chaleur est très variable.

Un autre inconvénient qui se révèle important lorsque la plage de température d'opération est importante (cas du stockage solaire) est la chaleur massique qui est plus faible que celle de l'eau. Elle est effectivement d'environ $2500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ en moyenne ce qui est nettement plus faible que celle de l'eau ($c_{p,\text{eau},15^\circ\text{C}} = 4186 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). On peut également remarquer que le gain énergétique offert par la chaleur latente diminue lorsque la plage de température s'étend comme on peut le constater sur la figure 4.

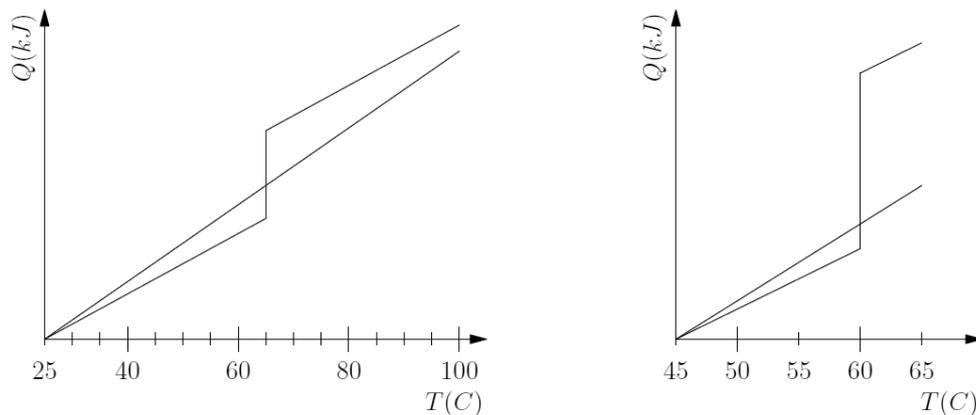


Figure 4 : Comparaison de la densité énergétique des PCM pour différentes plages de température [8]

Amélioration de la capacité d'échange thermique

Afin de remédier à la faible conductivité thermique de la paraffine, différentes solutions existent. La première est l'utilisation d'un échangeur à ailettes très long formant un serpentin serré sur plusieurs couches afin de réduire la distance que les flux de chaleur devront parcourir dans la paraffine. Cette technique est la plus efficace, mais aussi la plus coûteuse.

La seconde solution est la macro-encapsulation qui utilise des nodules sphériques (d'autres formes existent également) de quelques centimètres de diamètre remplis de paraffine. Ceux-ci sont plongés dans un ballon de stockage rempli d'eau. Le but de cette technique est d'augmenter le ratio surface d'échange/volume sans nécessiter d'échangeur trop important (l'échangeur étant l'élément le plus coûteux) ainsi que de réduire la distance que le flux de chaleur doit parcourir au travers du PCM. Pour améliorer l'échange thermique, il faut tout de même ajouter une structure en treillis tridimensionnelle afin d'assurer un espace suffisant entre chaque nodule et ainsi permettre au fluide caloporteur (l'eau) de circuler efficacement (fig. 5). Les systèmes de stockage s'appuyant sur cette technique sont constitués à 60% en volume de nodules et à 40% d'eau. Leur avantage en termes de capacité de stockage est donc plus limité par rapport aux systèmes à contact direct.



Figure 5 : Structure permettant un positionnement efficace des nodules dans le ballon [4]

Une troisième solution relativement similaire est la micro-encapsulation qui consiste à mettre le PCM dans des sphères de 2 à 20 μ m de diamètre en polymère offrant un ratio surface d'échange/volume meilleur que la macro-encapsulation et une distance de transfert de chaleur dans le PCM extrêmement faible. Toutes ces sphères forment une poudre dont l'application principale est l'intégration dans des matériaux de construction. Des études sont également en cours pour mélanger directement ces microcapsules avec le fluide caloporteur (principalement de l'eau) et ainsi créer un liquide facilement manipulable que l'on appelle « PCM slurry » en anglais. Ce matériau peut être considéré comme un matériau homogène et être utilisé dans des cuves similaires à celles de stockage avec de l'eau. La mise en œuvre est simple, mais ce type de stockage est encore au stade d'étude [9].

Une dernière solution intéressante est de combiner le PCM peu conducteur avec un matériau qui, lui, a une conductivité thermique élevée. C'est ainsi que des produits basés sur le graphite ont été développés soit sous la forme d'une matrice composite soit sous la forme d'un mélange. Si la première méthode permet de multiplier par cent la conductivité thermique de la paraffine (à peu près $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ contre $0,2$ à $0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), son coût élevé ne lui permet pas d'être intéressante pour les applications domestiques. La seconde méthode, convenant à tous les PCM, est le mélange graphite PCM. Plus simple et moins coûteux qu'une matrice, il est réalisé à l'aide de poudre, de granules ou de copeaux de graphite. Cette méthode permet de multiplier par 10 ou par 20 la conductivité thermique. Malheureusement, aucun produit utilisant cette technique n'est commercialisé.

Les sels hydratés

Ils sont simplement constitués d'un mélange d'eau et de sel formant une structure cristalline lors de la solidification que l'on appelle plus rigoureusement cristallisation. Ce processus s'explique par une modification de la solubilité du sel en solution lors de l'abaissement de la température.

Il existe une grande diversité de sels hydratés disponibles sur le marché offrant une gamme étendue de températures de fusion. Leur chaleur latente massique est comprise entre 70 et 370 kJ/kg . Combinée à leur masse volumique importante (de 1500 à 2000 kg/m^3), la chaleur latente massique de certains sels hydratés offre une densité de stockage nettement supérieure aux paraffines.

Une autre de leurs grandes qualités est leur conductivité thermique qui se situe entre $0,47$ et $1,225 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. De plus, les valeurs les plus élevées sont atteintes pour la phase solide de certains hydrates. Cela permet de réduire les coûts de mise en œuvre.

Autres propriétés importantes, la variation de volume associée au changement de phase est faible et ils sont non inflammables. Enfin, ils sont moins chers que les paraffines et disponibles en quantité sur le marché.

Les sels hydratés présentent plusieurs difficultés de mise en œuvre dont leur pouvoir corrosif important. Ils souffrent également d'une surfusion importante. Il est donc nécessaire d'utiliser des agents de nucléation pour accélérer la formation des premiers cristaux [5].

Un dernier problème majeur des sels hydratés est la ségrégation des phases qui entraîne une dégradation des performances au fil des cycles. Lors de la fusion, la majorité du sel hydraté fond de manière congruente mais avec une part qui fond de manière non congruente et mène à la formation de sels moins hydratés, voire déshydratés. Le mélange se sépare alors en une phase liquide et une phase solide qui, étant plus dense, précipite de manière irréversible. Le mélange n'est donc plus homogène et lors de la solidification, la fraction déjà solide ne peut plus emmagasiner de chaleur latente et la capacité de stockage diminue. Ce phénomène se poursuit cycle après cycle, les performances se dégradant progressivement. Une étude a mis en avant une diminution de 73% de la chaleur de fusion du $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ après 1000 cycles [1].

Malgré des qualités indéniables, les sels hydratés ne font actuellement pas l'objet d'application commerciale. Les difficultés de mise en œuvre sont en effet telles que le coût devient trop important par rapport au gain réel [10].

2.4 L'énergie thermochimique

Le stockage de chaleur par énergie thermochimique est un stockage qualifié d'indirect. Contrairement au stockage par chaleur sensible ou latente, l'énergie est stockée grâce à un processus physico-chimique qui consomme de l'énergie lors de la phase de chargement et en libère lors de la phase de déchargement. Elle n'est donc pas directement accessible, ce qui a comme avantage de ne pas engendrer de pertes importantes. Cela la rend donc particulièrement intéressante pour le stockage saisonnier. On distingue deux types de stockage thermochimique : le stockage thermochimique sans sorption, et celui avec sorption. La figure 6 présente les différents types ainsi que les principaux matériaux employés.

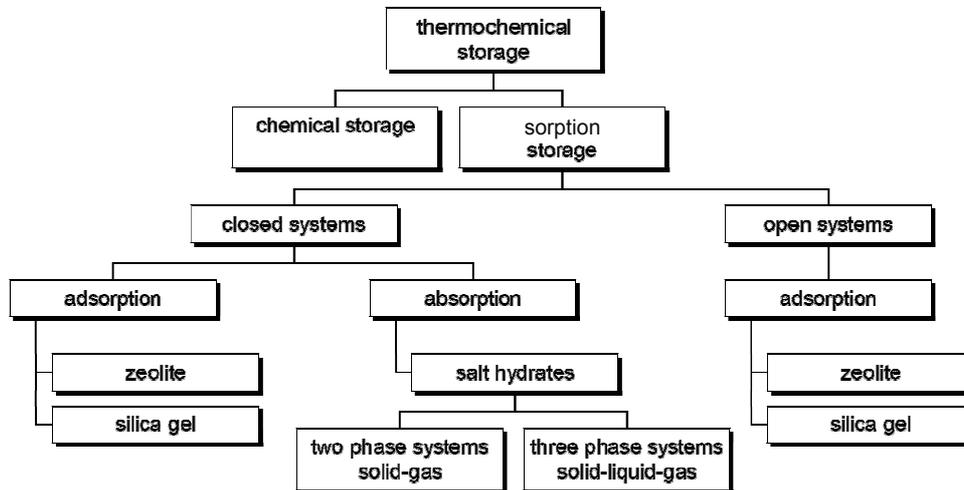


Figure 6 : Classification des différents types de stockage par énergie thermo-chimique [3]

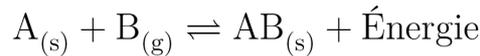
Le stockage thermo-chimique sans sorption

Le premier fait partie de la catégorie plus générale que l'on nomme stockage chimique qui permet de stocker de l'énergie thermique (réaction thermo-chimique), de l'énergie électrique (réaction électrochimique à l'instar des batteries) ou de l'énergie électromagnétique (réaction photochimique comme la photosynthèse ou la vision sur la rétine). Il repose sur des réactions chimiques de décomposition. C'est le système de stockage qui offre théoriquement la meilleure densité d'énergie (1,4 à 37,9 GJ/m³ [2]), mais les difficultés à résoudre étant encore importantes (température de réaction, stabilité, résistance du ballon de stockage, toxicité, etc.) et la commercialisation de systèmes basés sur ce stockage n'étant pas envisagée avant de nombreuses années, il ne sera pas abordé en détail contrairement au stockage par sorption.

Le stockage thermo-chimique avec sorption

La sorption est un phénomène de fixation ou de capture d'un gaz, d'un liquide ou d'une substance en solution, le sorbat, sur un solide (parfois un liquide) que l'on appelle sorbant. C'est un phénomène exothermique alors que le processus inverse, appelé désorption, est endothermique. La notion qui différencie ce type de stockage du précédent est que dans celui-ci, c'est un phénomène uniquement de surface du sorbant alors que dans le précédent, on a bien une réaction des constituants dans leur entièreté (suivant

l'avancement de la réaction). L'équation suivante résume le principe de sorption (AB est le couple de sorption, A est le sorbant et B est le sorbat).



Le sorbat est généralement un gaz, ce qui permet d'avoir une bonne densité de stockage tout en évitant de devoir atteindre des températures trop élevées pour charger le système (désorption). La chaleur de sorption est la somme de l'énergie de liaison et de la chaleur latente de vaporisation.

Dans ce type de stockage, il faut distinguer l'adsorption de l'absorption. L'adsorption est « un processus par lequel des molécules de gaz, de substances en solution ou d'un liquide, adhèrent en une couche extrêmement fine à la surface d'un solide avec lequel elles sont en contact », [6]. Le solide, qui est appelé dans ce cas l'adsorbant, se présente généralement sous la forme d'un matériau poreux ayant une très grande surface spécifique. La substance adsorbée porte le nom d'adsorbat. Les liaisons qui se créent sont à l'origine du caractère exothermique de l'adsorption. L'absorption est un processus par lequel un liquide ou un gaz, appelé absorbant, s'introduit dans un liquide ou un solide que l'on appelle absorbant. Ce processus diffère de celui d'adsorption par le fait que l'absorbant est retenu par tout le volume de l'absorbant alors que l'adsorbat n'est retenu que par la surface de l'adsorbant.

Les matériaux de stockage par sorption

Le sorbat qui est presque toujours utilisé est de l'eau. Elle a beaucoup d'avantages dont celui d'avoir une chaleur latente spécifique de vaporisation élevée de 2256,4 kJ/kg.

Pour ce type de stockage, deux matériaux se distinguent principalement : la zéolite et le silicagel qui sont deux très bons adsorbants. Ils font l'objet de nombreuses recherches qui devraient déboucher à court terme sur la commercialisation de systèmes qui pourraient enfin permettre au stockage saisonnier d'avoir sa place dans les installations domestiques.

Deux systèmes différents basés sur la zéolite sont en cours de développement. Le plus avancé est celui développé par l'ITW de Stuttgart (système ouvert) qui est actuellement en phase de test chez des particuliers [3]. Il devrait être commercialisé aux alentours de 2015. D'après l'ITW, 20 m³ de zéolite suffiront à couvrir les besoins d'une famille entière pour tout l'hiver.

Le second système est développé notamment par l'Université de Liège (système fermé). Le développement est moins avancé à cause des difficultés de mise en œuvre plus importantes inhérentes aux systèmes fermés. Néanmoins, le Professeur Ph. André du département des sciences et gestion de l'environnement, annonce que 10 m³ suffiront.

D'autres adsorbants sont également prometteurs à plus long terme : les aluminophosphates et les SWS (Selective Water Sorbents). Ces derniers sont constitués de silicagel et de sels. Ils profitent donc à la fois du processus d'adsorption et du processus d'absorption quintuplant ainsi la capacité de stockage, et ce, à une température plus faible.

2.5 Comparaison des différentes énergies de stockage

La figure 7 permet de comparer les différentes techniques de stockage en termes de densité énergétique.

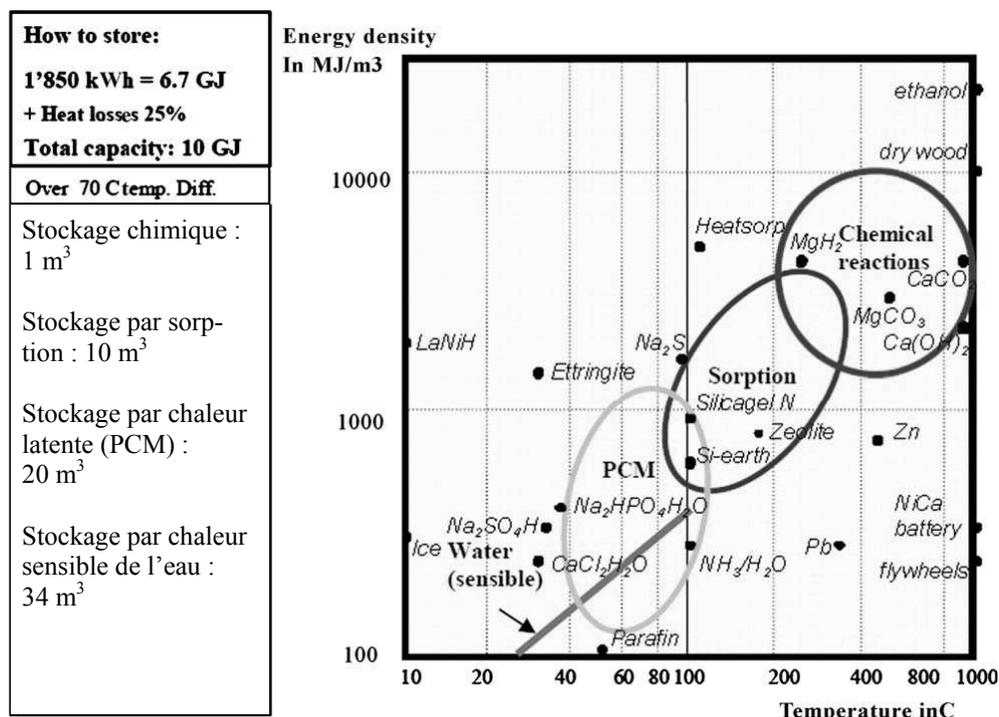


Figure 7 : Comparaison des densités d'énergie des différents types de stockage [7]

Les systèmes thermochimiques présentent un réel gain de densité, mais par contre leur température de fonctionnement est bien plus élevée, ce qui ne va pas sans poser des problèmes pour les applications solaires. Ils ne peuvent effectivement fonctionner que lors des apports solaires importants en été. Un système à court terme fonctionnant par chaleur sensible ou latente est dès lors nécessaire. Les systèmes utilisant la chaleur latente de la paraffine semblent théoriquement intéressants. Néanmoins, l'étude de différents produits disponibles sur le marché a montré que les caractéristiques annoncées par les fabricants sont généralement surévaluées. PowerTank GmbH (Sonnerberg, Allemagne) ou Kaplan Energy (Pierre-Bénite, France) annoncent effectivement une capacité de stockage multipliée respectivement par 4 et par 13 par rapport à un système utilisant la chaleur sensible de l'eau. Or, il est facilement démontrable que ces valeurs sont surévaluées [8]. Le système de PowerTank a effectivement une densité de stockage deux fois moindre que l'eau dans les conditions d'utilisation d'un système solaire domestique. L'intérêt des produits utilisant de la paraffine n'est donc pas évident. On peut néanmoins trouver des produits très intéressants utilisant une faible quantité de paraffine. Les ballons Latento de la société IVT font de l'isolation une priorité. Ils utilisent la faible conductivité thermique de la paraffine comme isolant et sa faible chaleur massique pour accélérer la montée en température du système jusqu'à 60°C (température de fusion). Le ballon en plastique bénéficie en plus d'une forme parallélépipédique lui permettant un encombrement moindre. Au final, il offre une densité de stockage 20% supérieure aux systèmes utilisant exclusivement de l'eau et les résultats mesurés sur une installation test ont montré un rendement (énergie chargée/énergie récupérée) de 93,2% [8]. Ce résultat excellent est néanmoins à relativiser, la période de test étant relativement courte et favorable (du 19/03/2011 au 31/05/2011).

3. La régulation solaire thermique

3.1 Introduction

En Belgique, ne bénéficiant pas d'un apport solaire abondant en comparaison aux régions situées entre les tropiques, les installations solaires sont à circulation forcée² (que l'on appelle parfois systèmes actifs). Cela signifie

² La figure 1, page 3, présente un schéma classique de ce type d'installation. Les numéros entre parenthèses dans la suite de ce paragraphe y font référence.

qu'un circulateur (5) est utilisé pour mettre en mouvement le fluide caloporteur du circuit solaire afin de récupérer la chaleur des capteurs (17) pour l'amener dans le système de stockage ou à l'endroit où on désire l'utiliser. Pour commander celui-ci, on utilise une régulation qui va l'actionner suivant les différents paramètres du circuit solaire qu'elle aura acquis. Elle peut être très simple, dédiée à un circuit minimal, ou plus sophistiquée pour gérer des circuits solaires complexes en tenant compte d'un nombre élevé de paramètres. Elle peut, par exemple, commander des chauffages d'appoint, plusieurs circuits de chauffage ou une boucle de circulation d'ECS.

3.2 Principe de fonctionnement de base

Pour que l'installation fonctionne, il faut que le circulateur s'enclenche lorsque le fluide caloporteur dans les capteurs solaires est suffisamment chaud afin d'emmagasiner la chaleur dans le ballon et qu'il s'arrête lorsqu'il est trop froid afin de ne pas dissiper dans les capteurs la chaleur stockée précédemment. Le problème revient donc à déterminer si l'activation du circulateur va permettre d'augmenter le stock de chaleur ou le diminuer. Quel que soit le principe de stockage, le fluide caloporteur transporte l'énergie solaire des capteurs grâce à sa chaleur sensible. Afin de déterminer si les conditions de fonctionnement sont rencontrées, un certain nombre de sondes de température sont donc utilisées : une au point le plus chaud des capteurs (au sommet) et une autre au point le plus froid du stockage (dans le bas du ballon). Ainsi, tant que la température dans le bas du ballon est inférieure à celle au sommet des capteurs, le circulateur devra fonctionner. Dans les installations plus importantes, la sonde des capteurs servira uniquement à déterminer s'il est nécessaire d'enclencher le circulateur. Une troisième sonde est alors utilisée à la sortie de l'échangeur de stockage afin de déterminer si la chaleur concédée par le fluide caloporteur au système de stockage est suffisante par rapport à la consommation électrique du circulateur.

3.3 La tendance actuelle

Depuis plusieurs années, les régulations ont beaucoup évolué. Elles tendent à intégrer de nombreuses caractéristiques ou fonctions annexes, leur permettant d'être configurables pour s'adapter à des circuits divers ou pour chauffer une piscine, de stocker des données pour analyser les performances ou les défauts. Elles tendent également à devenir plus conviviales. Les utilisateurs souhaitent effectivement pouvoir suivre leur production énergétique afin de mesurer la rentabilité de leur investissement. La plupart des régula-

tions intègrent aujourd'hui une interface graphique conviviale, permettant de consulter tous les paramètres de l'installation rapidement.

3.4 Les caractéristiques influençant les performances

Un certain nombre de caractéristiques sont à évaluer pour déterminer si une régulation est efficace et fiable. Les manquements des régulations disponibles sur le marché ont mis en évidence l'intérêt de développer une nouvelle régulation pour la société Enersol. Celle-ci a pour but de rencontrer les demandes de la société sans compromis.

L'utilisation d'une régulation pouvant commander le circulateur à vitesse variable (autrement dit à débit variable) permet d'augmenter les performances. Lorsque l'ensoleillement est important, le circulateur fonctionne à plein régime, c'est-à-dire en high-flow, profitant ainsi d'une puissance maximale. Lorsque l'ensoleillement est faible, le circulateur fonctionne à bas régime, c'est-à-dire en low-flow, profitant ainsi d'un ΔT_{stock} entre l'entrée et la sortie de l'échangeur de stockage plus intéressant, ce qui permet au circulateur de fonctionner plus longtemps et donc de récupérer plus d'énergie. Il est bien entendu possible de faire fonctionner le circulateur à des vitesses intermédiaires. Le tout est de trouver un compromis permettant de maximiser le rendement des capteurs (ΔT_{capt} entre l'entrée et la sortie du champ de capteurs faible afin de limiter les pertes) en augmentant le débit et celui de l'échangeur (ΔT_{stock} élevé pour assurer le transfert du maximum d'énergie en réduisant le débit). Il peut être utile que la régulation permette de commander plusieurs circulateurs à vitesse variable afin d'améliorer les performances du chauffage d'appoint, d'un circuit piscine, etc. Les régulations disponibles sur le marché offrent souvent un nombre limité de ces sorties.

Pour s'adapter aux particularités d'une installation, une régulation possède un certain nombre de schémas hydrauliques préprogrammés. Il n'est pas toujours aisé de trouver celui qui convient parfaitement pour des installations non classiques. Il n'est alors pas toujours possible d'utiliser toutes les fonctions que la régulation possède ni d'utiliser toutes les sorties à vitesse variable. Certains schémas offrent des avantages importants pour les grosses installations (schéma des régulations Sonnendach). Ils ne sont généralement pas disponibles sur les régulations du marché.

Les sondes de température sont des éléments essentiels pour le fonctionnement de l'installation. L'emploi de sondes résistant à des températures élevées (180-200°C en stagnation) est indispensable. Il faut également que leur précision soit assurée jusqu'à 95°C au moins. Les sondes de type PT1000 (composées de platine et ayant une résistance de 1000 Ω à 0°C) sont particulièrement adaptées. Certaines régulations utilisent malheureusement des sondes KTY (composées de silicium) qui ne répondent pas à ces exigences.

En cas de panne de la régulation, il faut pouvoir commander l'installation manuellement afin que le client puisse avoir de l'eau chaude en attendant un réparateur.

Celui-ci doit également pouvoir programmer des plages horaires pour l'utilisation de l'appoint (utilisation préférentielle du courant de nuit notamment).

Elle doit permettre la récupération de données facilement (USB, carte SD, GPRS, Bluetooth, Wi-Fi, etc.) afin de pouvoir analyser les performances de l'installation et détecter les éventuels problèmes depuis un ordinateur.

Il n'est pas possible de trouver une régulation rencontrant toutes ces caractéristiques et il est généralement nécessaire de faire des compromis.

4. Conclusion

Le potentiel de développement des installations solaires thermiques est évident : les nombreuses études en cours pour développer des systèmes de stockage plus performants le prouvent. Si les systèmes utilisant la chaleur latente sont décevants, les perspectives de l'énergie thermo-chimique laissent présager une évolution majeure d'ici 4 à 5 ans avec l'apparition sur le marché des premiers systèmes basés sur la sorption. Cela devrait permettre de convaincre les particuliers de l'intérêt du solaire thermique qui est aujourd'hui en retrait face au photovoltaïque. Le développement des régulations devrait également offrir toujours plus de possibilités pour s'adapter à tous types d'installations. Celles-ci devraient également pouvoir gérer des systèmes d'appoint plus nombreux tout en offrant une meilleure interaction avec l'utilisateur.

5. Sources

- [1] ABHAT A., *Low temperature latent heat thermal energy storage - Heat storage materials*
Solar Energy, vol. 30, n°4, 1983, pp. 313–332.
- [2] BALES Chris *et al.*, *Task 32 — Advanced storage concepts for solar and low energy buildings, chap. B2 — Thermal Properties of Materials for Thermo-chemical Storage of Solar Heat*
IEA Solar Heating and Cooling Programme SHC, mai 2005.
- [3] BALES Chris, *Task 32 — Advanced storage concepts for solar and low energy buildings, chap. B7 — Final Report of Subtask B “Chemical and Sorption Storage”*
IEA-SHC Solar Heating and Cooling Programme, février 2008.
- [4] BOGAERT A.-S., *État de l’art en matière de stockage de l’énergie thermique — Étude de cas : stockage intersaisonnier d’énergie solaire*
Liège, Université de Liège, faculté des Sciences, département des Sciences et Gestion de l’Environnement, mémoire inédit (présenté en vue de l’obtention du grade de Master en Sciences et Gestion de l’Environnement), septembre 2007.
- [5] LANE G. A., *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials*
vol. 2: Technology, CRC Press, 1986.
- [6] LIDE D., *CRC handbook of chemistry and physics*
CRC Handbook of Chemistry & Physics, CRC Press, 90^e édition, 2009.
- [7] N’TSOUKPOE K. Edem *et al.*, *A review on long-term sorption solar energy storage*
Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, n°9, décembre 2009, pp. 2385 – 2396.
- [8] PETITJEAN Cédric, *Régulation solaire thermique et stockage de chaleur*
Liège, Institut Gramme, unité Energie, mémoire inédit, 2011, présenté en vue de l’obtention du grade d’Ingénieur industriel, juin 2011.
- [9] STREICHER W., CABEZA L. & HEINZ A., *Task 32 — Advanced storage concepts for solar and low energy buildings, chap. C2 — Inventory of Phase Change Materials (PCM)*
IEA Solar Heating and Cooling Programme SHC, février 2005.

- [10] STREICHER W. *et al.*, *Task 32 — Advanced storage concepts for solar and low energy buildings*, chap. C7 — *Phase Change Materials* IEA-SHC Solar Heating and Cooling Programme, mars 2008.
- [11] WAGNER&CO SOLARTECHNIK GMBH (page consultée le 15 mars 2011), *Système technique solaire pour eau chaude sanitaire (ECS) et appoint chauffage*
Adresse URL :
<http://www.wagner-solar.com/wagnerFR/SW/04/index.php?navid=16>.