

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN

Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2007

Solaire actif – Chaleur et Stockage de chaleur

Jean-Christophe Hadorn

jchadorn@baseconsultants.com



Capteurs solaires en couleur

Le défi de réaliser sur une surface importante une couche transmettant plus de 95% du rayonnement solaire au capteur, mais offrant un rendu de couleur (ici bleue) homogène, a été relevé après 4 ans de recherche par l'équipe du Laboratoire d'énergie solaire (LESO) à l'EPF Lausanne. Une ère nouvelle dans l'intégration architecturale d'éléments énergétiques peut s'ouvrir (*photo : LESO EPFL*).

Centres de gravité du programme et buts fixés

Le marché solaire thermique Suisse est en progression très encourageante depuis 2004 (figure 1). En 2006, il y a eu 50'355 m² de capteurs plans vendus en Suisse et 82'440 m² exportés.

35% des surfaces installées concernaient des locatifs (492 cas) pour de l'eau chaude sanitaire, 25% des surfaces installées en Suisse l'ont été pour des chauffe-eau solaires de villas (2'385 cas), et 19% sont des installations combinées pour villas (1'354 cas). Deux tiers des installations faites ont moins de 10 m² de capteurs et 22% entre 11 et 20 m². Rares ont été les installations de plus de 100 m² (28 cas tout de même).

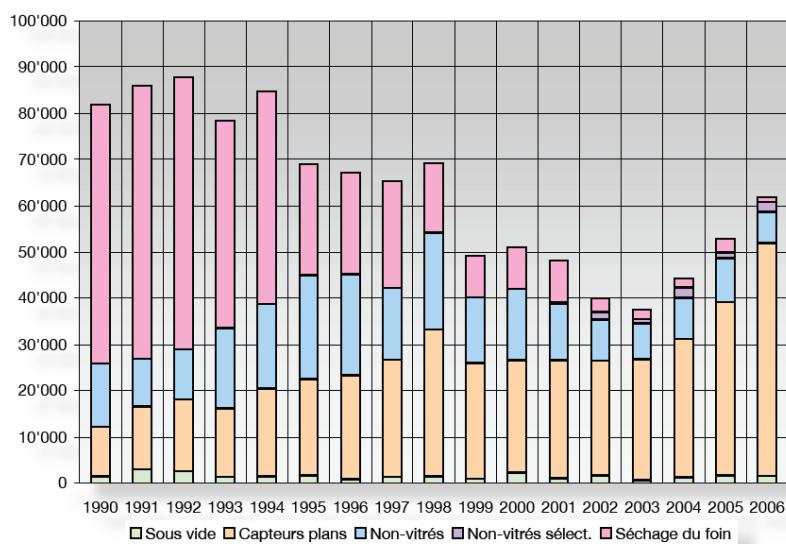


Figure 1 : vente de capteurs solaires thermiques en Suisse de 1990 à 2006, en nombre de m² vendus. (Source : Swissolar, juillet 2007).

Pour l'année 2007, nous avons orienté les travaux de R&D – dans le respect du programme pour les années 2004 à 2007 présenté à la CORE [17] – sur les centres de gravité suivants :

- les tests de capteurs en relation avec les fabricants ;
- la mise en fonction d'un simulateur solaire intérieur au SPF (*Institut für Solartechnik, Hochschule für Technik Rapperswil*) ;
- la recherche sur les systèmes et matériaux pour le stockage de la chaleur solaire pour l'habitat ;
- la réalisation d'un 1^{er} prototype de verre solaire de couleur sur une surface de capteur réel ;
- la sortie de *Polysun 4.0* ;
- les résultats d'optimisation du projet SERSO de dégivrage solaire d'un pont.

Travaux effectués et résultats acquis pour 2007

COMPOSANTS DE LA TECHNIQUE SOLAIRE

Les tests de qualité et de performances des composants solaires au SPF sont un élément important du soutien au développement de bons produits solaires. En 2007, le SPF a réalisé les travaux suivants [1, 2, 3, 4] :

- a) **Mesure des caractéristiques et test de qualité des capteurs solaires** : les installations du SPF ont été utilisées quasiment à toute leur capacité durant l'année.
 1. Le nombre d'exams *Solar Keymark*, ainsi que des contrôles de qualité ont augmenté.
 2. L'accréditation ISO17025 du SPF comme « organisme de contrôle pour les capteurs solaires thermiques et leurs composants » a été de nouveau confirmée.

3. Le simulateur solaire a pu être mis en service et a été utilisé dans les tests de qualité des capteurs, de sorte que les mesures faites avec le simulateur pourront être accréditées dès 2008.
4. La grêle s'avérant un problème récurrent pour les capteurs à tube sous vide, le SPF a mis au point une nouvelle machine de tests de « grêle » qui donne des effets plus réalistes que ce qui existait auparavant.
5. Le SPF mène une réflexion et des tests sur des « *concept collectors* » pour générer de nouvelles idées de capteurs.
6. Les installations de tests de systèmes de chauffe-eau solaires (4 en parallèle) sur le toit de l'école ont été rénovées totalement et remises en route.
7. Douze systèmes thermosiphons ont pu être testés, dont 8 selon les standards européens. Un seul a été proposé en test au SPF par un fabricant suisse.
8. Un dispositif mobile de tests de systèmes a été mis au point pour un client, élargissant la liste des prestations possibles du SPF.
9. Le banc test de combi-systèmes plus lourd a été utilisé pour une installation combinée solaire et mazout et une installation combinée solaire et pellets. La mise au point du banc pour évaluer les performances et les problèmes de ce type d'installations très prisées en Europe mais très peu testées sérieusement a pu être faite. La mesure de CO, NO, NO_x, SO₂, C_xH_y dans les fumées est également possible. On peut s'attendre à une plus forte demande dans les années à venir pour des tests de combi-systèmes bois-solaire.
10. Le banc de test de pompes a été utilisé pour 4 nouvelles pompes « *rotary vane* », deux avec de l'eau et deux avec un mélange antigel.
11. Le banc de test du comportement de l'eau dans une cuve de stockage à l'aide de la méthode PIV (*Particle Image Velocimetry*) est opérationnel. Deux solutions de sortie de cuve ont été mesurées. Les pertes thermiques peuvent avec des dispositifs simples être nettement réduites grâce à la visualisation des phénomènes en PIV. Les modèles numériques sont moins performants, car dépendant des hypothèses dans des situations difficiles (connections de tuyaux dans les cuves).
12. Le label de qualité « SOLARGLASS », développé au SPF, s'impose petit à petit en Europe dans les tests de verre solaire par les laboratoires et chez les industriels. Cela est une belle réussite de la ténacité dont le SPF a fait preuve pour imposer la qualité de son test.
13. Plus de 50 verres ont été soumis par des fabricants au SPF pour obtenir ce label, 60% ont passé le test.
14. Quatre couches sélectives nouvelles ont été testées, cependant aucune n'a passé le test du SPF !
15. Le dégazage dans les capteurs est un problème pour nombre de fabricants lors du choix des matériaux, en ce qui regarde l'isolation, la peinture, les colles et les joints. Le SPF a testé 19 capteurs en 2007. Seuls 3 ont réussi le test de qualité, les autres devront être modifiés par le fabricant, s'il le décide.
16. Aucun test de pâte de soudure n'a été demandé durant cette année, le soudage laser devenant la règle chez les fabricants d'absorbeurs en cuivre. Par contre les tests de liaisons entre capteurs, une pièce souvent négligée, mais source de fuites, ont été très demandés après une année sans aucune demande en 2006.
17. Dans le cadre du projet « **Polymeric materials for Solar thermal applications** » du Programme SH&C de l'AIE, le SPF se concentre sur la recherche de polymères adaptés aux capteurs solaires.
18. Dans le cadre du projet « **Solar Air Conditioning and Refrigeration** » du Programme SH&C de l'AIE, la mesure d'une installation de refroidissement solaire installée au SPF montre les difficultés de jeunesse des solutions actuelles. Des améliorations dans les échangeurs sont nécessaires et la modélisation permettra une optimisation bien nécessaire avant le déploiement sur le marché.
19. Après plus d'une année de mise au point, le SPF a déposé un brevet pour un absorbeur entièrement en aluminium qui intéresse déjà des partenaires industriels suisses. Le prix élevé du cuivre motive la recherche de solutions alternatives.

20. Après 20 ans de tests de couvertures transparentes pour les capteurs solaires, dont des échantillons ont été exposés au rayonnement solaire à Davos et à Rapperswil depuis 1986, le projet va se terminer. Les résultats seront prochainement publiés. Ils montrent la non résistance des plastiques chlorés, et la bonne résistance d'autres types de polymères. Dans l'ensemble, le verre a le meilleur comportement malgré tout. Ce travail est unique au monde et utile non seulement pour l'énergie solaire active, mais aussi pour les choix de matériaux de couverture transparents pour atrium, avant-toits et toitures.

b) Matériaux

1. Les travaux du projet « **Polymeric materials for Solar thermal applications** » du Programme SH&C de l'AIE sont accomplis par le SPF en Suisse. Leur but est d'étudier le recours aux polymères dans toutes les parties d'une installation solaire. La protection contre la surchauffe (figure 2) pourrait être assurée par un polymère « thermotrope » qui a la propriété de perdre 50% de transmission dans le visible à 80 °C.
2. Les matériaux dits **thermochromiques** sont aussi une réponse à la surchauffe. Ce peut être l'absorbeur ou la couverture du capteur. Le SPF a défini par simulation les caractéristiques qu'un absorbeur, fait d'un tel matériau, devrait avoir en terme de couple absorption / émission. Pour limiter la température à une valeur de 160 °C, l'émissivité devrait passer de 5 à 25%. Cela paraît possible mais la limite de 100 °C est préférable pour ce qui est du fluide caloporeur. Pour ce faire, le coefficient d'absorption devrait passer de 0.95 à 0.30 ou à 0.60 si l'émissivité peut être augmentée simultanément de 0.05 à 0.95. La recherche de matériaux capable de ces changements a débuté, des pistes existent. Le LESO de l'EPFL, selon les indications du SPF, recherche un nanomatériau susceptible de répondre aux conditions [6]. Les voies de recherche en 2007 concernent les matériaux organiques et inorganiques, et les peintures organiques à propriété thermotropique. Toutefois, les matériaux avec des transitions d'émissivité simultanées à l'absorption ne semblent pas aisés à trouver. Une combinaison de matériaux est la meilleure piste. Une machine à dépôt sous vide a opportunément été donnée au LESO par Asulab/Swatch et pourra être utilisée à cet effet. Selon les pistes promises par ces investigations nous déciderons en 2008 de la poursuite.
3. La nouvelle version du **CD-ROM SPF-Info CD** a été préparée. Elle comportera tous les résultats obtenus par le SPF depuis 20 ans. Un gros effort de programmation nouvelle en Java a été fourni, et un accès direct à la base de données des mesures du SPF (pour le calcul du « *Bruttowärmeertrag* » bien connu), avec une interface utilisateur entièrement revue, a été créé. La sortie est prévue pour mars 2008.
4. Le site internet <http://www.solarenergy.ch> continue d'être très fréquenté. Il a été transféré sur une plate-forme Typo3, au standard de la HES de Rapperswil, pour faciliter la gestion quotidienne des droits des usagers et des contenus.
5. Le SPF a développé pour une industrie une méthode de test de vieillissement accéléré d'absorbeurs solaires sous concentration pouvant atteindre 600 °C [26].

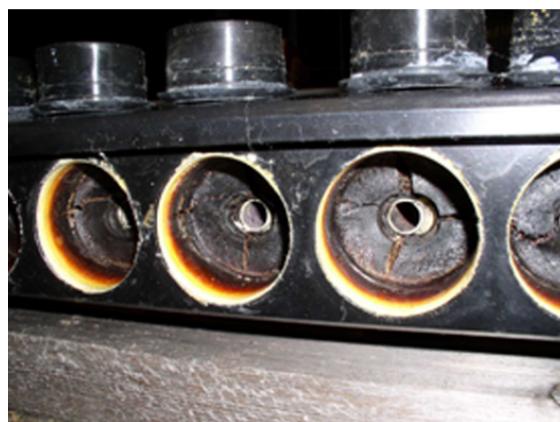


Figure 2 : dommages infligés à l'isolation de capteurs sous vide après qu'ils ont atteint leur température de stagnation.

c) Nouvelles perspectives : des verres solaires de couleur pour capteurs et bâtiments

Le LESO de l'EPF de Lausanne a réussi à produire un verre solaire de couleur de la dimension d'un capteur solaire thermique [5, 19, 25] (figure 3). Pour aboutir à cette réussite, après 3 années de recherche, les travaux 2007 ont été les suivants :

1. Les couches minces composées de SiO_2 et TiO_2 ont été déposées régulièrement sur des verres de dimension A4 par le procédé sol-gel du LESO.
2. Un traitement aux UV pour durcir le film a été appliqué avec succès pour réduire les temps de production et pour limiter la consommation d'énergie de tout le procédé de dépôt.
3. Les méthodes de mesure optique des propriétés des couches minces déposées au LESO ont été encore affinées.
4. Grâce à une collaboration, pour le moment ponctuelle, avec une société suisse du verre, un dépôt par procédé de pulvérisation « Magnetron Sputtering » a pu être réalisé dans leur machine, pour teinter un verre de capteur de 1.90 m par 3 m en bleu. L'opération s'est parfaitement déroulée, et différents types de traitement de surface ont pu être testés avec succès en plus de la couleur, ouvrant ainsi la voie à une possible production de masse si l'industrie y voit un marché.
5. Le procédé par sol-gel pourrait aussi être testé pour des verres de 2 m par 1 m. Il est moins industrialisé, mais il coûterait moins cher en investissement en cas de marché restreint. Des discussions avec une société solaire sont en cours pour monter une unité de production.
6. L'ouverture vers les marchés de la façade solaire a été travaillée en collaboration avec des architectes. Des propositions ont été avancées par le LESO lors du Symposium PLEA à Singapour. Le traitement de surface permettrait des effets intéressants, tels que des textes ou motifs sur le verre à couche de couleur, sans altération des propriétés solaires.
7. Le verre peut être utilisé non seulement pour des capteurs mais aussi en parement extérieur d'isolation de façades, permettant une liberté de couleurs et de rendus appréciée des architectes. Le matériel réalisé a été montré à des architectes et leur réaction recueillie, de telle sorte que des traitements de surface complémentaires à la couleur ont été imaginés et réalisés en prototype. La flexibilité est le critère important si on veut offrir un produit d'intégration.
8. Des contacts approfondis ont eu lieu avec différentes industries du bâtiment et du verre. Un nouveau projet, soumis à la CTI, sur les nanostructures pour les absorbeurs sélectifs est une retombée du présent projet qui s'annonce très prometteuse.



Figure 3 : durcissement par UV des couches minces déposées sur du verre pour les stabiliser (image de gauche) et coloris obtenus pour diverses combinaisons de couches (image de droite) [5].

d) Étude de la ressource solaire

Le but du projet « **Solar ressource Knowledge Management** » [13] du programme *Solar Heating and Cooling* de l'AIE, est de rendre accessibles aux utilisateurs potentiels les données de gisement solaire sous une forme unifiée, précise, complète et simple à utiliser. Ces données peuvent être des archives, des valeurs générées par logiciel, des valeurs en ligne à partir de satellites météorologiques ainsi que des prévisions à court et moyen terme.

La contribution actuelle de l'Université de Genève est d'analyser et d'évaluer le comportement et la précision du logiciel *Meteonorm*. Les principaux résultats obtenus montrent que, si les valeurs moyennes de rayonnement sont générées au moyen de la version 2007 de *Meteonorm* de façon relativement satisfaisante, c'est un peu moins le cas lors de son utilisation pour des années spécifiques. Par ailleurs, si la répartition dynamique des résultats a été améliorée en comparaison de mesures effectuées à Genève, ce n'est pas le cas lors d'une analyse appliquée à des stations européennes ou américaines.

e) Outils de simulation : *Polysun 4* [4]

La société *Vela Solaris*, créée en janvier 2007 pour mieux installer le logiciel ***Polysun*** dans les marchés mondiaux, a désormais en charge le *marketing* et certains développements du logiciel, tels que l'intégration de composants de pompes à chaleur et de sondes pour élargir le champ d'application du logiciel. Une autre société, *Solar campus GmbH*, sera chargée plus spécialement de la formation. Cela devrait alléger l'implication du SPF dans la programmation de ***Polysun*** pour le laisser se consacrer aux aspects scientifiques.

Une nouveauté introduite dans ***Polysun 4*** en 2007 est un modèle évolué de chaudière à gaz à condensation, à mazout et à granulés, mis au point en collaboration avec un laboratoire de l'Université Technique de Graz en Autriche. Ce développement a été partiellement financé par les fonds de recherche FEV et FOCA des pétroliers et gaziers suisses. ***Polysun 4*** a également été doté d'un module d'analyse paramétrique pour simplifier les études de variantes, et d'un module de chauffage d'appoint libre (utile pour reproduire les résultats de tests de 12 jours sur les combi-systèmes). Une version, dite ***Polysun science***, qui permet une grande liberté de choix à un concepteur de systèmes, tout en gardant la simplicité de simulation, a été développée et est en test au SPF. Pour le bâtiment, ***Polysun 4*** intègre de manière plus forte qu'auparavant le logiciel ***Helios***, utile pour la charge dynamique de chauffage et de refroidissement (figure 4). Une collaboration avec l'EMPA a été utile sur ce thème.

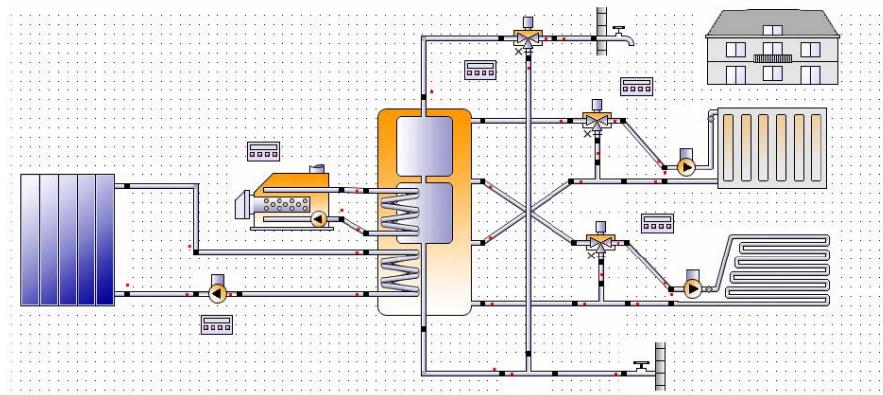


Figure 4 : *Polysun 4* offre encore plus de facilité de conception des circuits de charge ou de décharge tout en permettant de simuler l'installation conçue (source : SPF).

SYSTÈMES ET INSTALLATIONS SOLAIRES POUR LE BÂTIMENT

a) Systèmes combinés : des améliorations possibles [2, 11, 24]

1. Pertes par ponts thermiques : le SPF a mené une étude sur les pertes thermiques par thermo-circulation interne dans les raccords à une cuve de stockage (figure 5). Des recommandations constructives ont été édictées qui permettent de concevoir une installation solaire en minimisant les pertes thermiques, non aisément calculables, que sont tous les divers ponts thermiques. La SIA s'est associé à la publication de ces recommandations.

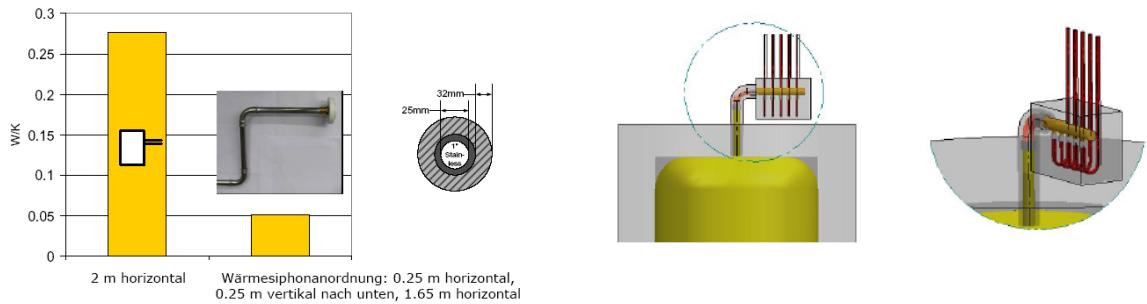


Figure 5 : en disposant la sortie d'une cuve en col de cygne, plutôt qu'horizontale, on peut réduire les déperditions thermiques d'un facteur 5 [24].

2. Système sans pression [23]

Dans le cadre du projet « **Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings** » du Programme SH&C de l'AIE, le SPF a proposé en 2006 un nouveau système combiné avec des avantages tant économiques qu'énergétiques, le système « *maxlean* » (figure 6). Il est doté d'une cuve sans pression, d'un débit variable dans la boucle de distribution, et d'un échangeur interne à la cuve pour la préparation d'eau chaude sanitaire.

Les simulations du concept réalisées en 2007 ont montré un avantage du concept pour les fractions d'apport d'énergie solaire comprises surtout entre 20 et 50%. L'avantage peut aller jusqu'à 25% de gain en performance énergétique ; ce qui n'est pas négligeable si la construction est en outre moins onéreuse. Cela reste encore à prouver dans un projet pilote à venir.

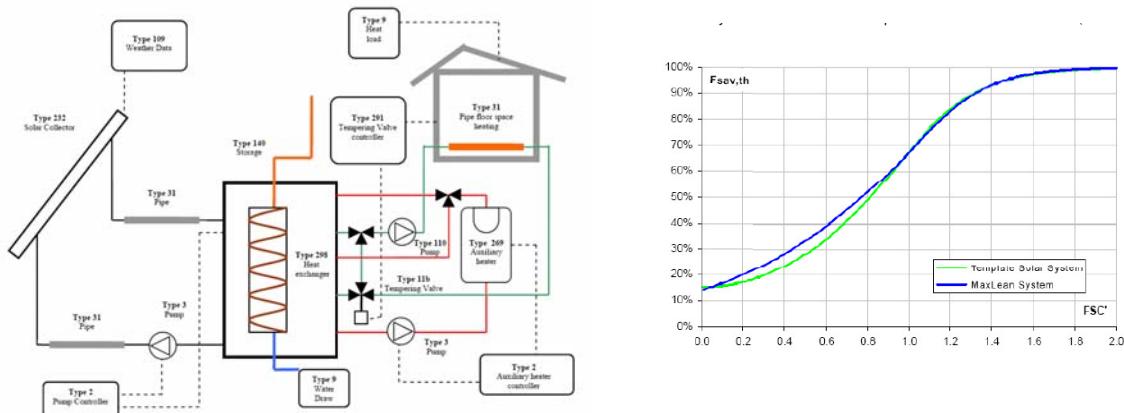


Figure 6 : le système « Maxlean », imaginé par le SPF pour réduire les coûts du solaire, a des performances meilleures que le système de référence du projet « Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings » du Programme SH&C de l'AIE, surtout dans la gamme des faibles taux de couverture solaire [23].

STOCKAGE DE CHALEUR

a) Projet SERSO : stockage saisonnier solaire pour le dégivrage d'un pont [7]

L'installation de dégivrage d'un pont dans le Canton de Berne, grâce à un stockage saisonnier à basse température, fonctionne depuis plusieurs années. Sur la base des mesures, un logiciel de simulation, appelé **BridgeSim**, a été développé à la Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI). On dispose ainsi d'un outil de simulation performant qui permet des optimisations de tout type pour ce genre d'installations pour le moment encore peu répandue. L'installation de la Suva à Root a bénéficié des développements de ce logiciel [16].

Le logiciel validé **BridgeSim** a été utilisé pour redimensionner le système SERSO. Les grandeurs suivantes ont été optimisées : l'espacement entre les sondes, le contrôle des gains solaires, la longueur des sondes géothermiques et leur profondeur. Les influences d'autres variables sont également évaluées, comme la résistance thermique des sondes, le diamètre de forage et deux paramètres importants relatifs au pont, qui sont la couche d'isolation sous le pont et l'écartement des tubes dans la

chaussée du pont (figure 7). L'isolation de la face inférieure du pont a une influence de premier ordre. Avec une telle isolation, la demande pour le dégivrage est de l'ordre de $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{an})$. L'influence d'un écoulement souterrain au travers du stock peut aussi être évaluée avec le logiciel **BridgeSim**.

L'influence des conditions météorologiques a aussi été chiffrée, des règles simples de dimensionnement sont fournies. Deux paramètres fondamentaux pour le dimensionnement d'un système sont la conductivité thermique du terrain et la quantité d'énergie de chauffage nécessaire au dégivrage du pont. Au-delà d'une certaine énergie spécifique de chauffage, qui se situe entre 150 et $200 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{an})$, un système comme celui de SERSO ne peut plus satisfaire la demande de chauffage. Pour des valeurs plus basses, la longueur et la profondeur spécifiques des sondes peut varier de 2 m à près de 10 m par m^2 de surface de pont à dégivrer. Le logiciel sera distribué internationalement, la demande existe aux États-Unis, au Canada et au Japon notamment.

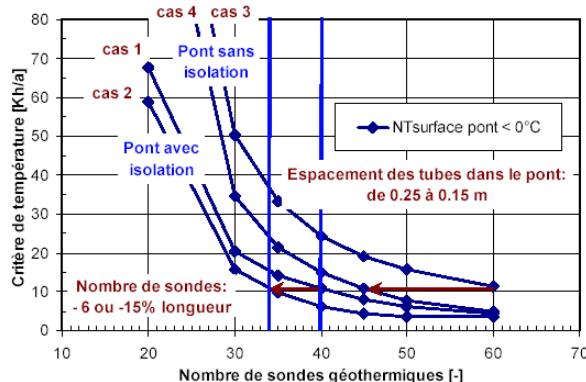


Figure 7 : optimisation a posteriori de SERSO avec le logiciel BridgeSim ; ne pas isoler le pont, tout en maintenant l'espacement des serpentins à 25 cm, nécessite une augmentation massive du nombre ou de la longueur et de la profondeur des sondes géothermiques [7].

b) Stock déphaseur pour le rafraîchissement de locaux [8,18]

Le rapport final du projet « **déphaseur thermique diffusif** » a été publié. L'étude du stockage / déphasage en eau s'est avérée extrêmement concluante, le déphasage de 12 h pouvant être atteint avec un stock de 0.6 m^3 par $100 \text{ m}^3/\text{h}$ d'eau, ce qui correspond à 40% de réduction par rapport au stockage en ciment ou en terre cuite (figure 8). La transmission du signal se situe parmi les plus hautes valeurs observées jusqu'ici. Ainsi, même pour une vitesse aussi faible que $100 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$, soit 2.8 cm/s à vide, la transmission reste supérieure à 60%.

Globalement, en préliminaire à un développement industriel, le projet a permis de compléter des lacunes scientifiques concernant le phénomène de déphasage thermique contrôlé, de faire le pont avec la mise en place d'un premier projet P&D dans un café de Genève ainsi qu'avec l'étude du potentiel d'intégration dans le bâtiment, et de mettre en place une série de collaborations pour la suite des développements. La solution d'un stock journalier de « frais » dans un système de ventilation nécessiterait d'être développée en collaboration avec l'industrie, dans le but de mettre à disposition un système clé en main. Des collaborations sont toujours recherchées. Des simulations poussées seront poursuivies avec un financement complémentaire du Canton de Genève pour optimiser l'échangeur, et on attend les résultats du projet P&D mis en place dans l'installation rénovée de la ventilation du café genevois et financé par le service de l'énergie du Canton de Genève.

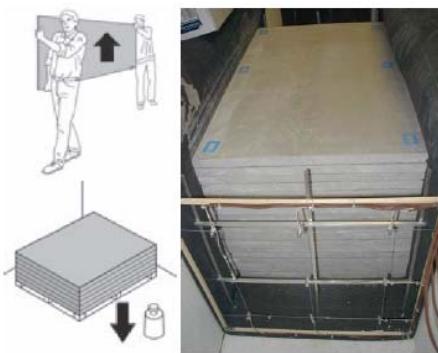


Figure 8 : un déphaseur de 12 h, optimisé par simulation pour un rafraîchissement naturel estival sans appoint et réalisé avec des matériaux traditionnel du bâtiment (plaques de ciment et perlite), a été planifié pour un premier projet P&D à Genève [8].

c) Stockage dense de chaleur pour l'habitat

Le projet « **Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings** » [11a,b] du Programme *Solar Heating and Cooling* (SH&C) de l'AIE (www.iea-shc.org), que nous avons initié et dirigé depuis 2003, s'est achevé en décembre 2007. Les rapports finaux ne seront terminés que durant les premiers mois de 2008, mais les principales conclusions des travaux des huit pays participants sont les suivantes :

Stockage dans des matériaux à changement de phase (PCM) : les stocks combinés eau + PCM n'ont pas atteint des densités notoirement meilleures que celle de l'eau seule dans le cas d'une installation solaire combinée. Néanmoins, les méthodes de caractérisation des PCM ont été nettement améliorées et des modèles de simulation ont été développés qui vont permettre à l'avenir la recherche des meilleures solutions recourant aux PCM. Une solution de stockage saisonnier grâce à un PCM en surfusion a été développée au Danemark.

Stockage dans les cuves à eau : un dispositif en tissu d'amélioration de la stratification a été imaginé et étudié par une équipe danoise. Plusieurs modifications du concept usuel d'installation solaire « combinée » pour une villa, avec stockage en cuve à eau, ont été développées et sont en cours d'étude en Allemagne, en Autriche et en Suisse.

Stockage par sorption : une machine commerciale suédoise produisant 20 kW de chaleur et 10 kW de froid a été mise sur le marché espagnol en 2007. Le stockage en lit perméable de silicagel ou de zéolite n'a pas été couronné de succès. Le matériau est en cause et, pour les températures rencontrées dans l'habitat (20 à 70 °C), de nouveaux matériaux à sorption sont nécessaires. Un nouveau projet a été lancé en ce sens à la fin 2007. Il sera dirigé par une équipe hollandaise. La zéolite sous forme solide, extrudée avec de petits canaux, est un espoir, et son développement est avancé en Allemagne. En Suisse, les travaux du SPF sur la zéolite ont conclu à une inadéquation du matériau pour le stockage entre 20 et 70 °C. À l'EMPA, on a mis en route une étude de stockage basé sur une adsorption en circuit fermé de l'eau par la soude.

Stockage chimique : il a été conclu que l'une des meilleures réactions chimiques endo- et exothermiques pour le solaire thermique pour l'habitat concerne le sulfate de magnésium hepta-hydrate entre les deux formes hydratée et non hydratée. Deux groupes de recherche aux Pays-Bas et en France poursuivront la voie. Des modèles de calcul de différents types de stockage ont été développés durant le projet et, pour la plupart, validés. L'équipe de la HEIG-VD d'Yverdon s'est distinguée dans le domaine des matériaux à changement de phase avec un modèle numérique de grande qualité [21]. En ce qui concerne la comparaison de diverses solutions de stockage simulées dans des conditions identiques, dites de référence, les résultats seront disponibles en 2008. La méthodologie de caractérisation d'un système solaire actif a été notoirement améliorée (figure 9) et fera l'objet de publications scientifiques spécifiques. Elle prend en compte désormais la possibilité du stockage de longue durée et du refroidissement solaire.

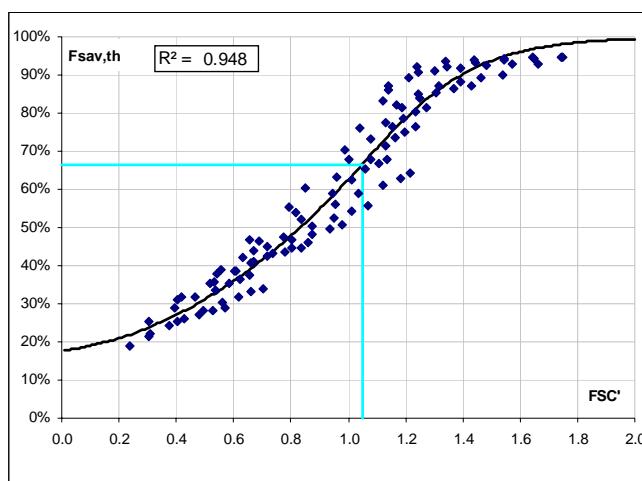


Figure 9 : le concept de la méthode FSC (Fractional Solar Consumption) a été élargi par le projet « Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings » du Programme SH&C de l'AIE [11a,b]. La corrélation entre la valeur FSC et la valeur F_{sav} (Fraction of energy saved by solar) d'une installation combinée peut être déterminée même pour les hautes fractions solaires.

Stockage par procédé de sorption : Le SPF a poursuivi ses recherches sur un procédé de stockage à long terme par sorption avec de la zéolite 13X (1 à 2 mm de diamètre) [3]. Le dispositif expérimental amélioré en 2007 permet d'étudier les caractéristiques de charge et de décharge d'un lit poreux de zéolite parcouru par un flux de vapeur d'eau. L'étude des paramètres a révélé que le diamètre des particules joue un rôle important dans le phénomène d'adsorption. Il apparaît très difficile d'obtenir avec la zéolite une puissance de charge ou de décharge compatible avec des applications en solaire thermique. L'espoir de ce matériau de fournir un stock plus dense que l'eau a été anéanti de par sa faible capacité de restitution ou de charge. Une équipe autrichienne a testé dans une installation solaire réelle un procédé semblable, mais en utilisant du silicagel. Le résultat a été également décevant, le matériau ne permettant pas une restitution en température suffisante lors de la décharge, malgré des taux de désorption assez élevés.

Il a été décidé à la fin 2007 de cesser les travaux dans cet axe de recherche, en gardant une veille technologique sur les matériaux qui peuvent être plus efficaces que la zéolite. Certaines pistes existent au Japon et en Allemagne, mais nous pensons que la voie est trop longue pour un résultat qui ne sera pas très favorable en regard de la capacité calorifique de l'eau pour le stockage à long terme.

Stockage avec matériaux à changement de phase (PCM) [9, 20, 21] : Le rapport final du projet **CosyPCM** de la HEIG-VD d'Yverdon est disponible. Les principaux résultats sont les suivants :

- un modèle numérique de simulation de cuve solaire avec *PCM* (figure 10) est validé sur des mesures ;
- le potentiel d'amélioration procuré par de l'acéate de sodium, matériau à changement de phase autour de 58 °C dans une cuve de combi-système, s'avère faible, surtout dans le cas d'un système combiné à appoint au gaz intégré à la cuve. Ceci est dû au peu de volume à disposition pour le matériau *PCM*, et aux limitations de la vitesse d'échange thermique entre le fluide de la cuve et le matériau à changement de phase. Malgré le mélange avec du graphite et l'ingéniosité déployée dans la construction de l'échangeur, la vitesse réduite du transfert pénalise les systèmes solaires de production d'eau chaude sanitaire ;
- une optimisation de l'usage du matériau à changement de phase dans une installation solaire domestique est à mettre au point, car les premiers résultats sont décevants. C'est l'objet du projet **PowerPCM**.

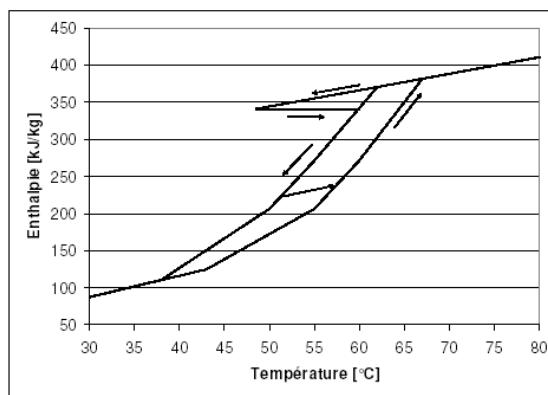


Figure 10 : 2 phénomènes typiques des matériaux à changement de phase qui ont été modélisés : l'hystérèse et la surfusion. (source : LESBAT, HEIG-VD d'Yverdon)

Le projet **PowerPCM** [10] a pour but de déterminer la relation qui existe entre la puissance fournie par un appoint et les performances d'une installation solaire, car une puissance trop élevée rend inopérant le stockage dans un matériau à changement de phase qui n'arrive pas à absorber les pointes. À propos de la température de changement de phase, il est montré qu'il y a un optimum aux alentours de 35 °C pour un bâtiment avec une faible demande de 30 kWh/(m²·a), alors que pour un bâtiment plus ancien demandant 100 kWh/m²·a, l'optimum se situe vers 54 °C. La température de départ de chauffage influence donc directement la température optimale de changement de phase. Mais, dans le meilleur des cas, le gain en performance annuelle avec le *PCM*, par rapport à un stock en eau, reste faible, à environ 3%. L'optimisation se poursuit pour rechercher les cas les plus favorables au *PCM*.

Stockage et transport de froid [12, 22] : L'étude expérimentale de coulis d'hydrates de CO₂ est bien avancée. Le groupe de la HEIG-VD d'Yverdon maîtrise la formation de coulis pratiquement à la demande jusqu'à une proportion de 30%, ce qui est élevé. Le pompage demande alors une pression

relativement élevée. La mesure de la viscosité s'avère délicate et un banc d'essai a été réalisé pour 2008. La modélisation par CFD (*Computational Fluid Dynamics*) en 2D et 3D est en cours pour prédire la formation d'hydrates et la pression résultante dans un circuit. Une tâche ardue qui pourra ouvrir la voie à l'optimisation du transport et du stockage de froid dans des machines *ad hoc*. Le marché est grand et la coopération avec l'industrie va être recherchée.

Stockage thermochimique : Dans le projet « **NaOH** » [14], l'EMPA essaie de réaliser un stockage plus dense en volume que l'eau. Les travaux théoriques ont montré qu'un facteur 3 était possible, par rapport à un stock d'eau à 70 °C. Le dispositif expérimental monté en 2006 a été exploité pour les premiers essais. Des difficultés de pompage, dues à la viscosité, et de corrosion ont été surmontées. Un modèle mathématique du comportement global du stock a été écrit. La simulation de l'installation est en cours sur un système de référence du projet « **Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings** » du Programme SH&C de l'AIE.

d) Réfrigération solaire

Le sujet est de plus en plus à l'étude en Europe, avec des visées sur les marchés méditerranéens. Au SPF, une installation test comporte 30 m² de capteurs et une machine à **absorption** Phönix au LiBr – H₂O de 10 kW, qui procure du froid à un atelier par le biais de 80 m² de panneaux radiants. Les pompes auxiliaires consomment 1.5 kW. Il a été mesuré un coefficient de performance thermique (COP) de 0.8 et, en tenant compte des auxiliaires électriques, un COP global de 0.68. L'analyse économique montre des coûts annuels de 10'000 CHF contre 2'000 CHF pour un système à compression équivalent tout électrique [3]. D'autres travaux, concernant une armoire réfrigérée solaire par un système à ammoniac nécessitant une source à 260 °C, ont été réalisés pour mieux comprendre les phénomènes et pour développer des modèles de composants dans l'outil de simulation **Polysun**.

Au Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment (LESBAT) de la HEIG-VD d'Yverdon, on travaille également sur un système à **adsorption**. Les travaux ont porté sur la finalisation du principe du banc d'essais à installer en 2008, l'acquisition de la machine à adsorption de marque Sortech, et la conception de l'installation de cette machine sur le stand avec l'intégration de simulations TRNSYS dans la boucle de commande et d'acquisition [15]. Le développement d'une nouvelle machine de froid n'est pas envisagé. Le travail vise à coupler un système solaire combiné existant avec une production de froid en été, et à optimiser ce couplage pour comprendre son intérêt énergétique et économique. Le LEBAT utilise également ses compétences en analyse environnementale de l'installation de climatisation solaire à adsorption pour la comparer à une installation standard de climatisation, en utilisant le logiciel **Ecobat** de la HEIG-VD d'Yverdon qui pourrait ainsi devenir un standard international.

Collaboration nationale

Le SPF/HS-Rapperswil travaille avec pratiquement tous les fabricants de capteurs solaires suisses.

Les centres de compétences suisses que nous soutenons (SPF/HS-Rapperswil, LEBAT/HEIG-VD, CUEPE/Uni GE, LESO/EPFL, LEEE/SUPSI) collaborent avec des industriels nationaux dans leurs projets.

Le LESO/EPFL travaille entre autres avec l'Université de Bâle sur la question des nanocouches de couleur, et a approché six industriels pour ancrer le projet dans les besoins du marché et trouver des solutions industrielles à la production de verre solaire.

Collaboration internationale

Le SPF collabore à trois projets du Programme SH&C de l'AIE : le projet « **Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings** », le projet « **Solar Air Conditioning and Refrigeration** » et le projet « **Polymeric materials for Solar thermal applications** ». Le SPF/HS-Rapperswil collabore régulièrement avec l'*Institut für Solare Energiesysteme ISE*, à Freiburg-i.-B. (DE) et le *SP Technical Research Institute of Sweden*, à Borås (SE).

Le SPF/HS-Rapperswil est présent dans les grandes conférences scientifiques et techniques solaires européennes pour présenter ses travaux et promouvoir **Polysun**. Des collaborations naissent à cette occasion ainsi que des idées de partenariat pour des projets européens.

Dans le projet « **Advanced Storage Concepts for Solar Thermal Systems in Low Energy Buildings** » que nous avons dirigé durant 5 ans, les échanges entre partenaires internationaux ont permis à nos équipes de progresser beaucoup plus vite dans certaines connaissances.

Le LESO/EPFL est à l'origine d'un nouveau réseau européen sur les films minces nanostructurés qui est en passe de voir le jour, suite à une conférence très suivie, tenue en 2007 à Gdańsk (PL).

Projets pilotes et de démonstration "Solaire actif – chaleur"

Im Jahre 2007 wurden mangels Budget keine neuen Pilotprojekte mehr gestartet. Eines der beiden verbleibenden Projekte [100] konnte abgeschlossen werden, das andere [101] erfährt wegen zögerlicher Inangriffnahme der Betriebsoptimierung weitere Verzögerungen.

Die Sanierung der Gebäude der Gemeinnützigen Baugenossenschaft Zürich (GBZ) [100] an der Drusbergstrasse in Zürich zeigt, wie dank kontinuierlicher Ausrüstung aller Gebäude mittels Solaranlagen, der Primärenergieaufwand für die Warmwasserversorgung deutlich gesenkt werden kann (Figure 11). Dabei ist die Systemarchitektur der Warmwasserversorgung für die Wahl der optimalen Einbindung von grosser Bedeutung. Dank dezentraler Wassererwärmung, mit lokaler Sonnenenergieanbindung lassen sich die Verteilverluste von der Heizzentrale zu den einzelnen Gebäuden stark reduzieren.

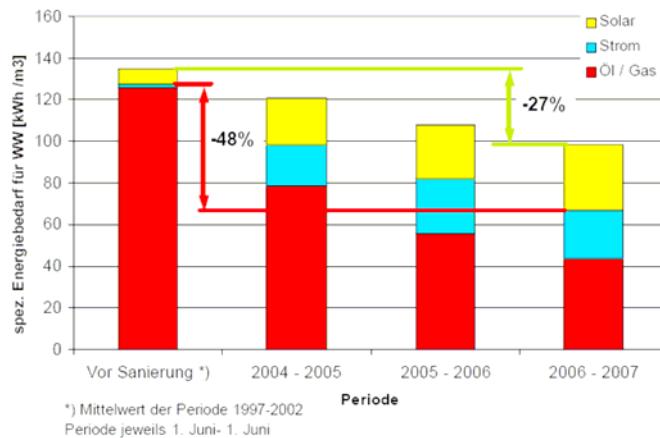


Figure 11: Veränderung des spezifischen Energiebedarfs der Warmwassererzeugung vor und während der etappenweisen Sanierung der Gebäude der Gemeinnützigen Baugenossenschaft Zürich GBZ.

Évaluation de l'année 2007 et perspectives pour 2008

Les travaux de tests de qualité des composants solaires se déroulent à satisfaction au SPF et stimulent aussi la recherche. Le simulateur solaire a été mis en route et sera un outil important pour intensifier les essais sans dépendre de la météorologie.

La réalisation d'un prototype de verre solaire de couleur, adapté à un capteur réel, est une grande première. Les discussions pour une industrialisation doivent s'intensifier durant 2008. La reconnaissance d'un marché, non seulement solaire, mais aussi architectural, et d'une technologie procurant un avantage compétitif à un industriel, est la phase à privilégier. La connaissance sur les nanomatériaux et la compétence que le LESO a patiemment construites depuis 2001 avec le soutien de notre programme portera ses fruits non seulement dans le domaine des capteurs en couleur, mais aussi peut-être dans la thermochromie et les couches sélectives.

M. Schueler du LESO a été récompensé en 2007 par le prix de l'article scientifique le plus téléchargé en 2005 et 2006 sur le site du prestigieux « *Solar Energy Journal* ». La publication date de 2004 et a été réalisée avec le Prof. Oelhaven de Bâle, un des meilleurs connaisseurs mondiaux des nanostructures à propriété optique. Le prix leur a été distribué lors d'une conférence internationale à Pékin [25].

Le logiciel *Polysun 4.0* a été techniquement bien repris par l'entreprise *Vela Solaris*. Il a encore progressé, mais les conditions de survie financière de cette *spin-off* ne sont pas encore garanties. En 2008, un premier module de réfrigération solaire, basé sur l'expérience des mesures au SPF, sera introduit sur le marché. Dans les années à venir, nous souhaitons que *Polysun* devienne aussi LA référence mondiale dans le domaine du froid solaire. La validation des modèles de chaudière d'appoint est à faire en 2008 en utilisant les résultats des tests de combi-systèmes sur le banc du SPF.

Le projet SERSO d'un pont dégivré par l'énergie solaire s'est achevé après près de 10 ans de travaux : le projet a été réalisé, les mesures effectuées, un modèle de calcul validé, une optimisation a

posteriori a été faite en simulation dynamique et un logiciel, *BridgeSim*, est désormais disponible. La commercialisation de cet outil est prévue pour 2008.

Les travaux ayant pour objet la recherche de nouveaux matériaux pour le stockage ont été plus difficiles que prévu. Les efforts financiers consentis ne sont pas à la hauteur du problème. La recherche internationale commence, grâce à nos efforts depuis 2001, mais timidement, à se mobiliser sur le sujet. Nous concentrons nos ressources sur les thèmes qui nous paraissent à notre portée.

Selon la demande de la CORE, nous orientons désormais notre programme un peu plus vers la réfrigération solaire, avec deux projets qui ont débuté en 2007.

Liste des projets de R+D

(RA / RI) Rapport annuel / intermédiaire 2007 existant

(RF) Rapport final existant (voir www.recherche-energetique.ch sous les numéros de projet entre parenthèses)

Les rapports peuvent être téléchargés à partir de notre site : <http://www.solarenergy-thermal.ch/> ou www.solarch.ch

Solaire actif – chaleur

- [1] A. Bohren, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie • **Teil A: Komponenten in solarthermischen Systemen** (RA) <http://www.solarenergy.ch/>
- [2] E. Frank, S. Laipple, L. Konersmann, R. Haberl, P. Gantenbein, S. Brunold, P. Vogelsanger, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie • **Teil B: thermische Solarsysteme** (RA) <http://www.solarenergy.ch/>
- [3] S. Brunold, F. Flückiger, P. Gantenbein, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie • **Teil C: Materialien & Komponenten in solarthermischen Systemen** (RA) <http://www.solarenergy.ch/>
- [4] G. Necola, H. Marty, S. Brunold, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie • **Teil D: Informatik** (RA) <http://www.solarenergy.ch/>
- [5] A. Schüler, C. Roecker, E. de Chambrier, MC Munari-Probst, LESO EPFL, Lausanne: **Colored solar collectors – Phase II: From laboratory samples to collector prototypes** (RF du projet 100'506) <http://leso.epfl.ch/>
- [6] G. Huot, C. Roecker, A. Schüler, LESO EPFL, Lausanne: **Evaluation of the Potential of Optical Switching Materials for Overheating Protection of Thermal Solar Collectors** (RF du projet 102'016) <http://leso.epfl.ch/>

Stockage de chaleur

- [7] D. Pahud, SUPSI-DCT-LEEE, Canobbio: **SERSO, stockage saisonnier de l'énergie solaire pour le dégivrage d'un pont** (RF du projet 27'006) <http://www.leee.supsi.ch/>
- [8] P. Hollmuller, B. Lachal, CUEPE Uni GE, Genève: **Déphasageur thermique – Optimisation et prototype intégré** (RF du projet 45'914) <http://www.cuepe.ch>
- [9] S. Citherlet, J. Bony, LESBAT, HEIG-VD, Yverdon: **CoSyPCM – Combi-système avec matériaux à changement de phase** (RF du projet 100'522) <http://www.heig.ch>
- [10] S. Citherlet, J. Bony, LESBAT, HEIG-VD, Yverdon: **POWER PCM** (RA) <http://www.heig.ch>
- [11] J.-C. Hadorn, BASE consultants SA, Lausanne: (a) **IEA SH&C Task 32 Advanced storage concepts for solar and low energy buildings – Annual report of the operating agent** (RA) • (b) **IEA SH&C Task 32 Advanced storage concepts for solar and low energy buildings – Feature article in SH&C** (RA) <http://www.iea-shc.org>
- [12] O. Sari, J. Hu, F. Brun, N. Erbeau, IGT, HEIG-VD, Yverdon: **Projet Transport et Stockage de froid , I Experimental work, II Conversion Model-Determination of Solid Fraction** (RF du projet 101'582, confidentiel)
- [13] P. Ineichen, CUEPE UNI GE, Genève: **Solar ressource management IEA SH&C Task 36** (RA)
- [14] R. Weber, EMPA : **NAOH-Speicher für saisonale Wärmespeicherung** (RA)
- [15] S. Citherlet, C. Hildbrand, LESBAT, HEIG-VD, Yverdon: **SOLCOOL – Climatisation et chauffage par combisystème** (RA)

Liste des projets P+D « Stockage de chaleur »

- [16] P. Berchtold, E. Wirz, B. Engsig, M. Frei, PB Büro, Sarnen: **Geothermiespeicher SUVA D4 Unternehmens- und Innovationszentrum, Root (LU)** (RA) <http://www.aramis-research.ch/e/14779.html>

Références

- [17] J.-C. Hadorn: **Points clés du programme « Solaire actif chaleur et stockage de chaleur »** (Document de synthèse pour le programme 2008-2011, révision novembre 2007)
- [18] P. Hollmuller, B. Lachal, J.-M. Zgraggen, CUEPE Uni GE, Genève: **Phase-shifted ventilation, a new thermal storage concept for passive cooling of buildings: theoretical and experimental characterization**, International Journal of Heat and Mass Transfer, submitted November 14, 2007, <http://www.cuepe.ch>
- [19] M.-C. Munari Probst, C. Roecker, LESO, EPFL, Lausanne: **From façade integration of solar thermal collectors to active façade system - new glazed solar collectors for façades : The LESO solar coloured glazing project**. 24th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, PLEA 2007, Singapur
- [20] J. Bony, S. Citherlet, LESBAT, HEIG-VD, Yverdon: **Comparison between a new TRNSYS model and experimental data of phase change materials in a solar combisystem**, Building simulation 2007, 371-378
- [21] J. Bony, S. Citherlet, LESBAT, HEIG-VD, Yverdon: **Numerical model and experimental validation of heat storage with phase change materials**, Energy and Buildings 39 (2007), 1065-1073 www.sciencedirect.com
- [22] O. Sari, IGT, HEIG-VD, Yverdon: **CO₂ slurry – Production and distribution**, Swissforum technology 2007
- [23] R. Haberl, P. Vogelsanger, SPF/HS-Rapperswil: **Simulation and Optimization of the Maxlean System**, IEA SH&C Task 32, Sept. 2007, <http://www.iea-shc.org> (Task 32, Subtask D)
- [24] SPF/HS-Rapperswil: **Wärmeverluste durch Gegenstromzirkulation (rohrinterne Zirkulation) in an Speicher angeschlossenen Rohrleitungen**, SPF - SIA, Okt. 2007, <http://www.solarenergy.ch/>
- [25] P. Oelhafen, A. Schüler, **Nanostructured materials for solar energy conversion**, Solar Energy 79 (2), 110-121, Best Full Length Paper in Energy Conversion, ISES World Congress 2007, Beijing, China
- [26] S. Brunold, A. Luzzi (info@solarenergy.ch), SPF/HS-Rapperswil: **Beschleunigte Alterungsprüfung an Solarabsorbern für den Einsatz im Mitteltemperaturbereich** (RA)

Liste des projets P+D « Solaire actif : chaleur »

NB : La numérotation commence à 100.

- [100] A. Primas (aprimas@bhz.ch), BASLER & HOFMANN AG, Zürich: **Sanierung der Warmwasserversorgung Ge-meinnützige Baugenossenschaft Zürich 7 (GBZ 7)** (RF du projet 100'171)
- [101] T. Bruttin (thierry.bruttin@sierre.ch), VILLE DE SIERRE: **Complexe sportif Guillamo** (RA)