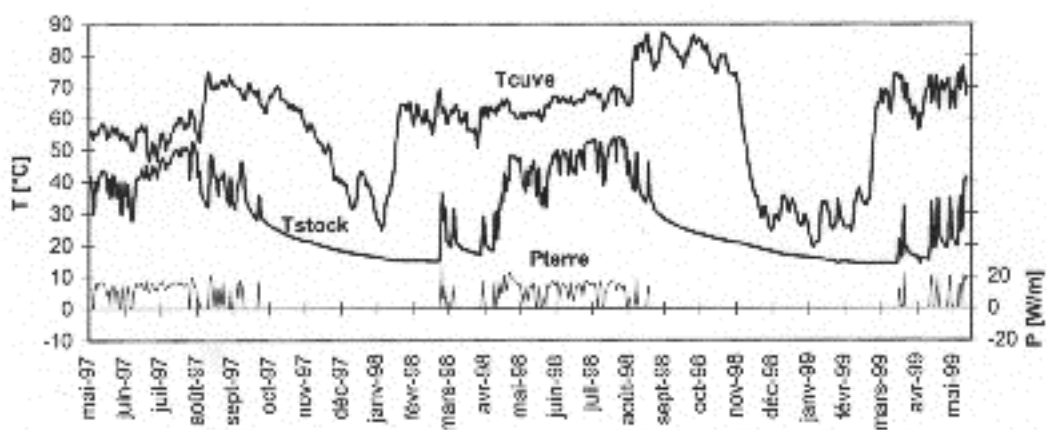


STOCKAGE DE CHALEUR

Rapport de synthèse
sur les activités 1999 du programme de recherche et du programme P+D

Jean-Christophe Hadorn

jchadorn@swissonline.ch



RENOVA : une rénovation exemplaire qui a atteint l'autonomie en renouvelable (85 MJ/m^2 an de bois) avec 30 m^2 de toiture solaire et 11 m^3 de stock à eau, mais avec un prototype de stock saisonnier diffusif individuel peu efficace (évolution des températures de la cuve et du stock souterrain de mai 97 à mai 99)

Centres de gravité du programme

Le programme de recherche "Stockage de chaleur" a été organisé pour toute la période 1996-1999 autour de trois types de stockage saisonnier : cuve à eau, stocks diffusifs, stockage en aquifère.

Les centres de gravité ont été en 1999:

- de préparer le document vulgarisant les résultats d'analyse de deux ensembles d'habitation, l'un neuf, l'autre à rénover, pour lesquels une installation solaire avec un **stock souterrain diffusif** a été optimisée en 97-98,
- de soutenir l'étude du système avec **stock diffusif** prévu par la SUVA à Root,
- d'obtenir les résultats de tous les stocks pilotes en cours d'étude depuis 3 ans,
- de finaliser une thèse sur le stockage en aquifère,
- d'initier des travaux de recherche en matière de **nouveaux matériaux de stockage** pour le solaire actif.

Buts visés pour 1999

a) Stockage en cuve à eau

Le rapport final de l'installation RENOVA était attendu, avec les conclusions quant à l'autonomie énergétique et aussi l'intérêt d'un stock souterrain diffusif pour une villa.

L'étude des possibilités de se passer de cuve solaire dans un bâtiment d'une telle ampleur devait conduire à des recommandations quant au concept capteurs solaires couplés à une dalle active.

b) Stockage diffusif

Une brochure de synthèse de tous les résultats obtenus à Winterthur après 3 ans de recherche sur l'optimisation d'installations solaires avec stockage saisonnier diffusif était attendue.

Le suivi du Collège de Peseux équipé d'un stock diffusif de 23'000 m³ qui fonctionne très bien, était à poursuivre pour optimiser encore les conditions de marche du système de cogénération. Les bons résultats obtenus sur ce pilote devaient être diffusés en trois langues.

Le bilan de 5 années de mesures du projet SERSO de dégivrage en hiver d'un pont par un stock de chaleur solaire d'été était attendu.

Un test de réponse thermique du sous-sol *in situ* à Root pour un éventuel stock saisonnier pour le nouveau complexe de la SUVA devrait être réalisé et servir de base à une étude d'optimisation avec le logiciel PileSim pour rassurer et convaincre le promoteur de l'intérêt pour son projet de cette nouvelle technologie déjà démontrée à Peseux et Wollerau.

Les résultats des pilotes de Buchrain et de St-Gall étaient souhaités.

c) Stockage en aquifère

Les travaux d'une thèse de 3 ans sur les conditions de fonctionnement de petits stocks en aquifère devait se terminer pour une soutenance en 2000.

d) Stockage en nouveau matériau

La recherche de nouveaux matériaux pour le stockage court terme de l'énergie solaire thermique, comme la zéolithe, devait débiter par une analyse bibliographique.

Travaux effectués et résultats obtenus

a) Stockage en cuve

Les pertes thermiques de la cuve de stockage saisonnier de l'installation solaire du bâtiment de l'**Office fédéral de la Statistique** ont été analysées en détail, après mesures faites avant remplissage de la cuve. Pour arriver au résultat de mesure, il faut multiplier la valeur calculée par 1.3 environ pour tenir compte de la mise en place réelle de l'isolant avec des joints

imparfaits (12 cm de laine minérale et 60 cm de polystyrène expansé) et des ponts thermiques inévitables, notamment par la base du stock. Le coefficient k moyen de l'enveloppe est de 0,23 W/m² • K. Le stock est en exploitation depuis l'été 1999 et les premières mesures indiquent que les consommations du bâtiment sont plus importantes que prévues, déchargeant rapidement le stock [1].

A Chambésy près de Genève, les mesures du projet **RENOVA** sont terminées. L'installation comporte

une cuve de 11 m³ chargée par 31 m² de capteurs solaires, ainsi qu'un stock souterrain diffusif de 7 sondes de 7 m placées sous la maison. A la base, la maison est ancienne et a été agrandie et rénovée, tout en essayant de tendre vers l'autonomie de la production en chaleur par une combinaison solaire-bois. Le pari est atteint : le chauffage au gaz n'a pas été utilisé pendant les deux années de mesure et l'indice de consommation énergétique a été de 85 MJ/ m² • an en bois. Les conclusions du CUEPE concernant les composants de l'installation sont [2]:

- lors de rénovations, c'est l'isolation de l'enveloppe qui est déterminante,
- l'apport de l'énergie solaire active pour le chauffage en direct, sans stockage saisonnier, est limité, même avec une toiture solaire de haute qualité. Le rendement annuel atteint 36%, la productivité est de 470 kWh/ m² • an, mais seulement 21 kWh/ m² • an sont utilisés pour l'eau chaude et 25 pour le chauffage, le reste étant injecté dans le stock souterrain et n'est pratiquement jamais récupéré. Il convient pour la villa individuelle de ne pas sur-dimensionner la surface de captage, puisque nous n'avons pas de solutions de stockage saisonnier (10 à 12 m² sont suffisants pour une villa type MINERGIE),
- le stockage saisonnier diffusif est impraticable pour les maisons individuelles, même si dans le cas de RENOVA quelques apports passifs par le sous-sol ont pu être mesurés,
- la puissance évacuée en été par mètre de sonde a été de 15 à 25 W/m, soit 60 W/m de forage, et la température du sol proche des sondes atteint 55 C en fin d'été,
- les pertes du stockage à eau de 11 m³ représentent 35% de l'énergie injectée. Le facteur k de la cuve est de 21 W/K.

En conclusion de ce projet, une maison rénovée peut être autonome du point de vue chaleur grâce au solaire, mais nous n'avons pas de solution de stockage saisonnier pour une villa autre qu'une cuve très isolée de taille importante (1 à 3 m³ par m² de capteur).

b) Stockage diffusif

À l'École d'Ingénieurs de Winterthur (ZHW), le projet de recherche sur la réduction du coût du **stockage souterrain diffusif** et l'analyse des conditions optimales d'une réalisation dans la région de Zürich a été achevé par la publication du rapport final (300 pages) et la réalisation d'une plaquette de 8 pages résumant les résultats de l'optimisation systémique [3]. Cette plaquette doit être distribuée en 2000 dans « Ingénieurs et Architectes suisses » version allemande, dans le but de motiver un groupe d'architectes, d'ingénieurs ou de promoteurs pour une

réalisation que nous recherchons. Les résultats principaux du projet sont les suivants:

1. un stockage saisonnier diffusif n'est envisageable que pour une charge thermique annuelle de 1'000 MWh dans le cas d'une rénovation et de 600 MWh dans le cas d'une construction neuve. Ceci limite singulièrement les cas d'application en Suisse où l'habitat individuel est la règle.
2. Le volume minimal de stock « thermiquement » viable, faiblement isolé artificiellement, est de 5'000 m³, mais il vaudrait mieux viser un stock de 50'000 m³ pour atteindre des efficacités annuelles dépassant 50%, sans recours à une pompe à chaleur.
3. Dans le cas de la rénovation de 135 logements dans la région de Zürich (surface de référence énergétique de 14'000 m²), une couverture solaire de 54% est à recommander. Elle nécessite une surface de 1'800 m², un stock de 8'800 m³ et un stock tampon de 180 m³. Les surcoûts se monteraient à 2.1 millions de frs, soit 15'500 frs par logement.
4. Dans le cas de logements neufs à Zürich (120 appartements, 230 MJ/m² • an), une fraction solaire de 60 à 70 % demanderait 1'650 m² de capteurs, un tampon de 160 m³ et un stock saisonnier de 10'000 m³. L'investissement pour le solaire serait de 1.5 millions de frs, ou 12'500 frs par logement.

Avec la publication de ces résultats, nous espérons voir naître dans les deux ans à venir un projet d'installation solaire avec stockage diffusif capable de couvrir sans pompe à chaleur plus de 50% des besoins d'un ensemble de plus de 100 logements. Il s'agirait d'un premier pilote en Suisse, pour une solution pleine d'avenir qui est techniquement peu risquée si elle est bien étudiée. Nous avons en Suisse le savoir-faire pour une telle réalisation : nous manquent le promoteur et le financement. Le projet de recherche sera poursuivi dans cette voie, pour pouvoir proposer une solution avec différents types de financement dont le contracting énergétique.

À l'aéroport de Zurich, un grand bâtiment nécessitant 350 pieux de fondation sera prochainement construit. Le bâtiment **Dock Midfield** devrait être chauffé et climatisé en utilisant le sous-sol via le concept de pieux échangeurs [5]. Après avoir mesuré la caractéristique thermique de l'échange fluide-sol in situ par un test de réponse, une simulation détaillée de l'installation avec le logiciel PileSim mis au point en 97/98 par le LASSEN-EPFL, a été réalisée. L'installation a pu être optimisée avec les outils de calcul les plus modernes avant la construction. Rappelons que cette méthode, souvent décriée par les ingénieurs ne maîtrisant pas les outils de simulation, a donné des résultats très probants pour le Collège de Peseux, dont l'installation fonctionne comme prévu,

évitant ainsi déception et analyse a posteriori de ce qui aurait dû être fait. Dans le cas de Dock Midfield, en mi-saison, chauffage et refroidissement peuvent alterner dans une même journée rendant l'analyse dynamique absolument nécessaire. La conductibilité thermique du sol a été déterminée par mesure à 1.8 W/m K, les besoins en chaleur ont été estimés à 2'720 MWh/an et ceux de froid à 1'240 MWh/an. PileSim indique que 306 pieux de 26.8 m de long sont nécessaires, pour une injection spécifique de 135 kWh/m an et une extraction de 48 kWh/m an. La pompe à chaleur devrait couvrir 85% des besoins en chaleur, et 90% des besoins en froid devrait être couvert en direct par les pieux. Une analyse de sensibilité a été faite, nécessaire lorsque l'on sait combien difficile est l'évaluation des charges de froid dans un bâtiment complexe. Les résultats sont très précieux pour les ingénieurs chargés de l'exécution, associés à cette recherche dès le début.

PileSim, outil unique pour le calcul des systèmes de pompe à chaleur sur pieux, a été rendu disponible publiquement début 1999 via ENET pour un prix de 500 frs. Le support est assuré par le chercheur principal via Internet. La promotion a été faite dans le cercle des spécialistes sur Internet via email. Elle s'avère insuffisante pour atteindre les chiffres de vente espérés (50 exemplaires vendus en 2 ans).

Le projet **SERSO** consiste à dégivrer en hiver la chaussée d'un pont d'autoroute à Därlingen grâce à la chaleur accumulée dans un stock diffusif de 30'000 m³, chargé en été par un collecteur de 200 m² situé dans la chaussée. L'hiver 98/99 a été particulièrement froid, et pour la première fois depuis 5 cycles, il a été soutiré en hiver 120 MWh, soit plus d'énergie que les 100 MWh injectés durant l'été, ce qui a rééquilibré le bilan des 5 années passées. La charge de l'été 99 a été efficace du fait de la température du stock plus basse (40% de rendement en fonctionnement, 17% sur l'ensemble de l'été). La température du stock évolue entre 10 et 14 C. Le stock peut paraître surdimensionné avec un si faible différentiel de travail. L'installation fonctionne au mieux après divers ajustements faits dans le but de réduire les temps de fonctionnement des circulateurs de charge du stock (600 à 800 heures par an). C'est le HTA Burgdorf qui a effectué le suivi des cycles 4 et 5. La suite de l'exploitation devrait se faire avec un suivi minimum de la part du propriétaire. Nous poursuivons la recherche par l'analyse par simulation comparée aux mesures pour pouvoir effectuer des analyses de sensibilité, notamment autour du volume et donc du coût du stock [6].

L'installation SERSO fonctionne bien grâce à une surveillance active, mais du fait de son coût la technologie peine à trouver un marché (ponts, routes, aéroports, parkings de grands magasins,...). Dans une telle application, le concurrent est le sel, dont le coût direct est cependant faible. Les coûts externes indirects (personnel présent de toute façon, corrosion

des véhicules, pollution des lacs) ne sont malheureusement pas comptabilisés.

c) Stockage en aquifère

Dans une thèse sur la **faisabilité générale du stockage de chaleur en aquifère**, le laboratoire de Géologie de l'EPFL a poursuivi, après l'analyse de l'échec de Saillon, l'étude par simulation des conditions qui permettraient de réaliser des stocks saisonniers en aquifère de taille modeste adaptés aux conditions de la Suisse. Il a été découvert qu'il existe un débit d'injection optimal pour une épaisseur donnée de l'aquifère, que l'accroissement du débit de charge augmente l'efficacité du stockage jusqu'à une limite, que la naissance de la convection naturelle qui peut ruiner le stockage dépend de manière complexe des trois facteurs que sont perméabilité, épaisseur de l'aquifère et débit de charge [4].

Cette étude se terminera en 2000 avec la soutenance de la thèse du chercheur, qui devrait donner les conditions minimales de réussite d'un stock thermique à plus de 30 C en aquifère.

d) Nouveaux matériaux de stockage thermique

Dans une étude prospective bibliographique, le SPF de Rapperswil, centre de recherche solaire suisse, a évalué les possibilités de la **zéolithe** pour le stockage solaire. Il s'agit d'un silicate d'alumine à grande surface spécifique, qui absorbe de la chaleur lors de désorption de vapeur d'eau à 120 C environ.

La décharge a lieu par réabsorption de la vapeur d'eau. Les propriétés thermiques du matériau permettent d'envisager une réduction de volume d'un facteur 3 pour le stockage court terme, voire 4 pour du stockage saisonnier. Le coût pourrait cependant annuler cet avantage.

L'idée de la zéolithe n'est pas nouvelle en Europe, mais n'a encore jamais vraiment abouti pour des raisons qui sont à l'analyse. Le SPF envisage de construire un prototype de laboratoire de taille adaptée au besoin d'une villa, soit en système ouvert avec l'air humide comme caloporteur, soit en système fermé nécessitant le vide.

D'autres matériaux comme le silicagel sont aussi à évaluer, techniquement et économiquement, mais des données scientifiques de comportement en phase d'échange manquent et une recherche adaptée est nécessaire [7].

Coordination et collaboration nationale

La coordination avec les programmes "Géothermie" et "Chaleur de l'environnement" est régulière. Nous avons participé au comité scientifique de la conférence internationale « Géothermie » qui a eu lieu à Bâle en automne 1999.

Nous visitons régulièrement toutes les équipes de recherche et leur rapporterons les progrès nationaux et internationaux.

Nous voulons maintenir la compétence internationale du Dr Pahud en matière de simulations d'installations solaires avec stocks diffusifs et de pompes à chaleur sur pieux échangeur. Ceci nous permet d'être efficace avec des ressources limitées. M. Pahud prendra dès 2000 une charge de cours au Tessin dans le SUPSI.

La collaboration nationale dans les divers projets de stockage est bonne.

Coordination et collaboration internationale

Nous suivons en détail le projet allemand de Neckarsulm (stock diffusif de 5'000 m³, pilote d'un stock de 100'000 m³ à terme, chargé par 10'000 m² de capteurs solaires, pour une fraction solaire de 50% sans pompe à chaleur). Nous aimerions réaliser en Suisse une telle installation qui nous semble être très généralisable à l'avenir. C'est dans cette optique que le développement du projet de Winterthur a été conçu. Il faut désormais concrétiser par une réalisation que nous recherchons.

En ce qui concerne l'AIE, nous suivons, sans participation officielle de la Suisse, le projet intitulé

UTES, *Underground Thermal Energy Storage*. Les réussites récentes concernent les stocks de froid en aquifère dont le développement économique se poursuit dans les pays du Nord de l'Europe et notamment aux Pays-Bas avec plus de 100 réalisations en fonctionnement, avec des temps de retour sur investissement de moins de 5 ans.

D'une manière générale, nos collaborations internationales en matière de stockage sont faibles faute de moyens financiers et de projets très novateurs. Nous espérons que la recherche sur la zéolithe pourra générer à terme un projet AIE.

Transferts à la pratique, Projets P+D

Le programme de recherche « stockage de chaleur » a été orienté vers la pratique, afin de trouver des solutions économiquement viables pour le stockage saisonnier. Cet objectif s'avère impossible à atteindre dans les conditions actuelles de marché de l'énergie chaleur.

Les projets P+D du programme ont été orientés depuis 1991 principalement sur le stockage diffusif, avec pompe à chaleur et recharge estivale pour de grands bâtiments.

Le programme souffre depuis 2 ans de la faiblesse du nombre de grandes constructions neuves en Suisse, et du coût des solutions alternatives.

Au cours de 1999, presque tous les 12 projets pilotes sont arrivés à terme, sauf 2 en retard suite à des mises en service plus difficiles qu'espéré.

Le plus remarquable pilote est l'installation du **Collège de Peseux**, Neuchâtel [9]. Le stock de 29'000 m³ avec ses 30 sondes de 60 m de profondeur fonctionne comme prévu par les simulations faites lors du dimensionnement. Plusieurs publications ont été réalisées en 1999 pour faire connaître le concept et les résultats. Rappelons que la rentabilité économique n'est pas lointaine. Il faudrait un gaz à 6,4 cts/kWh au lieu des 5 actuellement. Le suivi continue en 1999/2000 pour confirmer les conclusions que nous avons

résumées dans notre rapport annuel 1998. L'exemple de Peseux sera peut-être déterminant pour le grand projet de la SUVA à Root, pour lequel le choix doit intervenir en 2000 après 3 ans de discussion et de génération de variantes auxquelles nous avons été associés et nous avons apporté notre savoir-faire.

Le projet pilote de **Wollerau** est terminé. Les mesures détaillées ont été analysées depuis juin 1996. Le rapport final a été publié [8]. Le stock évolue entre 1.5 C et 16 C et fonctionne selon l'attente. Le coefficient de performance annuel de la pompe à chaleur est de 3.9. Les difficultés ont surtout été liées à la mise en service d'une installation complexe. Comme à Peseux, la technologie de stockage de chaleur basse température dans le sous-sol en été, la reprise en hiver par une pompe à chaleur à bonne performance dans une installation fonctionnant en monovalent et l'utilisation estivale en free-cooling est prouvée. Nous utiliserons les mesures dans un modèle de simulation à développer en 2000 pour rechercher l'optimum d'une telle installation. Le coût de l'énergie est difficile à comparer avec du conventionnel, puisque l'on produit du chaud et du froid. Il est d'un ordre de grandeur d'environ 16 à 20 cts/kWh.

Le rapport final concernant l'installation de démonstration de **Buchrain** est disponible.

L'installation sollicite une masse de 200'000 m³ de rocher par 19 sondes en double-U de 40 mm de diamètre, de 200 m de profondeur, espacées de 7.90 m et disposées sur deux rangées distantes de 10 m. Elle chauffe un complexe résidentiel et commercial de 460 kW de demande. Les mesures (novembre 96 à novembre 98) ont montré que 85% de l'énergie annuelle (690 MWh/an) a été fournie par la pompe à chaleur de 250 kW condenseur avec un coefficient annuel de performance de 2.71. Ce résultat, obtenu après diverses améliorations (2.13 durant le premier hiver de mesures), est à la limite inférieure de la prévision, du fait des températures de départ plus élevées que prévues (50 à 62 C) et de la pompe de 4 kW du stock qui a fonctionné toute l'année pour absorber les 100 kW de rejet des réfrigérateurs alimentaires. Cette pompe devrait être équipée en 2000 d'un dispositif de variation de fréquence. La pompe à chaleur a un COP mesuré de 3.3 dans les conditions standards (circuit évaporateur à 6/3 C, condenseur à 50/40 C). La chaleur produite en été par l'installation frigorifique du centre commercial Migros-Tschannland (130 kW de froid) a été absorbée en totalité par le stockage en rocher, régénérant ainsi le stock en été. Les 3'600 m de forage (14'500 m de tubes échangeur) constituant le stock ont absorbé 96 kWh/m en recharge (max. 20 W/m) et fourni 114 kWh/m en décharge (max. 50 W/m). Il n'a pas été possible d'utiliser le stock en free cooling, sa température ne descendant jamais sous la limite de 12 C. Les températures de fluide caloporteur ont évolué entre 7 C en février 97 et 17 C en août 98. Le coût de l'énergie fournie (chaleur + froid) a été d'environ 6 cts/kWh, en ne considérant que l'électricité (en moyenne 16 cts/kWh) et le mazout (5.9 cts/kWh) consommés, sans les amortissements.

Le pilote réalisé et mesuré est conforme à l'attente et fonctionne à satisfaction du maître de l'ouvrage. Il est prouvé que le stockage saisonnier diffusif de grande taille peut jouer le rôle d'encaisseur d'énergie issue du refroidissement en été et de fournisseur de chaleur en hiver. Il fonctionne également comme stock tampon journalier lorsque les besoins de froid industriel persistent toute l'année comme à Buchrain [13].

Le projet pilote du bâtiment de la Caisse d'assurances cantonales de Lucerne, **Buchenhof**, à Aarau comporte 20 sondes de 120 m. Une fuite dans le circuit de liaison entre le stock et la chaufferie, détectée tardivement, n'a pas permis une mise en service complète du stock avant juin 1999, avec un an de retard. La présence d'une chaudière de sécurité capable de tout assumer en hiver n'est de ce point de vue pas favorable pour forcer une réparation rapide. La première charge du stock en été 1999 a permis d'injecter 457 MWh entre 25 et 31 C, issus du refroidissement du bâtiment (2 x 337 kW). Les mesures se poursuivront en 2000 pour obtenir au moins un cycle complet [15].

Le projet pilote de la **Hochschule St. Gallen** comporte un groupe de sondes délimitant un stock de 20'000 m³, utilisé en hiver par une pompe à chaleur et régénéré en été par les rejets de climatisation de l'école. Après

injonction, le bureau d'études a finalement répondu à nos demandes. La mise en service de l'installation a été très difficile, avec un système centralisé de commande dont la programmation n'avait pas été terminée par le fournisseur. Après 2 ans de retard dans la mise en service, les premiers résultats montrent que le stock n'est pas totalement rechargé en été du fait d'une médiocre performance de la machine en groupe de froid, qui pourrait être due à des valeurs de consigne incorrectes. La pompe à chaleur a un COP mensuel moyen de 2.3 en hiver et de 1.2 en été ! En 1999, l'appoint a fourni deux fois plus que prévu, 180 MWh soit 52% de la demande en chaleur. Les mesures doivent se poursuivre en 2000 [10].

Les deux bâtiments au standard MINERGIE du projet **Plan-Léman**, de 20 appartements ont été réalisés à Renens (7'800 m³ chauffés, 40 kW max., 14 W/m² de plancher). Leur particularité est d'avoir une dalle active de type BATISO de l'ex société Geilinger, qui peut jouer le rôle de stock actif pour une installation solaire. Il s'agit d'un cas d'étude concret mais théorique, le propriétaire étant hésitant pour le choix final du solaire. A terme, les bâtiments pourraient s'insérer dans un ensemble plus large, qui pourraient être connectés à un stock diffusif central. Le LASER EPFL évalue par simulation avec TRNSYS les possibilités optimales. Un modèle dynamique de bâtiment (Type 56) a été utilisé. La demande d'énergie chauffage est de 90 MJ/m² an, ce qui laisse 70 MJ/m² an pour l'eau chaude sanitaire pour satisfaire Minergie. Une installation solaire sera nécessaire pour rester Minergie.

Les simulations indiquent que des absorbeurs solaires, non vitrés, connectés à la dalle active sont économiquement intéressants pour des fractions solaires annuelles inférieures à 30%. Au delà, des capteurs vitrés (investissement de 500 CHF/m² contre 250 pour les absorbeurs) sont nécessaires pour atteindre 60%, qui est la limite de couverture que l'on peut réaliser avec un stock par dalle active dans un climat comme celui de Renens. Le coût du solaire augmente très fortement et dépasse 40 cts/kWh, si l'on cherche à faire plus de 30% solaire. Avec un chauffage de sol, moins inerte qu'une dalle, on réaliserait un système appelé « PSD » ou plancher solaire direct, et la limite serait encore plus basse (20% solaire sans autre type de stockage). La dalle active a donc un avantage sérieux par rapport au chauffage de sol, outre qu'elle peut permettre un refroidissement agréable en été [16].

Après trois ans d'avant-projet, la **SUVA** est en passe de choisir une solution avec stockage saisonnier proche du concept du collège de Pesex pour son grand projet de **Root** (LU). Compte tenu de la jeunesse de la technique et donc de la méconnaissance par les ingénieurs des méthodes de dimensionnement dynamique qui sont absolument nécessaires pour un projet fiable, nous avons soutenu les travaux de simulations prévisionnelles faits par le spécialiste suisse pour trouver un système optimal. Les travaux ont été réalisés en deux temps comme pour Dock Midfield. Deux tests de réponse sur deux sondes de 160 m réalisées sur le futur site ont été

conduits par les géologues et analysés numériquement pour déterminer les caractéristiques thermiques du sol. Les résultats donnent 3.0 W/mK pour la conductibilité thermique du terrain et 0.1 K/(W/m) pour la résistance thermique effective des sondes. Puis le logiciel PileSim a été utilisé pour déterminer le stock idéal satisfaisant les demandes en chaleur et en froid prévues par les ingénieurs de projet. Les résultats conduisent à 49 sondes de 160 m de profondeur, espacées de 6.5 m, connectées en parallèle. Il n'est pas recommandé de tenter de gérer deux zones dans le stock, l'une froide à l'extérieur et l'autre chaude au centre, comme certains ingénieurs le proposent. Ceci complique inutilement la gestion du stock. L'expérience nous a appris que les charges de froid estimées en avant-projet sont bien supérieures à la réalité, ce qui limitera la recharge du stock en été. Il a donc été recommandé de recourir à plus de 900 m² d'absorbeurs solaires pour recharger le stock dans toutes les hypothèses. Un concept de système a été suggéré parmi 3 variantes et dimensionné [14].

Les projets précédents concernaient des bâtiments collectifs. Au cours du programme 96-99, des projets pilotes de stockage en habitat individuel ont été testés. SOLERI s'est terminé en 98, RENOVA en 99, deux autres installations n'ont pas encore donné des résultats probants, Les Brenêts et Epalinges.

L'installation **des Brenêts** comporte un stock saisonnier sous forme de 50 fûts de récupération de 200 l remplis d'eau. La charge doit être assurée par 80 m² de capteurs à air. La couverture transparente de la façade solaire, qui était devenue non transparente, devait être changée depuis 1997. Après analyse détaillée de divers matériaux anti-reflets, le propriétaire a opté pour le polycarbonate Chairmat en 2mm. Ce n'est qu'en novembre 99 que la nouvelle façade a pu être opérationnelle, le retard étant occasionné par la difficulté d'obtenir une décision de la commune et par la foudre qui a endommagé l'ordinateur de mesure et de commande. Ce projet est en auto-construction avec des moyens limités, et les résultats ne sont plus attendus avant 2000. Ils seront cependant médiocres au vu de ce qui a déjà été testé [12].

Un stock diffusif constitué de 7 forages de 70 m pour une villa familiale à **Épalinges** est chargé de 36 m² de capteurs solaires. Ce projet en test depuis 3 cycles n'a pas donné de résultat probant quant au stock saisonnier, dont les pertes thermiques sont importantes et la charge estivale insuffisante. Le rapport annuel 99 n'a toutefois pas été reçu [11].

Évaluation 1999

La recherche sur les configurations optimales de stockage solaire diffusif a livré ses résultats. Il faut désormais concrétiser par des réalisations, mais nous avons peu de prise sur le marché.

Les outils de simulation que nous avons à disposition sont désormais de bonne qualité et permettent d'envisager un projet à prévision fiable, permettant d'emporter les dernières hésitations des promoteurs. Deux études pilotes ont été financées dans cet esprit : Dock Midfield à Kloten et Suva à Root. Nous pensons que ceci est une bonne stratégie pour diffuser les connaissances tout en réalisant des pilotes.

La recherche concernant les nouveaux matériaux de stockage solaire court terme (zéolithe) a débuté. Il y a un certain espoir, mais la complexité par rapport à un stock à eau semble un obstacle majeur.

En ce qui concerne les projets pilotes, on confirme que les stocks diffusifs de grande taille exploités avec des pompes à chaleur et une recharge estivale sont une technologie opérationnelle sans problème spécifique. Reste le problème du coût de l'énergie d'un facteur 1,5 plus élevé que les solutions conventionnelles en chauffage. Cependant en combinaison chaud et froid pour des bâtiments nécessitant du refroidissement, la technologie apparaît concurrentielle.

Les nouveaux projets sont depuis 1998 très peu nombreux, résultant d'une part de la faiblesse du secteur du bâtiment et, d'autre part, d'un certain rejet de solutions vues comme trop complexes par manque d'information et de conviction des maîtres de grands ouvrages.

Le stockage souterrain à l'échelon de la villa n'est pas faisable et son étude sera abandonnée.

Perspectives 2000

Une nouvelle orientation du Programme pour 2000-2003 a été préparée en 1999 et acceptée par la CORE.

Nous recherchons un projet de stockage solaire diffusif sans pompe à chaleur de plus de 600 MWh. Les méthodes de financement seront évaluées par le Prof. Juzi à Winterthur pour compléter le dossier

« installation solaire optimale avec stockage diffusif » et convaincre des promoteurs.

Nous utiliserons les données des mesures de SERSO et Wollerau pour simuler ces installations, valider le modèle et effectuer des variations paramétriques. Nous sommes convaincus qu'une expérience pilote est d'autant plus enrichissante que l'on utilise les mesures

par des simulations pour mieux comprendre ce qui s'est passé et ce que l'on pourrait améliorer dans l'optique de réduire le coût tout en augmentant performances et fiabilité. C'est un principe méthodologique scientifique que nous défendons avec succès depuis 20 ans.

Le stockage en aquifère sera abandonné comme thème de recherche, peu porteur car trop complexe à maîtriser compte tenu du coût actuel bas de l'énergie chaleur. Seuls des projets réels avec climatisation active par aquifère pourraient nous faire changer d'avis.

Le travail de recherche sera plus orienté vers le stockage solaire court terme au SPF Rapperswil, dans le but de réduire le coût spécifique ou/et le volume de stockage. Un prototype de 1 m³ avec la zéolithe devrait être construit.

Le projet de la SUVA à Root devrait être démarré en 2000 et mobilisera des moyens financiers importants compte tenu de la taille du projet pilote.

Liste des projets de recherche

- [1] P. Jaboyedoff, SORANE, Lausanne: *Mesures et calcul des pertes de chaleur de la cuve de stockage de l'installation solaire de l'OfS à Neuchâtel* (RF révisé décembre 1999)
- [2] B. Lachal, CUEPE, Genève: *RENOVA: Installation solaire active avec injection de chaleur en sous-sol* (RA) <http://www.unige.ch/cuepe/rapport/>
- [3] H. Juzi, TWI, Winterthur: *Saisonale Speicherung von Sonnenenergie im Erdboden zur Wärmeversorgung von grösseren Überbauungen* (RF)
- [4] S. Dupasquier, EPFL-Lausanne: *Faisabilité du stockage de chaleur en aquifère en Suisse* (RA)
- [5] D. Pahud, A. Fromentin, EPFL-Lausanne, M. Hubbuch, Zürich: *Heat Exchanger Pile System of the Dock Midfield at the Flughafen Zürich Airport. Detailed Simulation und Optimisation of the installation* (RF)
- [6] J. Mechter, HTA, Burgdorf: *SERSO, Sonnenenergie rückgewinnung aus Strassenoberflächen, Messkampagne und Simulation des saisonalen Erdspeichers* (RA) <http://www.hta-bu.bfh.ch>
- [7] P. Gantenbein, U.Frei, SPF- HS Rapperswil: *Zeolithspeicher in der Solartechnik: Machbarkeit und Potential* (RA)

(RA) Rapport annuel disponible

(RF) Rapport final disponible

Liste des projets P+D

- [8] C. Kapp, NEK UMWELTTECHNIK, Zurich: *Erdwärmesondenfeld (Heizen- Kühlen- Speichern) für den Produktions-Neubau Meister + Co., Wollerau SZ* (RF)
- [9] B. Matthey, BMIC, Montezillon: *Installation solaire pour le collège des Coteaux à Peseux avec stockage saisonnier par sondes verticales et pompe à chaleur à gaz - Optimisation*
- [10] H. SCHÄR, St Gallen: *Erdspeicheranlage für das Weiterbildungszentrum Hochschule St. Gallen* (RA)
- [11] F. Fleury, Epalinges: *Villa solaire avec stockage saisonnier en molasse*
- [12] P. Léchaire, Les Brenêts: *Maison solaire avec stockage saisonnier central chauffé par capteurs à air* (RA)
- [13] M. Morath, C. Kapp, NEK UMWELTTECHNIK, Buchrain: *EWS-Anlage Tschannland, Buchrain* (RF)
- [14] D. Pahud, EPFL-LASEN, Lausanne: *Simulation thermique du stockage de chaleur diffusif des bâtiments de la SUVA à Lucerne* (RA)
- [15] S. Wiederkehr, JOBST WILLERS ENGINEERING, Rheinfelden: *Verwaltungsgebäude Buchenhof, Aarau. Messkampagne des saisonales Erdspeichers* (RA)
- [16] D. Pahud, EPFL-Lausanne: *Optimisation d'un stockage de chaleur en dalle active* (RA).