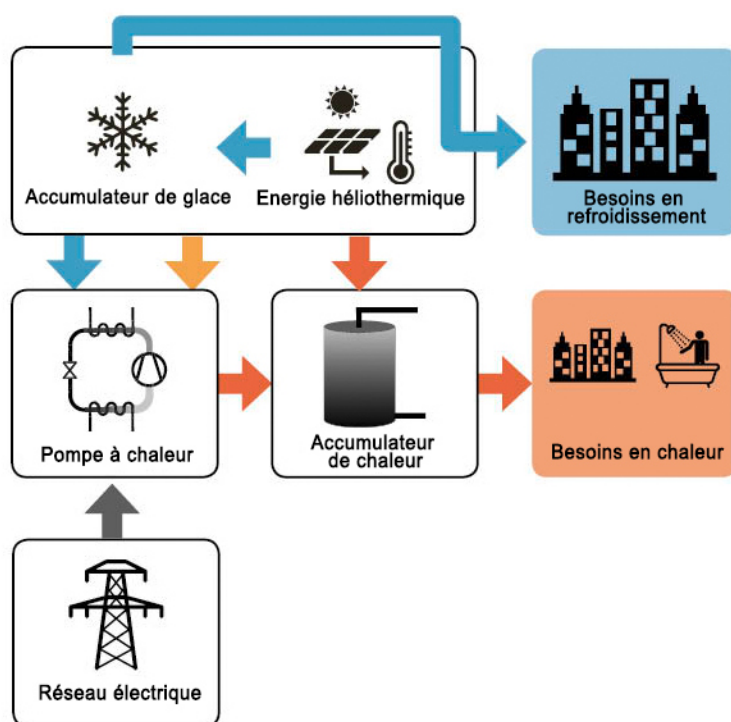


ÉNERGIE À PARTIR DU SOLEIL ET DE LA GLACE

Le transfert de la chaleur estivale en hiver est une tâche majeure pour un système d'approvisionnement en énergie renouvelable. Les systèmes solaire-glace constituent une technologie prometteuse: les collecteurs solaires régénèrent la glace formée par une pompe à chaleur de chauffage. Avec cette utilisation, le rendement énergétique des collecteurs en été et en hiver est nettement plus élevé que celui des installations solaires traditionnelles. Une équipe de chercheurs de la Haute école spécialisée de Suisse orientale a étudié dans quels cas les systèmes solaire-glace fonctionnent particulièrement efficacement dans les immeubles. En outre, l'équipe a développé un algorithme en tant que base pour un futur outil de dimensionnement en ligne. Avec cet outil, les maîtres d'œuvre devraient être en mesure d'estimer si l'intégration d'un système solaire-glace est judicieuse dans une phase de planification précoce.



Représentation schématique d'un système de glace solaire pour la production de chauffage et d'eau chaude, mais aussi de froid pour couvrir les besoins de refroidissement. Illustration: Rapport final Big-Ice

Au cours des 20 dernières années, les pompes à chaleur sont devenues le système de chauffage le plus apprécié en Suisse. Les pompes à chaleur fournissent de la chaleur de chauffage et de l'eau chaude avec un minimum d'énergie électrique. Pour cela, ils utilisent la chaleur de l'air ambiant, de la terre ou, si ces sources de chaleur courantes ne peuvent pas être utilisées, des collecteurs solaires. Depuis quelques années, des systèmes pompes à chaleur-collecteur solaire sont dotés d'un accumulateur de glace en vue d'augmenter l'efficacité globale. Un accumulateur de glace n'est autre qu'un conteneur en béton rempli d'eau dans lequel la chaleur sensible et latente peut être stockée et de nouveau extraite en cas de besoin. Les systèmes solaire-glace ont le potentiel de stocker de grandes quantités de chaleur en été et en hiver afin d'utiliser la chaleur pour le chauffage par le biais d'une pompe à chaleur. En été, les systèmes solaire-glace sont plus efficaces que les pompes à chaleur géothermiques grâce à la chaleur sensible et en hiver, ils sont plus efficaces que les pompes à chaleur air-eau grâce à la chaleur latente.

L'utilisation de systèmes solaire-glace dans des maisons individuelles est relativement coûteuse. « Nous voyons le potentiel concret de ce système de production de chaleur dans les

CHALEUR SENSIBLE/LATENTE

La chaleur « sensible » désigne la chaleur qui modifie la température d'une substance (par ex. réchauffe l'eau de 0 à 10 °C). Elle se distingue de la chaleur « latente »: il s'agit de la chaleur nécessaire pour transformer une glace à 0 degré en une eau à 0°. L'utilisation de la chaleur latente est l'élément clé de l'accumulateur de glace: faire fondre de la glace demande 80 fois plus d'énergie que faire chauffer l'eau d'un degré. A l'inverse, cette énergie est disponible sous forme de chaleur latente pour la pompe à chaleur lorsque l'eau gèle.

Si un accumulateur de glace est « rempli » de chaleur, l'eau a une température pouvant atteindre 30 °C. Lors de la « décharge » de la chaleur de l'accumulateur, la chaleur sensible est extraite en premier lieu (l'eau refroidit), puis la chaleur latente (l'eau à 0 degré gèle). Selon l'état de l'accumulateur, de la chaleur latente est alimentée dans l'accumulateur lors de la « charge » (la glace fond) ou de la chaleur sensible (la température de l'eau augmente). BV.



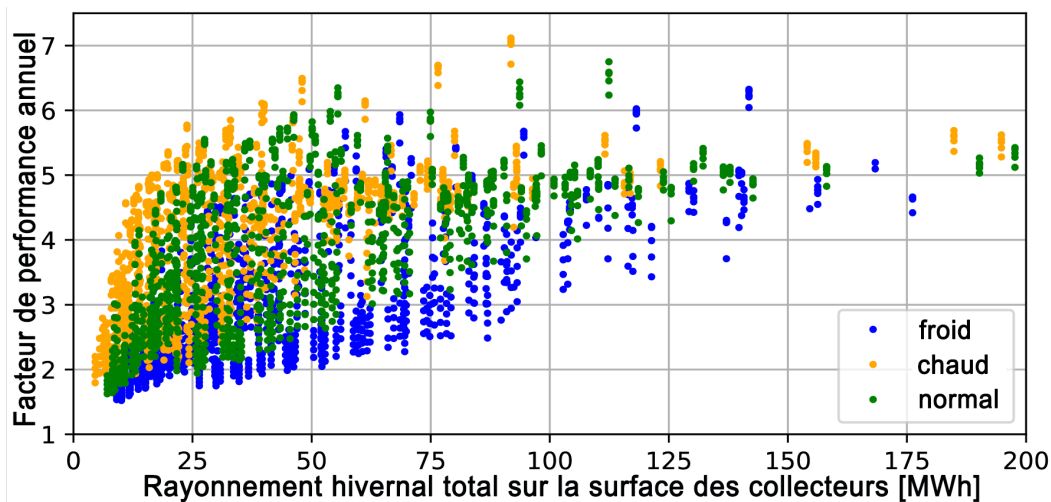
L'équipe du projet Big Ice (de gauche à droite): Dr Daniel Carbonell, Dr Martin Neugebauer, Maïke Schubert. Photos : privée

immeubles. Dans leur cas, la construction d'un accumulateur de glace est rentable », affirme le Dr Daniel Carbonell, responsable « Systèmes thermiques et modélisation » à l'Institut de technique solaire (SPF) de la Haute école de Suisse orientale (OST). Avec une équipe de chercheurs de l'OST, l'expert en énergie solaire a étudié la performance des systèmes solaire-glace dans des immeubles. Le projet de recherche nommé « Big Ice » a été soutenu par l'Office fédéral de l'énergie.

Outil logiciel pour la clarification de la faisabilité

Les résultats de l'étude constituent la base pour le développement d'un outil logiciel pour les maîtres d'ouvrage. Cet outil leur permettra à l'avenir, avec leurs planificateurs, d'évaluer rapidement et facilement si l'installation d'un système solaire-glace est prometteuse en cas de nouvelle construction ou dans le cadre de la rénovation d'un immeuble. « Un algorithme rapide, basé sur l'apprentissage automatique et capable de prévoir l'efficacité des systèmes solaire-glace avec peu de données, a été développé », stipule le rapport final du projet Big Ice. Ce faisant, il convient de noter que l'outil évalue la faisabilité d'un système solaire-glace. Cependant, il n'est pas conçu pour la planification concrète d'une installation.

Les données d'entrée utilisées par l'outil logiciel sont en premier lieu les besoins annuels en chaleur du bâtiment (chauffage et eau chaude) et le rayonnement solaire sur l'emplacement du bâtiment. A ce sujet, l'équipe des auteurs ajoutent dans le rapport final du projet Big Ice: « Il a été démontré que l'intégration des données météorologiques annuelles et les besoins en chauffage du bâtiment permettait de prédire l'efficacité avec une précision de 10%. Si les besoins en chauffage et le rayonnement solaire pendant les mois d'hiver sont également pris en compte comme paramètres d'entrée, la



Chaque point correspond à une simulation réalisée au SPF de Rapperswil. Le graphique montre la grande influence des données météorologiques sur le comportement de l'accumulateur de glace. Graphique: Rapport final Big-Ice

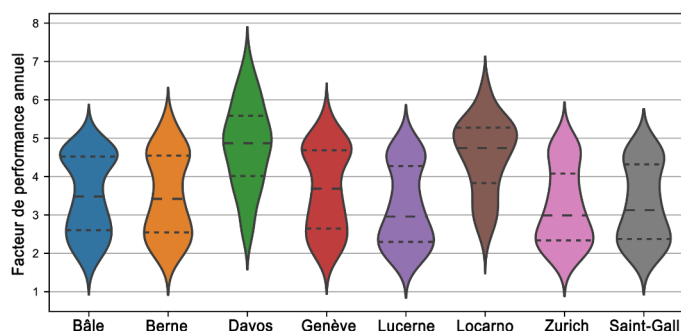
précision peut passer à 5%. » Une précision de 10% (ou 5%) signifie que 90% des données comportent une erreur de 10% (ou 5%) ou moins.

3600 simulations

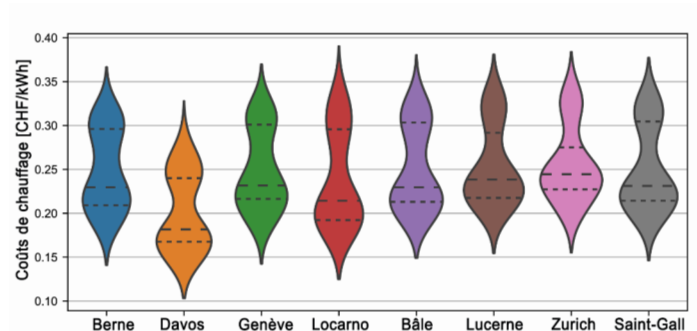
Cette « formule Accumulateur de glace » généralement applicable est le résultat pratique d'une étude de base approfondie dans laquelle les chercheurs de l'OST ont étudié les facteurs qui influencent l'efficacité des systèmes solaire-glace. Cette étude s'est basée sur deux maisons de six familles (bâtiment neuf avec des besoins en chauffage et en eau chaude d'environ 30 kWh/m², bâtiment existant rénové avec 100 kWh/m² à Zurich) et deux types d'utilisateurs (comportement idéal d'un point de vue énergétique ou comportement réellement observé). Cette étude leur a permis de déduire quatre profils de besoins en chaleur. En même temps, les

données météorologiques de huit villes suisses pour une année chaude, une année froide et une année moyenne ont été utilisées. A l'aide du logiciel TRNSYS, un total de 3600 simulations ont été effectuées, chacune d'entre elles calculant l'efficacité et les besoins en électricité avec lesquelles les besoins en chaleur respectifs peuvent être couverts avec un système de glace solaire. La surface maximale du champ de capteurs solaires a été limitée à 350 m², ce qui correspond à la surface réellement disponible de l'immeuble modélisé.

Un enseignement majeur: dans toutes les constellations étudiées, les systèmes solaire-glace sont en mesure de couvrir les besoins en chaleur avec une bonne efficacité système (également: facteur de performance annuel/COP) de 3.5 à 4.5, dans des conditions météorologiques moyennes. En cas de températures extérieures plus basses, l'efficacité peut baisser



Le graphique montre la distribution de l'efficacité du système (COP) pour huit villes suisses pour toutes les simulations effectuées. En cas de temps normal et chaud, une efficacité de plus de 3.5 est réalisable pour toutes les villes. L'objectif est de toujours concevoir des systèmes réels pour un facteur de performance annuel de 4 dans des conditions météorologiques normales.



Répartition des coûts de production de chaleur par ville (pour toutes les simulations réalisées). Pour comparer: le système de pompe à chaleur géothermique, auquel les chercheurs ont recouru, en tant que système de référence, a des coûts de production de chaleur de 15 à 19 ct/kWh. Graphiques : rapport final de l'OFEN du projet Big-Ice

RECOMMANDATIONS POUR LA POSE DE SYSTÈMES SOLAIRE-GLACE

Les chercheurs et chercheuses impliqués dans le projet Big Ice ont résumé leurs découvertes dans des recommandations pour les planificateurs de systèmes solaire-glace. Celles-ci sont reproduites ici dans une forme simplifiée:

- 1) Pour être exploité de manière économique et avec une efficacité du système (COP d'environ 4, l'accumulateur de glace devrait avoir un volume de $0.32 \text{ m}^3_{\text{lat}}/\text{MWh}$ à $0.48 \text{ m}^3_{\text{lat}}/\text{MWh}$. Le champ de collecteurs correspondant devrait avoir une taille de $1.5 \text{ m}^2/\text{MWh}$ à $2.5 \text{ m}^2/\text{MWh}$. Sur la base d'un immeuble (bâtiment existant rénové) comprenant six appartements et des besoins en chaleur typique de 140 MWh par an, l'accumulateur de glace serait de $44.8 \text{ m}^3_{\text{lat}}$ à $67.2 \text{ m}^3_{\text{lat}}$ (ce qui correspond à accumulateur de glace d'un volume de 56 m^3 à 84 m^3) et un champ de collecteurs de 210 m^2 à 350 m^2 (en supposant que l'accumulateur de glace peut geler jusqu'à un maximum de 80%).
- 2) La taille de l'accumulateur de glace et la surface des collecteurs doivent se baser sur les besoins en chaleur hivernaux dans la mesure où les besoins hivernaux jouent un rôle central dans l'efficacité du système.
- 3) Pour éviter un surdimensionnement, le système solaire-glace ne doit pas être conçu pour le pire des cas, mais pour des conditions météorologiques moyennes sur une plus longue période (par exemple une décennie).
- 4) L'utilisation directe de la chaleur solaire dans l'évaporateur de la pompe à chaleur est recommandée, sauf si des fluides différents sont utilisés dans le circuit du collecteur et dans celui de l'évaporateur.
- 5) L'utilisation directe de la chaleur solaire dans le réservoir à eau chaude est recommandée si les collecteurs fournissent des températures élevées (comme dans le cas des collecteurs non couverts).
- 6) En arrêtant la fonte de l'accumulateur de glace au printemps, l'énergie de refroidissement peut être transférée aux mois chauds en été. Avec ce mode de fonctionnement « Nice-to-have », il est possible d'augmenter l'efficacité globale du système d'accumulateur de glace de 2 à 5%. Selon les calculs des chercheurs de l'OST, en règle générale, kWh/m³_{lat} sont disponibles sous forme de free-cooling (refroidissement passif).

Dans leurs travaux, l'équipe de recherche de l'OST fournit également une formule qui peut être utilisée pour estimer, en première approximation, les performances d'un système solaire-glace avec relativement peu d'informations. BV

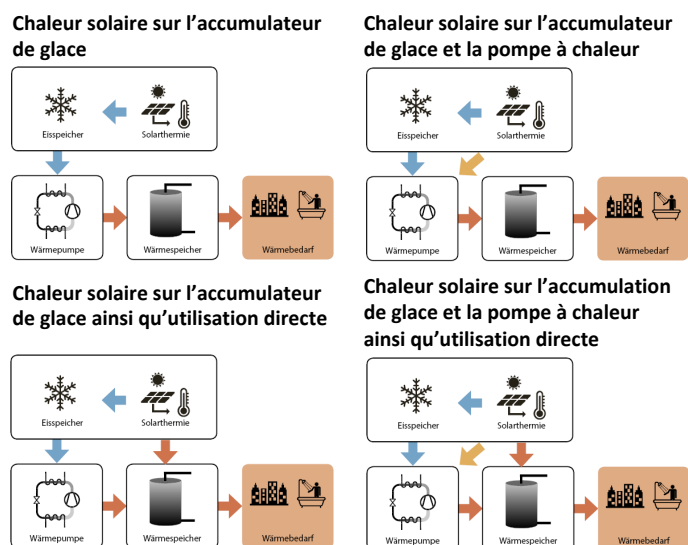
jusqu'à 25% et, comme avec les chauffages traditionnels, les dépenses énergétiques augmentent en circonstance. Ce problème pourrait être évité grâce à un accumulateur plus grand, mais les auteurs du projet Big Ice déconseillent de concevoir les systèmes pour « le pire des scénarios impliquant temps froid et un faible rayonnement solaire », car cela conduirait à « des systèmes surdimensionnés et non optimaux d'un point de vue économique » (cette recommandation, et d'autres, destinées aux planificateurs de systèmes solaire-glace sont résumées dans l'encadré).

Pas systématiquement plus cher

Les systèmes solaire-glace se composent d'une pompe à chaleur, d'un champ de collecteurs et d'un collecteur de glace. Ils sont ainsi plus complexes et ont tendance à être plus chers que les systèmes de chauffage avec pompes à chaleur géothermiques qui exploitent la chaleur de la terre. Selon les calculs de l'OST, les coûts pour la production de chaleur pour un

bâtiment rénové s'élèvent de 17 à 24 ct/kWh, pour une nouvelle construction de 19 à 34 ct/kWh (en fonction du lieu, de la météo et du comportement des utilisateurs). « Dans certains cas, le système solaire-glace est compétitif avec un système de pompe à chaleur géothermique, mais dans la plupart des cas, ce dernier est moins cher sans régénération du sol. Toutefois, si une régénération doit être ajoutée au système de pompe à chaleur géothermique, le système solaire-glace sera probablement la solution la plus économique », constate le rapport final du projet Big Ice.

Le système solaire-glace peut être utilisé pour le refroidissement en été. Pour ce faire, la fonte de l'accumulateur est stoppée au printemps afin de sauver le froid restant dans l'accumulateur de glace en été: « Cette option Free-Cooling passive n'entraîne pas d'augmentation des besoins en électricité dans les systèmes solaire-glace bien dimensionnés dans les régions à faibles besoins en refroidissement, comme Ge-

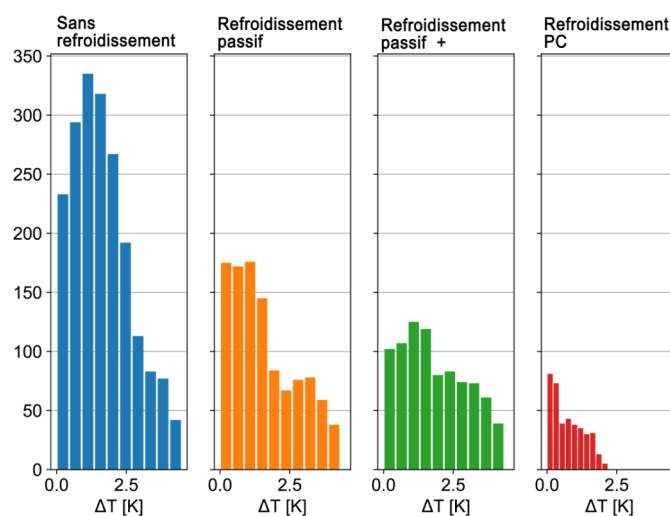


Quatre types pour l'intégration des systèmes de glace solaire les flèches bleues montrent les flux de chaleur à basse température (< 10 °C), les flèches rouges les flux de chaleur à plus haute température (> 30 °C). Les deux systèmes de droite sont les plus répandus. Le système en bas à droite utilise des collecteurs sélectifs qui fournissent l'eau chaude directement. Ce système constitue également la base de l'étude Big Ice car les calculs ont toujours été effectués avec des collecteurs sélectifs non couverts. Ces collecteurs sont plus chers mais permettent également une plus grande efficacité du système. Graphique: Rapport final Big-Ice

nève », indique le rapport final. Dans les régions présentant des besoins en refroidissement plus élevés, par ex. Locarno, il est possible de produire une capacité de refroidissement supplémentaire. Pour cela, l'eau chaude n'est pas fournie par les capteurs en été, mais par la pompe à chaleur qui refroidit l'accumulateur de glace. « Ce faisant, l'efficacité du système ne baisse pas lorsque le chauffage et le refroidissement sont pris en considération », soulignent les auteurs du rapport final de l'OFEN. Le recours à l'accumulateur de glace à des fins de refroidissement a toutefois ses limites: pour les bâtiments avec des besoins en refroidissement élevés, tels que les bâtiments administratifs, les systèmes solaire-glace ne sont pas adaptés en raison de la taille nécessaire de l'accumulateur.

➤ Le **rapport final** du projet de recherche « Big Ice – Assessment of solar-ice systems for multi-family buildings » est disponible sur: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=41467>

➤ Dr Daniel Carbonell (dani.carbonell@lost.ch), scientifique à l'Institut de technique solaire de la Haute école spécialisée de Suisse orientale, et Stephan A. Mathez



Représentation des heures par an avec une température ambiante supérieure à 26° avec l'application de différentes stratégies de refroidissement. Le refroidissement passif (ou: «Free-Cooling») signifie: les collecteurs solaires ne régénèrent plus le stock de glace à partir du printemps afin qu'il puisse «sauver» le plus de «froid» possible pendant les mois estivaux. Le refroidissement passif+ signifie: refroidissement passif mais les parois de l'accumulateur de glace sont isolées. Cela présente l'avantage que la chaleur ambiante du sol ne fait pas fondre l'accumulateur de glace, mais en même temps l'efficacité du système (COP) diminue légèrement. Le refroidissement par pompe à chaleur signifie: en été, l'eau chaude n'est pas puisée via les collecteurs, mais dans l'accumulateur de la glace, ce qui permet d'extraire la chaleur de l'accumulateur de glace. Cette approche augmente le potentiel de refroidissement de l'accumulateur de glace, mais doit accepter une altération de l'efficacité du système (COP). Graphique: Rapport final Big-Ice

(stephan.a.mathez@solarcampus.ch), responsable externe du programme de recherche de l'OFEN Chaleur solaire et stockage, communiquent des **informations** sur le projet.

➤ Vous trouverez d'autres **articles spécialisés** concernant les projets de recherche, les projets pilotes et de démonstration ainsi que les projets phares dans le domaine de la chaleur solaire et stockage de la chaleur sur www.bfe.admin.ch/ec-solaire