

UN COULIS DE GLACE POUR STOCKER L'ÉNERGIE

Les accumulateurs de glace ont un grand potentiel pour la mise à disposition ou le stockage intermédiaire de chaleur et de froid. Ils peuvent être utilisés dans les bâtiments résidentiels, mais aussi dans l'industrie à des fins de refroidissement et de chauffage. Pour que les accumulateurs de glace soient davantage utilisés, ils doivent être moins chers et plus flexibles. C'est dans ce but que des chercheurs de la Ostschweizer Fachhochschule (OST) travaillent sur un nouveau concept de stockage qui utilise le changement de phase de l'eau et stocke la glace sous forme de « slurry », une sorte de coulis de glace.



Dans le cadre du projet SlurryStore, ce prototype de stockage de coulis de glace a été développé à l'OST de Rapperswil: le cristalliseur à droite, le réservoir d'accumulateur à gauche. Le supercooler est reconnaissable au centre: la partie bleue et grise montée horizontalement entre les tubes noirs isolés. Photo: OST

Le potentiel de stockage énergétique des accumulateurs de glace repose sur la chaleur latente libérée lors du changement de phase de l'eau en glace. Les accumulateurs utilisés aujourd'hui se composent d'un réservoir d'eau traversé par un tube d'échangeur de chaleur de manière homogène. Dans ce tube circule un mélange d'eau et d'antigel capable d'extraire la chaleur de l'accumulateur en cas de basses températures ou même de températures légèrement inférieures au point de congélation. La chaleur générée par la pompe à chaleur peut être utilisée pour chauffage ou l'eau chaude. L'extraction de la chaleur entraîne la formation d'une couche de glace en constante augmentation à la surface des tubes de l'échangeur de chaleur. Dès que de la chaleur – provenant par exemple de capteurs solaires – est apportée par l'échangeur de chaleur, la glace fond dans l'accumulateur de glace. Cependant, les accumulateurs de glace ne peuvent pas être utilisés uniquement comme source de chaleur: tant qu'ils contiennent de la glace, ils peuvent également être utilisés pour fournir du froid.

La structure des accumulateurs de glace conventionnels est d'une simplicité déconcertante puisqu'ils ne comportent aucune pièce mobile. En revanche, la construction des tubes de l'échangeur de chaleur est coûteuse. De plus, la couche de glace qui se développe à la surface des tubes de l'échangeur de chaleur agit comme un isolant thermique: elle inhibe le transfert de chaleur ou de froid entre l'antigel et l'ac-



Le coulis de glace circule dans le réservoir de l'accumulateur. Photo: OST

umulateur, ce qui réduit l'efficacité de ce dernier. Une équipe de scientifiques de la OST (Haute école spécialisée de Suisse orientale) souhaite éliminer ces inconvénients en utilisant un slurry à changement de phase. Dans ce cas, le slurry désigne un mélange d'eau et de cristaux de glace d'environ 0,5 à 1 cm. Dans le cas de l'accumulateur slurry, l'extraction de chaleur ne provoque pas la formation de glace solide mais de ce mélange.

L'eau surfondue se transforme en coulis de glace

Les accumulateurs à coulis de glace ont une structure différente de celle des accumulateurs de glace traditionnels. Les

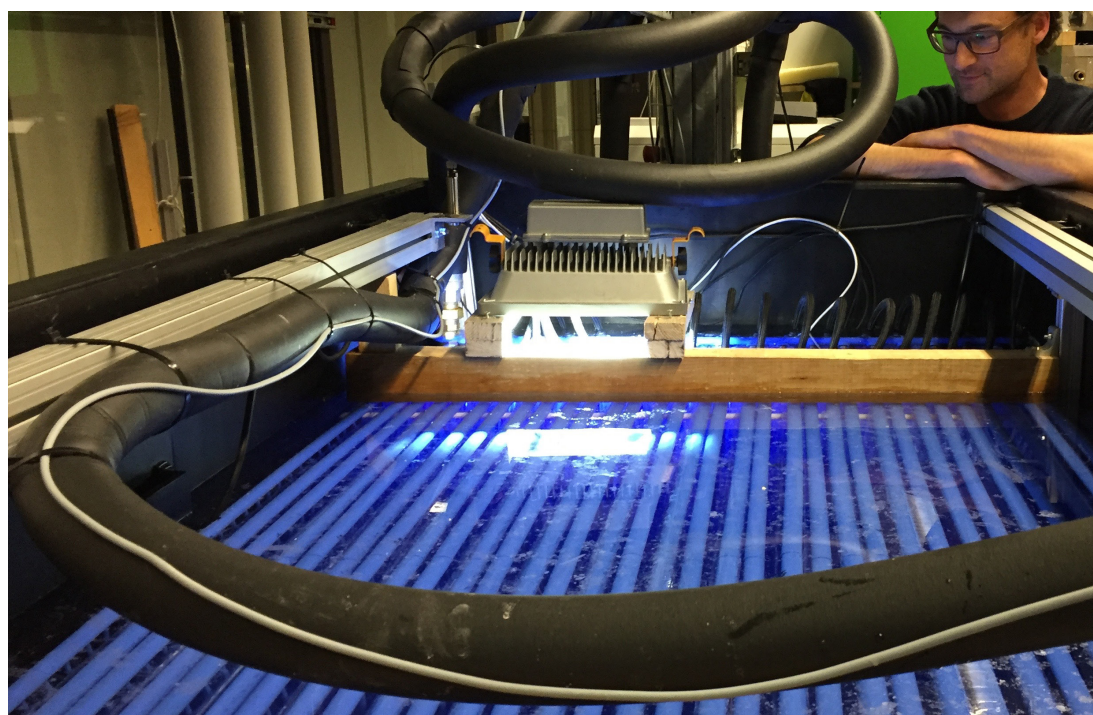
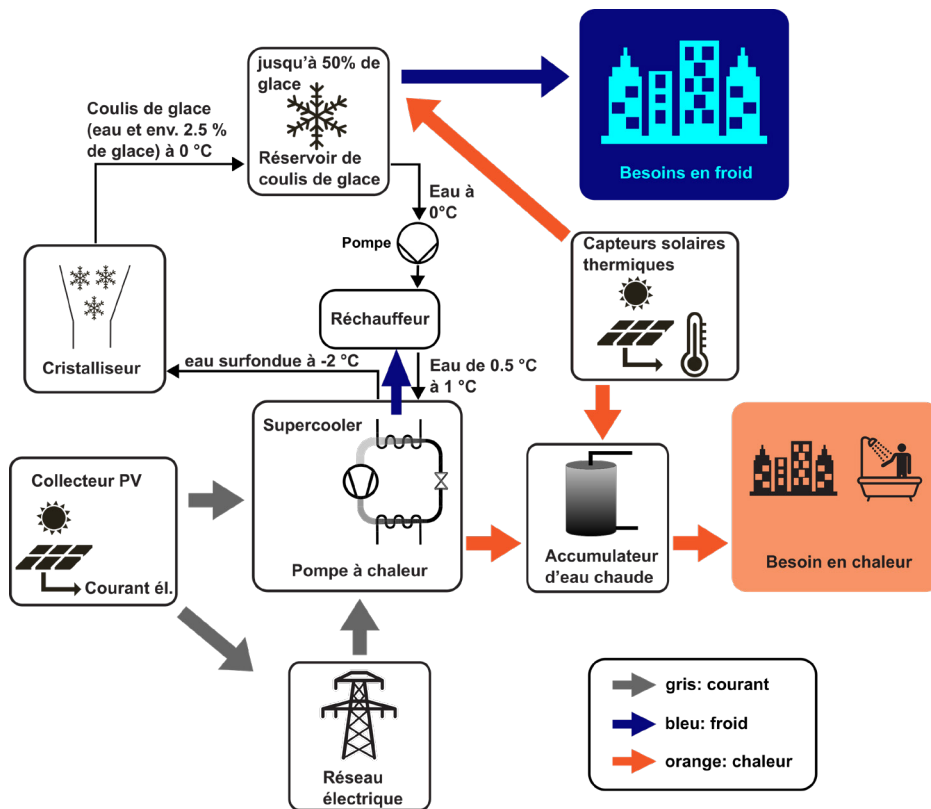


Photo d'un accumulateur de glace traditionnel prise lors d'un précédent essai au laboratoire SPF de Rapperswil. Sous l'eau, on voit les tubes de l'échangeur de chaleur sur lesquels se forme une couche de glace lors de l'extraction de la chaleur. Photo: B. Vogel



L'accumulateur à coulis de glace se compose a) d'un réservoir de stockage de coulis de glace, b) d'une pompe pour le transport de l'eau liquide surfondue et du coulis de glace produit ensuite, c) d'un réchauffeur, d) d'un échangeur de chaleur de surfusion (« supercooler ») qui, dans le cas d'application, peut être l'évaporateur d'une pompe à chaleur, et e) d'un cristalliseur basé sur le flux qui est responsable de la transformation de l'eau surfondue en un coulis de glace fluidisé. Illustration: A.-K. Thamm/OST

SOUS-REFROIDISSEMENT

Le changement de phase de l'eau en glace s'effectue généralement à 0°C. Pour que la glace puisse se former, des germes sont indispensables, c'est-à-dire un point de départ approprié sur lequel les cristaux de glace peuvent se développer. En l'absence de tels germes, l'eau peut rester liquide même en cas de températures négatives. Elle est alors « surfondue » (ou « sursaturée »). Cet état physique peut être reproduit dans certaines circonstances dans un congélateur domestique: pour ce faire, une bouteille d'eau très pure contenant le moins de minéraux possible est refroidie au congélateur jusqu'à une température inférieure à 0°C, sans qu'elle ne gèle. Si on sort délicatement la bouteille du congélateur et qu'on la secoue ou la tape sur la table, des cristaux de glace se forment dans le liquide. Le même phénomène est à la base de la fabrication de la populaire barbotine. Dans l'expérience ci-dessus, la formation de glace est déclenchée par le processus d'agitation/de tapotement. Dans le cristalliseur de l'accumulateur à coulis de glace, la formation de glace est initialement déclenchée par des ondes ultrasoniques et renforcée par un mélange habile.

Plus l'eau est surfondue par le retrait de la chaleur, plus la quantité de glace produite ultérieurement lors de la cristallisation est importante. En refroidissant le même volume d'eau à -4°C au lieu de -2°C, il est possible de produire deux fois plus de glace. Si l'on refroidissait un litre d'eau à -80°C, toute l'eau se transformerait en glace, tandis qu'un refroidissement de -4°C permettrait de transformer environ 1/20 du contenu en glace (en supposant la chaleur sensible de l'eau à 0°C).

La puissance d'un cristalliseur (mesurée en watts) indique la quantité d'énergie transformée lors du passage de l'eau surfondue à la glace. Ce chiffre est un indicateur important de la qualité du cristalliseur. Dans la première version du cristalliseur de l'OST, il fallait injecter de l'eau chaude (0,3°C) pour qu'il fonctionne, ce qui réduisait la puissance du cristalliseur. Le dernier cristalliseur ne nécessite pas l'ajout d'eau « chaude »; il fonctionne par conséquent avec un rendement plus élevé.

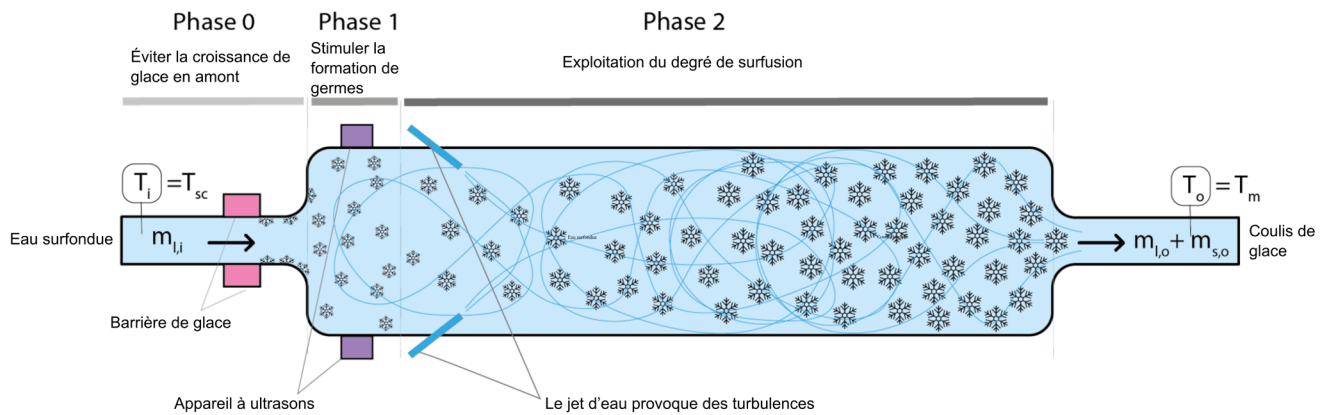


Schéma d'un cristalliseur développé à l'OST. L'eau surfondue entre par la gauche et est stimulée par la cavitation (produite par un appareil à ultrasons) pour former des germes, ce qui entraîne la formation de cristaux de glace. Ceux-ci se fixent sur les parois et servent de germes de nucléation pour un processus de cristallisation continu. En aval du flux, les particules de glace grossissent et sont emportées dès qu'elles atteignent une certaine taille. Afin d'accélérer la croissance de la glace et de briser les morceaux, de l'eau à 0,3 gramme est injectée dans le prototype du cristalliseur. Le jet d'eau stabilise le système mais coûte de l'énergie. Une barrière d'eau chaude veille à ce que les cristaux de glace ne remontent pas en amont et ne gèlent pas le supercooler. Dans le prototype fonctionnant avec de l'eau surfondue à -2°C , le cristalliseur transforme moins de 3% de l'eau entrante en cristaux de glace en un seul passage. Si l'accumulateur à coulis de glace est exploité en continu, il est en principe possible de produire des quantités quelconques de coulis de glace et de les accumuler dans un réservoir de stockage aux dimensions appropriées, lequel peut théoriquement être chargé à 50% de glace. Illustration: OST

scientifiques de l'Institut de technologie solaire SPF de l'OST travaillent sur un concept depuis bientôt dix ans. En 2017, un groupe dirigé par Daniel Carbonell a présenté une étude de faisabilité. Dans le cadre des projets SlurryStore (2020 à 2023) et ModIceCrys (2022 à 2027) financés par l'OFEN, l'accumulateur à coulis de glace a fait ou fait l'objet de recherches expérimentales et de modélisation numérique. En 2023, le scientifique de l'OST Ignacio Gurruchaga a estimé que le potentiel de réduction des coûts (CAPEX) du nouvel accumulateur à coulis de glace, lorsqu'il est intégré à un système d'énergie solaire, était de 14 à 17% (sur la base du site de Zurich; par rapport à un système d'accumulateur de glace solaire conventionnel).

Les principaux composants sont un supercooler, un cristalliseur et un réservoir de stockage (voir figure p. 3): le supercooler (ou échangeur de chaleur de surfusion) prélève la chaleur de l'eau entrante et la refroidit jusqu'à -2°C . L'eau est alors « surfondue », c'est-à-dire qu'elle reste liquide bien que sa température soit inférieure au point de congélation. L'eau surfondue s'écoule dans un cristalliseur qui la transforme en un coulis de glace à 0 degré (ici, une partie de l'eau effectue le changement de phase en glace, sans émission ou absorption de chaleur de l'environnement). Le coulis de glace peut ensuite être stocké dans un réservoir isolé thermiquement, où il peut être retransformé en eau – par exemple par l'apport de chaleur solaire.

Prototype d'accumulateur à coulis de glace

La construction d'un réservoir à coulis de glace présente un certain nombre de défis techniques. Dans le projet SlurryStore, l'équipe de l'OST a atteint plusieurs objectifs qui constituent des étapes intermédiaires vers un accumulateur entièrement fonctionnel: un premier cristalliseur produisant un coulis de glace pendant 24 heures d'une masse totale de 70kg dans un processus continu a été construit. Sa puissance (l'énergie de refroidissement stockée dans l'eau surfondue) s'élevait à 560 watts, son efficacité à 60%. De cette manière, le réservoir pouvait être rempli avec jusqu'à 12% de coulis de glace. L'objectif de 50% fixé pour le projet n'a pas été atteint – notamment en raison des performances insuffisantes du cristalliseur et de l'apparition d'obstructions dus à la croissance de la glace lors du remplissage du réservoir de l'accumulateur. La responsable de projet Ann-Katrin Thamm dresse néanmoins un bilan positif: « Avec le prototype du projet SlurryStore, nous avons pu démontrer avec succès le principe d'un accumulateur à coulis de glace, la charge continue de l'accumulateur (givrage) tout comme la décharge de l'accumulateur (dégivrage) ».

Depuis la fin de SlurryStore, l'accumulateur a encore été optimisée. L'amélioration du comportement de mélange dans le cristalliseur, qui favorise la formation de cristaux de glace (Jet-Mixer), a permis d'augmenter la puissance à 1,7 kW et l'efficacité à 77%. Dans le cadre du projet ModIceCrys actu-

ellement en cours, un cristalliseur basé sur un nouveau principe de fonctionnement est en cours de développement sur la base de modélisations numériques, ce qui devrait permettre de faire évoluer l'accumulateur à coulis de glace à un niveau supérieur en termes de performance. La puissance doit être augmentée à 10 ou 20 kW dans les prochaines étapes. Les applications dans le secteur résidentiel nécessitent des puissances de 50 à 100 kW, tandis que les solutions de refroidissement industriel requièrent 100 kW et plus. Des recherches sont également nécessaires sur le réservoir de l'accumulateur : Celui-ci doit être conçu de telle sorte que les cristaux de glace (solides) soient séparés de l'eau (liquide) avant que cette dernière ne soit pompée dans le supercooler. En effet, aucun cristal de glace ne doit pénétrer dans le supercooler. Dans le cas contraire, l'eau surfondue se cristalliserait immédiatement (encore dans le supercooler) en glace. Les chercheurs de l'OST veulent relever les différents défis, notamment en choisissant un design et des matériaux appropriés.

Une nouvelle génération d'accumulateurs de glace

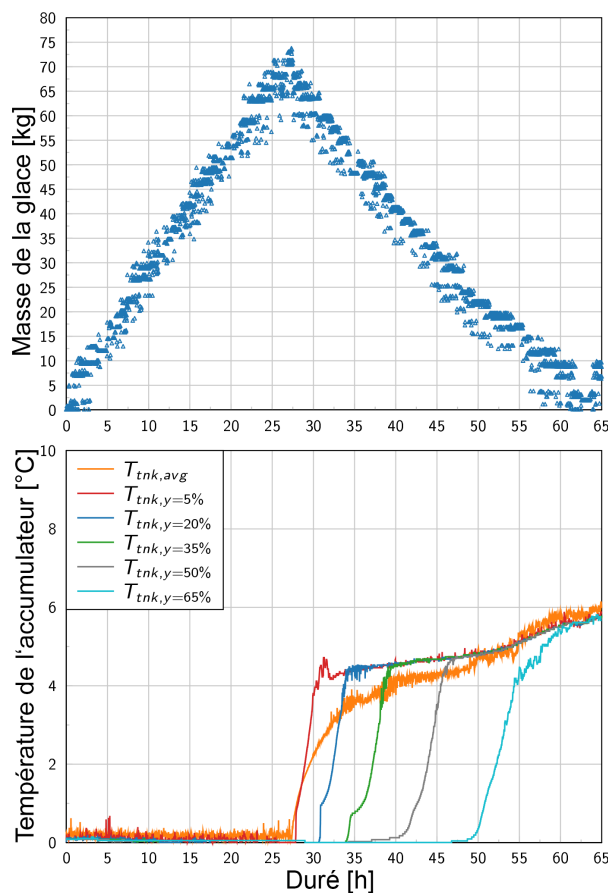
Ann-Katrin Thamm envisage l'avenir avec optimisme: « Nous espérons pouvoir construire un accumulateur de glace en état de marche dans les trois ou quatre prochaines années. Grâce à ses coûts d'investissement plus faibles, il serait supérieur aux accumulateurs de glace avec tubes d'échange de chaleur actuellement utilisés et pourrait les remplacer à moyen terme ». Son collègue de l'OST Ignacio Gurruchaga, qui travaille sur le projet du coulis de glace, voit un autre avantage dans le fait que le réservoir de l'accumulateur puisse être placé n'importe où dans une maison, ce qui le rendrait très flexible. Le coulis de glace peut être distribué par le biais de canalisations, souligne Gurruchaga. Cela pourrait permettre de mettre en place de nouvelles solutions de chauffage et de refroidissement dans les réseaux de surface.

➤ Le rapport final du projet « **Slurry Store** – Experimental and numerical investigations of ice slurry storages » est disponible sur:

<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=47202>.

Les travaux en cours sur le projet « CFD Modélisation numérique et analyse expérimentale des cristalliseurs de glace pour les écoulements surfondus » (**ModIceCrys**) sont documentés sur:

<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=51652>.



Les deux graphiques montrent la formation de glace (en haut) et l'évolution de la température (en bas) dans le réservoir de stockage au cours d'un essai de 65 heures. Pendant les 28 premières heures, l'accumulateur a été chargé avec du coulis de glace à 0 degré; par la suite, la quantité de glace dans l'accumulateur a augmenté et la température est restée à 0°C. À partir de la 28e heure, l'accumulateur a été déchargé en lui fournissant de la chaleur (dans un accumulateur réel, il s'agirait typiquement de chaleur solaire). La chaleur est amenée dans l'accumulateur par le bas; cela a pour effet de faire fondre la glace dans l'accumulateur, et ce de bas en haut. La ligne rouge montre l'évolution de la chaleur tout en bas de l'accumulateur, la ligne bleu clair l'évolution de la chaleur tout en haut. Graphique: OST

➤ Stephan A. Mathez (stephan.mathez@bfe.admin.ch), responsable externe du programme de recherche de l'OFEN chaleur solaire et stockage de la chaleur, communique 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.