

BRIDGESIM: outil de simulation pour le dégivrage de pont par énergie solaire

Daniel Pahud, ISAAC-DACD-SUPSI, 6952 Canobbio (daniel.pahud@supsi.ch)

Zusammenfassung

Das Serso-Projekt ist entstanden aus der Idee eine Brücke mit Hilfe der Solarwärme zum entfrosten. Es resultiert in einem Konzept basiert auf der saisonalen Speicherung der Wärmeenergie im Erdreich. Die im Sommer von der Brücke akkumulierte Solarenergie, und mit Hilfe von Erdwärmesonden im Boden gespeicherte Energie, wird im Winter zur Enteisung der Brücke weitergenutzt. In der Brückenfahrbahn verlegte Register dienen im Sommer zur Einsammlung der Solargewinne und im Winter zur Beheizung der Fahrbahn um die Bildung von Eis oder Frost zu vermeiden. Abgesehen von der elektrischen Energie, die für die Umwälzpumpen benötigt wird, ist das System so konzipiert, dass es keine zusätzliche Energie beansprucht.

Die im Rahmen eines Vorgängerprojektes über mehrere Jahre durchgeführte Messungen der thermischen Systemleistung, haben es ermöglicht ein neues Simulationstool zur Dimensionierung solcher Systeme zu entwickeln und zu validieren. Das BRIDGESIM genannte Programm, ermöglicht es so über die praktische Erfahrung hinauszugehen.

Das System wurden für verschiedene Standorte simuliert. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die erforderliche Erdwärmesondenlänge nicht nur stark von der Erdwärmeleitfähigkeit abhängt, sondern auch von der zur Enteisung der Brücke benötigten Heizenergie. In einigen Fällen wurde keine Lösung gefunden, da die Gesamtlänge bei weitem zu groß wäre.

Résumé

Le projet Serso est né de l'idée de vouloir dégivrer un pont avec de l'énergie solaire. Il en résulte un concept qui met en œuvre un stockage saisonnier de chaleur dans le terrain. L'énergie solaire est captée par le pont en été, stockée dans le terrain par l'intermédiaire d'un ensemble de sondes géothermiques, puis restituée en hiver pour le dégivrage du pont. Le pont est équipé de serpentins qui permettent de collecter les gains solaires estivaux et de chauffer la chaussée en hiver pour empêcher la formation de glace ou de givre. A l'exception de l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des pompes, le système est conçu pour fonctionner sans énergie auxiliaire.

Les mesures des performances thermiques de l'installation sur plusieurs années, effectuées dans le cadre d'un projet précédent, ont permis de développer et de valider un outil de simulation pour le dimensionnement d'un système semblable. Appelé BRIDGESIM, il permet d'aller au-delà de l'expérience pratique réalisée.

Le système est simulé pour divers sites. Les résultats ont montré que la longueur de sonde nécessaire dépend non seulement très fortement de la conductivité thermique du terrain, mais aussi de la demande spécifique de chauffage pour le dégivrage du pont. Dans certains cas aucune solution n'a été trouvée, car la longueur de sonde devrait être beaucoup trop élevée.

1. Introduction

Le projet pilote et de démonstration Serso est né de l'idée de vouloir dégivrer un pont avec de l'énergie solaire. Il en résulte un concept qui met en œuvre un stockage saisonnier de chaleur dans le terrain. L'énergie solaire est captée par le pont en été, stockée dans le terrain par l'intermédiaire d'un ensemble de sondes géothermiques, puis restituée en hiver pour le dégivrage du pont. Le pont est équipé de serpentins qui permettent de collecter les gains solaires estivaux et de chauffer la chaussée en hiver pour empêcher la formation de glace ou de givre. A l'exception de l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des pompes, le système est conçu pour fonctionner sans énergie auxiliaire.

2. Objectif

L'objectif principal de l'outil de simulation BRIDGESIM est de pouvoir simuler et optimiser une installation du même type que celle de Serso, de manière à aller au-delà de l'expérience gagnée par la réalisation pratique du projet et par les mesures effectuées pendant plusieurs années de fonctionnement.

BRIDGESIM est un modèle thermique de simulation dynamique de l'installation, incluant le comportement thermique de la chaussée du pont [1]. Il a été développé et calibré sur deux années de mesures du système réel. Il a ensuite été utilisé pour évaluer le potentiel et les limites de telles installations ainsi que pour établir des règles simplifiées pour un pré-dimensionnement [2].

BRIDGESIM a été créé pour mettre à la disposition des professionnels un outil de calcul facile à utiliser pour le dimensionnement d'une installation fonctionnant selon le même concept.

3. L'outil de simulation BRIDGESIM

Le modèle de simulation a été créé avec TRNSYS 16.1 [3]. Il utilise le type non standard TRNVDSTP [4] pour la simulation du stockage saisonnier de chaleur dans le terrain et le type TYPE56 pour la simulation thermique du pont. Les pertes thermiques de la chaussée vers l'environnement sont calculées par convection vers l'air ambiant et par radiation vers le ciel. Une température radiative équivalente est calculée pour le ciel, qui se base sur le degré de nébulosité de ce dernier. L'effet du vent, des précipitations et de la neige ne sont pas pris en considération dans le modèle.

Les paramètres relatifs au pont sont élaborés avec la version de démonstration de TRNBuild [5]. Elle est suffisante pour générer un fichier d'entrée pour BRIDGESIM. Les données météorologiques, quant à elles, sont produites avec le programme METEONORM [6]. Contrairement à la version démo de TRNBuild, METEONORM n'est pas inclus dans le paquet BRIDGESIM.

BRIDGESIM est une application TRNSED de TRNSYS, ce qui ne nécessite pas d'avoir une connaissance préalable de TRNSYS.

Le schéma de principe simulé par BRIDGESIM est montré dans la figure 1. Il est équivalent à celui du système de Serso. Il permet de contrôler la température de départ dans le pont en période de dégivrage et d'inverser le sens de circulation du fluide dans les sondes géothermiques entre l'injection et l'extraction de chaleur.

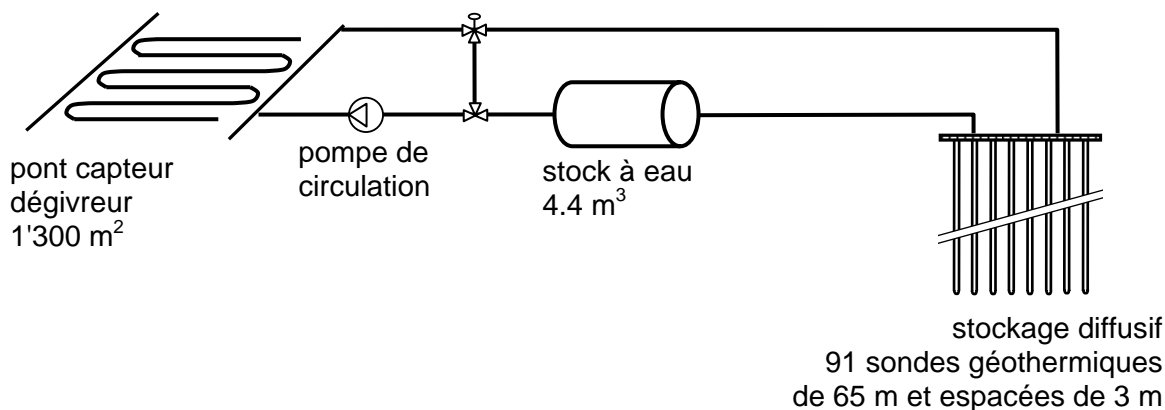


Figure 1 : Schéma de principe simplifié et taille des composants formant le système de Serso

L'utilisation du modèle requiert une courbe de chauffage pour le pont qui soit adaptée à ses caractéristiques et au site. En d'autre terme, en admettant que la source de chaleur puisse fournir la puissance thermique nécessaire demandée, la température de consigne du fluide qui circule dans la chaussée du pont doit permettre de maintenir la température de surface de la chaussée hors gel tout en dispersant le moins possible de chaleur dans l'environnement. Une version simplifiée de BRIDGESIM a été créée pour permettre de déterminer la meilleure courbe de chauffage pour un système donné. Elle a été dénommée BRIDGEHEAT. Son utilisation est illustrée dans la section suivante.

4. Détermination de la courbe de chauffage avec BRIDGEHEAT

BRIDGEHEAT, version simplifiée de BRIDGESIM, ne nécessite que les paramètres liés au pont, à la météo et à la courbe de chauffage. Il permet, pour une courbe de chauffage définie par l'utilisateur, de calculer l'énergie thermique délivrée dans le pont et de simuler l'évolution horaire de la température de surface de la chaussée pour une saison de chauffage type.

Il s'agit de maintenir la température de surface de la chaussée supérieure à 0°C, et ceci également quand la température de l'air ambiant descend en dessous de 0°C. Toutefois lorsque la température de l'air ambiant devient très basse, la formation de givre ou de glace sur la chaussée n'est plus à craindre. Ainsi, il est permis d'avoir une température de surface du pont inférieure à 0°C lorsque la température de l'air extérieur est inférieure à -4°C.

Néanmoins le système ne peut pas garantir en tout temps le critère de température défini pour la chaussée sans devoir injecter une puissance thermique importante et à un niveau de température élevé. Un compromis doit être trouvé. Afin de pouvoir chauffer le pont à la température la plus basse possible, il est nécessaire d'accepter que de temps en temps la température de surface du pont passe légèrement en dessous de 0°C. Un seuil de tolérance doit être accepté, basé sur un critère qui permette de mesurer « combien » le système s'écarte de la prestation de base qu'il doit satisfaire. Le non respect du critère de température est « mesuré » avec des degrés-heures annuels définis par la relation 1.

$$NT_s = \int_{t=0}^{t=1\text{an}} (0 - T_s) dt \quad \text{si } T_s < 0^\circ\text{C} \text{ et si } T_{\text{air}} > -4^\circ\text{C} \quad (1)$$

T_s est la température de surface de la chaussée du pont et T_{air} la température de l'air extérieur.

NTs est la somme des degré-heures annuels de la différence entre 0°C et Ts lorsque cette dernière est négative et lorsque la température de l'air extérieur est supérieure à -4°C. NTs est une mesure du non respect du critère de température fixé pour la surface du pont. Cette mesure intègre aussi bien l'écart de température à la température de référence (0°C) que sa durée d'occurrence. Elle est mesurée en Kelvin heure par an [Kh/a].

La courbe de chauffage doit être choisie pour avoir NTs quasiment nul tout en maintenant l'énergie de chauffage annuelle aussi basse que possible. Il s'agit de déterminer par itérations successives les paramètres de la courbe montrée dans la figure 2.

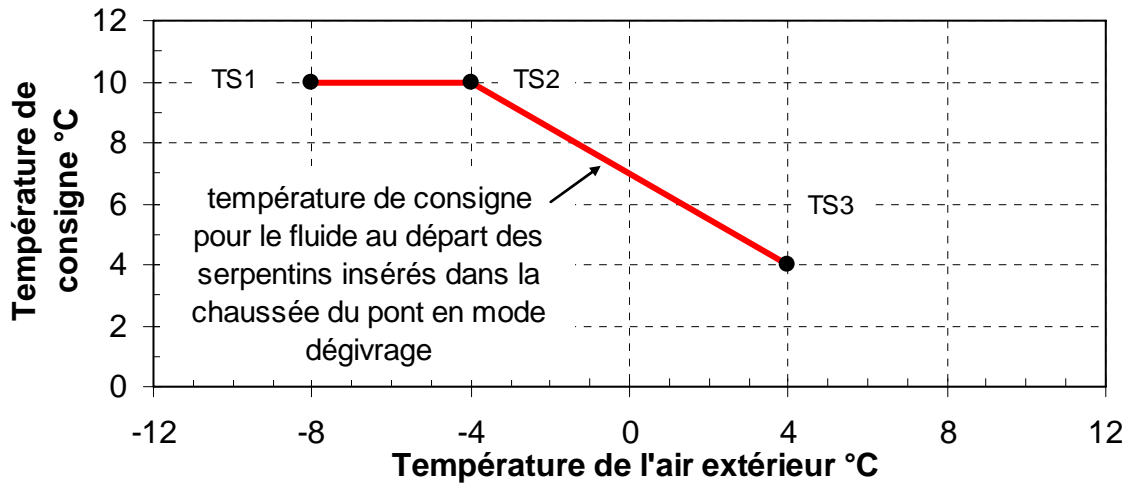


Figure 2 : Courbe de chauffage pour le dégivrage du pont

La figure 3 permet de montrer la température de surface du pont simulée avec une courbe de chauffage optimisée dont l'écart au critère de température est calculé à 3 Kh/a.

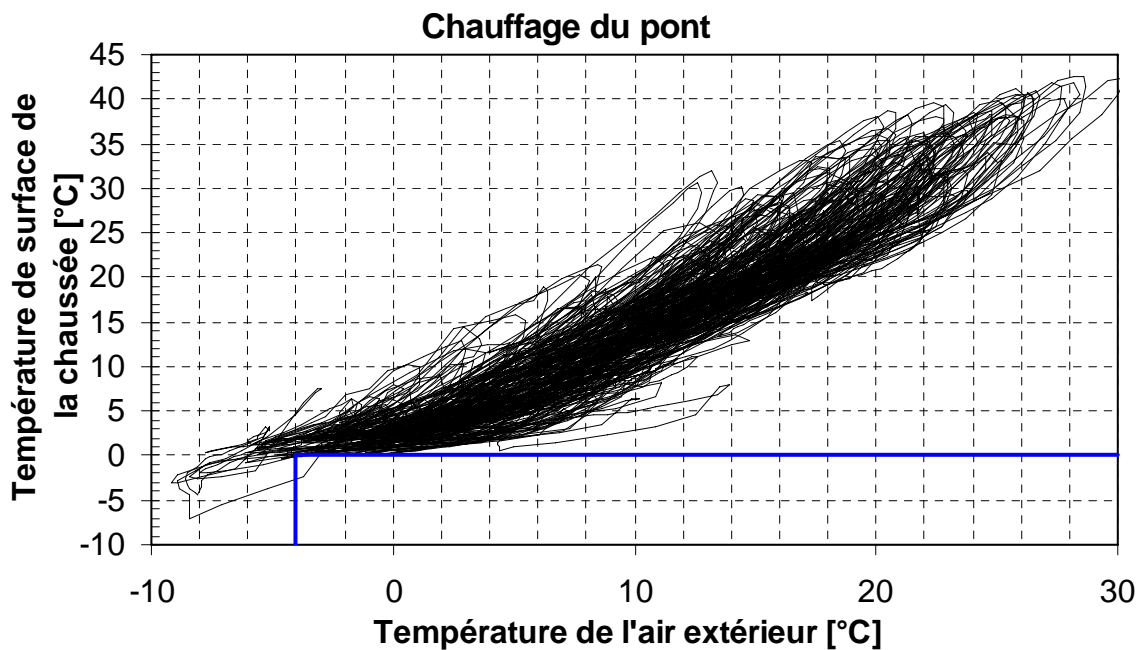


Figure 3 : Température de surface du pont en fonction de la température extérieure avec effet du chauffage pour éviter le givrage du pont

5. Optimisation d'un système et concept de tolérance

La détermination de la courbe de chauffage ne permet pas de satisfaire à 100% le critère de température défini pour la surface de la chaussée. Ceci est inévitable si l'énergie thermique injectée dans le pont ne doit pas être disproportionnellement élevée et distribuée à trop haute température.

Il en va de même pour l'optimisation du système. Il s'agit de dimensionner le champ de sondes géothermiques afin que le critère de température soit satisfait compte tenu d'une certaine tolérance. Cette tolérance sera forcément plus importante que celle adoptée pour l'établissement de la courbe de chauffage. En d'autres termes, il s'agit de dimensionner un stockage de chaleur saisonnier dans le terrain avec le moins possible de sondes géothermiques, et ceci tout en satisfaisant le critère de température et la tolérance associée.

Il est important de souligner que le concept de tolérance est fondamental pour ce type de système. Il n'y a pas de production de chaleur auxiliaire pour compenser une carence d'énergie thermique dans le stock saisonnier. Le dimensionnement est également fait pour une année météorologique moyenne type, et donc satisfait à une tolérance moyenne. D'une année à l'autre les conditions météorologiques varient. S'il fallait dimensionner le système pour une tolérance « zéro », il faudrait à la fois choisir une année météo extrême et sur-dimensionner le système pour ces conditions météo.

Plus la longueur des forages est augmentée, moins la diminution du critère de température NTs devient important. Pour les cas étudiés, le critère de température **NTs** a été défini avec une valeur limite de **10 Kh/a**. Pour un pont dans un lieu donné, un système est considéré comme étant l'optimum s'il peut satisfaire le critère de température avec la longueur la plus courte possible de sondes géothermiques.

Dans la figure 4, NTs est montré en fonction de la longueur totale de sondes géothermiques (i.e. leur nombre) pour le cas du système de Serso (surface de pont à dégivrer : 1'300 m²). Un stockage de 40 sondes de 150m de profondeur avec un espacement de 5 m permet de satisfaire une tolérance de 10 Kh/a.

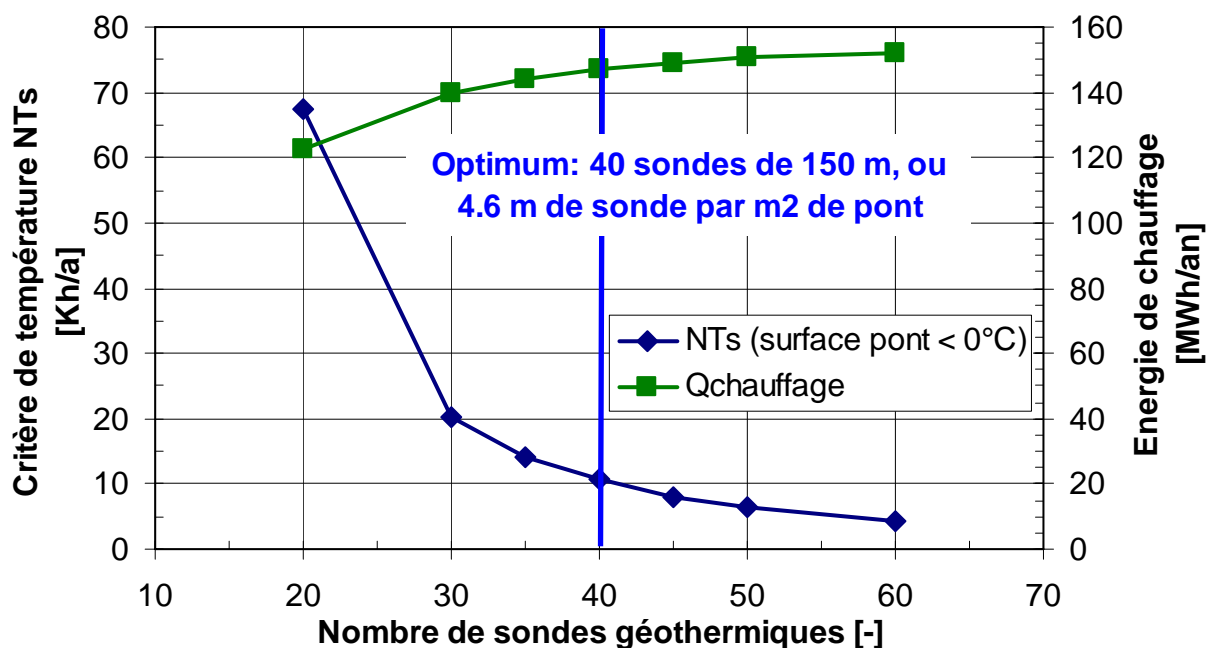


Figure 4 : Sensibilité du critère de température (NTs) et de l'énergie thermique annuelle injectée dans le pont (Qchauffage) à la longueur des sondes. Leur nombre est varié tout en maintenant leur profondeur à 150 m et un espacement de 5 m

Chaque paramètre de dimensionnement du système peut ainsi être varié jusqu'à ce qu'un optimum soit obtenu.

6. Résultats des simulations pour différents sites

La simulation du système de Serso dans différents sites a montré que la longueur de sonde nécessaire dépend non seulement fortement de la conductivité thermique du terrain, mais aussi de la demande spécifique d'énergie de chauffage annuelle pour le dégivrage du pont.

Les sites étudiés sont :

- Serso – Därlingen (nord des Alpes) altitude : 560 m, moyenne annuelle air : 8.9°C
- Faido (sud des Alpes, axe du Gotthard) altitude : 720 m, moyenne annuelle air : 9.9°C
- Wassen (nord des Alpes, axe du Gotthard) altitude : 930 m, moyenne annuelle air : 7.0°C
- Zürich altitude : 410 m, moyenne annuelle air : 9.3°C
- Stockholm altitude : 20 m, moyenne annuelle air : 6.7°C

Dans le graphe de la figure 5, la longueur de sonde nécessaire par unité de surface de pont à dégivrer est reportée en fonction des besoins spécifiques de chauffage, définis par le rapport entre l'énergie annuelle de chauffage et la surface de pont à dégivrer. Le pont simulé pour les différents sites est le pont de référence, c'est-à-dire un pont isolé avec une épaisseur de 10 cm d'isolation sous sa face inférieure et un espacement de 25 cm entre les tubes implantés dans la chaussée du pont. Les résultats obtenus pour différentes variantes de pont sont également montrées. Les variantes de pont (avec ou sans isolation, espacement des serpentins de 15 ou 25 cm) ont été simulées pour le site de Serso et un terrain dont la conductivité thermique moyenne est de 4.4 W/(mK).

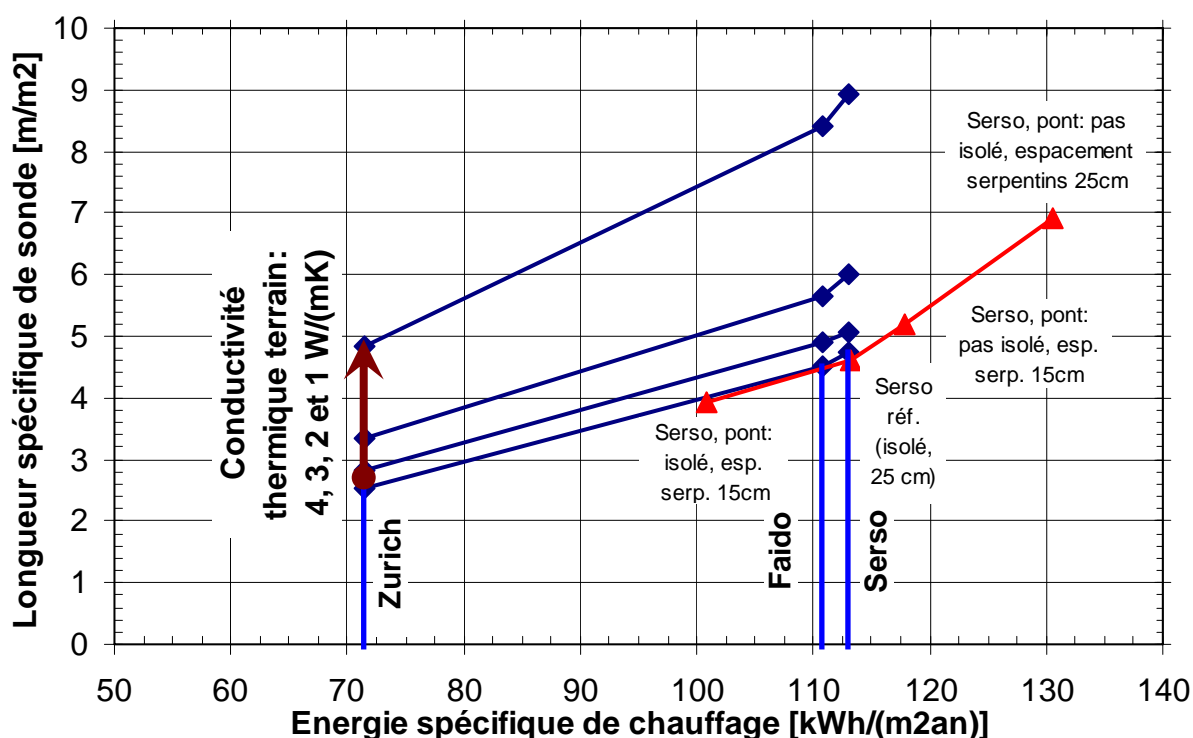


Figure 5 : Longueur spécifique en fonction de l'énergie spécifique de chauffage pour le dégivrage d'un pont pour différents sites, différentes valeurs de la conductivité thermique du terrain et différentes variantes de pont

Pour le site de Wassen, aucune solution n'a été trouvée avec une longueur spécifique de sonde inférieure à 10 m/m^2 . L'énergie de chauffage spécifique a été calculée à $180 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{an})$. Ceci montre la limite de ce genre de système, puisque la surface de captage du pont est également la surface de chauffage. Si les conditions climatiques et/ou le critère de tolérance requiert une demande de chauffage spécifique trop élevée, il n'est pas possible d'appliquer ce concept de système.

A noter que pour le site de Stockholm, les besoins spécifiques en chauffage ont été calculés à près de $200 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{an})$. Pour ce cas, un système avec une longueur spécifique de sonde inférieure à 10 m/m^2 est malgré tout possible si la conductivité thermique du terrain est supérieure à $4 \text{ W}/(\text{mK})$. Ce résultat est en contradiction avec le site de Wassen, probablement en raison de la disparité des lieux géographiques et des conditions climatiques qui y sont rattachées.

L'analyse des résultats simulés montre que la température moyenne du stock après une vingtaine d'années est toujours très proche de la température initiale du terrain, voire légèrement inférieure. Cela signifie qu'il n'y a pas un effet de stockage ou de déstockage significatif au cours des années, et la recharge estivale du stockage permet de compenser le déstockage hivernal. Ceci permet de dire que si le système fonctionne pour une configuration des sondes en stockage, alors il fonctionnera aussi pour une ligne de sondes.

Si les besoins spécifiques d'une route sont proches de ceux d'un pont isolé sous sa face inférieure, alors on pourrait utiliser une ligne de sondes le long de la route avec un espacement de 5m. En admettant un dimensionnement extrême qui requiert une longueur spécifique de sonde de 10 m/m^2 , il faudrait des sondes de 250m pour une route de 5m de large. Si la route est plus large, on peut disposer les sondes sur deux lignes. Il suffit de maintenir un espacement entre les deux lignes de 5m au moins.

7. Conclusion

Le projet pilote et de démonstration Serso a permis de réaliser le dégivrage d'un pont en utilisant en hiver les gains solaires collectés par ce dernier en été et qui ont été accumulés dans un stockage de chaleur saisonnier dans le terrain. Les mesures effectuées sur plusieurs années ont été exploitées pour développer et valider un outil de simulation pour ce type de système. L'outil de simulation, appelé BRIDGESIM, a été appliqué au système Serso de façon à illustrer la procédure proposée pour un dimensionnement. Des ordres de grandeur pour effectuer un pré-dimensionnement ont été établis.

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 $200 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{an})$, un système comme celui de Serso ne peut plus satisfaire la demande de chauffage. Pour des valeurs plus petites, la longueur spécifique de sonde peut varier de 2 à près de 10 m/m^2 (l'unité de surface se réfère à la surface de pont dégivrée).

L'outil de simulation BRIDGESIM a été développé comme une application TRNSED, de façon à ce que son usage ne requiert pas de connaissances spécifiques et préalables de TRNSYS. Il permet à un professionnel de pouvoir faire des calculs pour valider un pré-dimensionnement et optimiser un système

8. Références

- [1] Pahud D. (2008) BRIDGESIM : Simulation Tool for the System Design of Bridge Heating for Ice Prevention with Solar Heat Stored in a Seasonal Ground Duct Store. User Manual. ISAAC – DACD – SUPSI, Switzerland.
- [2] Pahud D. (2007) Serso, stockage saisonnier solaire pour le dégivrage d'un pont. Rapport final, Office fédéral de l'énergie, Berne, Suisse.

- [3] Klein S. A. et al. (2007) TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Version 16.1. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.
- [4] Pahud D., Fromentin A. and Hadorn J.-C. (1996) The Duct Ground Heat Storage Model (DST) for TRNSYS Used for the Simulation of Heat Exchanger Piles. User Manual, December 1996 Version. Internal Report. LASEN - DGC- EPFL, Switzerland.
- [5] TRNBuild demo version 1.0.87 (2005) TRANSSOLAR Energietechnik www.transsolar.com
- [6] Remund J. und Kunz S. (2003) METEON Version 5.0. www.meteonorm.com