

Serso, stockage saisonnier solaire pour le dégivrage d'un pont

Ausgearbeitet durch

Istituto di Sostenibilità Applicata all'Ambiente Costruito – ISAAC
Dipartimento Ambiente, Costruzioni e Design – DACD
Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana – SUPSI

Im Auftrag des

Office fédéral de l'énergie

Novembre 2007, rapport final

Auftraggeber:

Forschungsprogramm Geothermie
Bundesamtes für Energie

Auftragnehmer:

Istituto di Sostenibilità Applicata all'Ambiente Costruito, DACD, SUPSI

Autoren:

Dr. Daniel Pahud, SUPSI-DACD / ISAAC, Trevano-Canobbio

Begleitgruppe:

-

2007

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Geothermie“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb: BBL/EDMZ, 3003 Bern, www.admin.ch/edmz

BBL/EDMZ Bestellnummer: 805.xxx d

Riassunto

Il progetto Serso è nato dall'idea di sbrinare un ponte con l'energia solare. Ne risulta un concetto che sfrutta uno stoccaggio di calore nel terreno. L'energia solare è captata dal ponte durante l'estate, stoccata nel terreno attraverso un insieme di sonde geotermiche, poi restituita d'inverno per lo sbrinamento del ponte. Il ponte è equipaggiato di serpentine che permettono la captazione dei guadagni solari estivi e di riscaldare la carreggiata del ponte durante l'inverno per impedire la formazione di ghiaccio o di brina. All'eccezione dell'energia elettrica necessaria al funzionamento delle pompe di circolazione, il sistema è concepito per funzionare senza energia integrativa.

Le misure delle prestazioni termiche dell'impianto su più anni, effettuate nel quadro di un precedente progetto, hanno permesso di sviluppare e di convalidare un attrezzo di simulazione per il dimensionamento di un sistema simile. Chiamato BRIDGESIM, questo attrezzo di simulazione permette di oltrepassare l'esperienza realizzata.

Una procedura per il dimensionamento dell' sistema è proposta. In un primo tempo, si tratta di riscaldare il ponte per evitare la formazione di brina con il meno possibile di energia integrativa. Una curva di riscaldamento deve essere stabilita. Poiché il sistema funziona senza energia integrativa, non è sempre possibile garantire che la superficie del ponte sia abbastanza calda per evitare la formazione di ghiaccio. Un concetto di tolleranza è definito e utilizzato per il dimensionamento del sistema.

BRIDGESIM è utilizzato per ridimensionare il sistema di Serso. In un primo tempo la curva di riscaldamento è calcolata. In un secondo tempo, le seguenti grandezze sono ottimizzate: la distanza tra le sonde, il controllo dei guadagni solari, la lunghezza delle sonde geotermiche e la loro profondità. Le influenze di altri variabili sono ugualmente valutate, queste sono: la resistenza termica delle sonde, il diametro della perforazione senza dimenticare due parametri importanti relativi al ponte: l'isolamento inferiore del ponte e la distanza tra i tubi nella carreggiata.

Una distanza di 5 m tra le sonde può essere scelta indipendentemente della profondità delle sonde e della conduttività termica del terreno. Di conseguenza, il principale parametro di dimensionamento è la lunghezza totale delle sonde. Sonde più profonde hanno un effetto positivo, ma senza tuttavia produrre un miglioramento significativo delle prestazioni termiche del sistema. La resistenza termica e il diametro delle sonde sono ugualmente parametri di importanza secondaria. Un aumento dei fabbisogni specifici di riscaldamento richiede un aumento della lunghezza delle sonde che diventa sempre più importante. In un primo passo, può essere necessario ridurre i fabbisogni specifici di riscaldamento isolando il ponte sotto la sua faccia inferiore, o diminuendo la distanza tra i tubi immessi nella sua carreggiata. Nel caso del sistema di Serso, l'isolamento del ponte ha permesso di evitare un aumento massiccio di 50% della lunghezza delle sonde. Ne risulta una lunghezza specifica delle sonde geotermiche che vale 4.6 m/m^2 (per definizione, è la lunghezza di sonda necessaria per ogni metro quadrato di carreggiata riscaldata). Corrisponde a quella del sistema reale.

Il sistema è simulato in diversi siti. I risultati mostrano che la lunghezza di sonda necessaria dipende non solo in modo molto forte dalla conduttività termica del terreno, ma anche dal fabbisogno specifico di riscaldamento per lo sbrinamento del ponte. Per il caso di Serso, una variazione della conduttività termica da 4 a 1 W/(mK) induce un aumento della lunghezza specifica delle sonde geotermiche da 4.7 a 8.9 m/m^2 . Le diverse varianti di ponte simulate richiedono un fabbisogno specifico di riscaldamento che varia da 100 a $130 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$. Questo, con un terreno di conducibilità termica di 4.4 W/(mK) , induce una variazione della lunghezza specifica delle sonde da 3.9 a 6.9 m/m^2 . Per tutti i casi simulati nei vari siti, la lunghezza specifica di sonda geotermica varia da 2.5 a 8.9 m/m^2 . In certi casi nessuna soluzione è stata trovata, perché la lunghezza di sonda dovrebbe essere molto più elevata.

La sensibilità della lunghezza di sonda ai principali parametri del terreno è stata valutata. La conducibilità termica del terreno rimane un parametro preponderante se un movimento dell'acqua di falda non è presente in uno strato di terreno di spessore grande e con una velocità di Darcy elevata. L'effetto di un movimento dell'acqua di falda è positivo se l'entrata d'acqua non ha una temperatura inferiore alla temperatura media iniziale del terreno nel volume di stoccaggio; (i.e. temperatura media del terreno nello stoccaggio prima della messa in servizio del sistema).

L'attrezzo di simulazione BRIDGESIM è anche accessibile ai professionisti del settore, perché è stato sviluppato come un'applicazione TRNSED, quindi il suo impiego non richiede una conoscenza specifica e preliminare di TRNSYS.

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, cet outil de simulation permet d'aller au-delà de l'expérience pratique réalisée.

Une procédure pour le dimensionnement d'un système est proposée. Il s'agit dans un premier temps de chauffer le pont pour éviter la formation de givre avec le moins possible d'énergie thermique. Une courbe de chauffage doit être établie. Comme le système fonctionne sans énergie auxiliaire, il n'est pas possible de garantir en tout temps que la surface du pont soit toujours assez chaude pour éviter la formation de glace. Un concept de tolérance est défini et utilisé pour le dimensionnement d'un système.

BRIDGESIM est utilisé pour redimensionner le système de Serso. Dans un premier temps, la courbe de chauffage est calculée. Dans un deuxième temps, les grandeurs suivantes sont 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.

Comme un espacement de 5 m entre les sondes peut être adopté indépendamment de la profondeur des sondes et de la conductivité thermique du terrain, le principal paramètre de dimensionnement est la longueur totale des sondes. Des sondes plus profondes ont un effet positif, mais sans toutefois présenter une amélioration significative des performances thermiques du système. La résistance thermique et le diamètre des sondes sont également des paramètres d'importance secondaire. Une augmentation des besoins spécifiques de chauffage requiert une augmentation de la longueur des sondes qui devient toujours plus grande. Il peut être nécessaire de réduire dans un premier temps les besoins spécifiques de chauffage en isolant le pont sous sa face inférieure ou en diminuant l'écartement des tubes dans la chaussée du pont. Dans le cas du système de Serso, l'isolation du pont a permis d'éviter une augmentation massive de 50% de la longueur des sondes. Il en résulte une longueur spécifique de sonde géothermique, qui est par définition la longueur de sonde nécessaire pour chaque mètre carré de chaussée chauffée, de 4.6 m/m². Elle correspond à celle du système réel.

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. Pour le cas de Serso, une variation de la conductivité thermique du terrain de 4 à 1 W/(mK) fait augmenter la longueur spécifique de sonde géothermique de 4.7 à 8.9 m/m². Les diverses variantes de pont simulées requièrent une énergie spécifique de chauffage qui varie de 100 à 130 kWh/(m²an), ce qui, pour un terrain avec une conductivité thermique de 4.4 W/(mK), fait varier la longueur spécifique de sonde de 3.9 à 6.9 m/m². Pour tous les cas simulés dans les divers sites, la longueur spécifique de sonde géothermique varie de 2.5 à 8.9 m/m². Dans certains cas aucune solution n'a été trouvée, car la longueur de sonde devrait être beaucoup trop élevée.

La sensibilité de la longueur spécifique de sonde aux paramètres principaux du terrain a été évaluée. La conductivité thermique du terrain reste le paramètre prépondérant si un écoulement de l'eau souterraine n'est pas présent dans une couche de terrain de forte épaisseur et avec une vitesse de Darcy élevée. L'effet d'un écoulement de l'eau souterraine est positif si l'arrivée d'eau n'a pas une température inférieure à la température moyenne du terrain dans le volume de stockage avant la mise en service du système.

L'outil de simulation BRIDGESIM est également accessible aux professionnels du secteur, puisqu'il a été développé comme une application TRNSED, de façon à ce que son usage ne requiert pas de connaissances spécifiques et préalables de TRNSYS.

Summary

The Serso project started with the idea of defrosting a bridge with solar heat. It does result an energy concept which involves a seasonal ground heat storage in the ground. Solar energy is collected during summer, stored in the ground with the help of a borehole heat exchanger field, and recovered in winter for the bridge defrosting. Pipes are imbedded in the bridge carriageway for the collection of aestival solar heat and heating to prevent ice or frost formation. Apart from the electric energy for the circulation pumps, the system is designed to operate without auxiliary energy.

Measurements of the system thermal performances over a few years, realised in the framework of another project, have been used to develop and validate a simulation tool for the sizing of a similar system. Called BRIDGESIM, this simulation tool is providing an opportunity to go beyond the realised practical experience.

A procedure is proposed for the sizing of the system. First of all the bridge has to be heated to prevent frost formation with the least possible heating energy. A heating curve has to be established. As the system operates without auxiliary energy, it is not possible to guaranty that the bridge carriageway is always warm enough to prevent ice formation. A tolerance concept is defined and used for the system sizing.

BRIDGESIM is used to resize the Serso system. As a first step, the heating curve is calculated. Then the following quantities are optimised: the spacing between the boreholes, the control parameters of the solar collection, the total borehole length and the bore depth. The influence of other variables is also assessed, such as the borehole thermal resistance, the bore diameter and two parameters related to the bridge, which are the insulation layer under the bridge and the pipe spacing in the bridge carriageway.

The main sizing parameter is the total borehole length, as a 5 m spacing between the borehole heat exchangers can be chosen independently from the bore depth and the ground thermal conductivity. Deeper boreholes have a positive effect. However the thermal performances of the system are not significantly improved. The borehole thermal resistance and the bore diameter are also parameters of secondary importance. An increase of the specific heating demand requires an increase of the total borehole length which becomes always greater. It might be necessary to decrease in a first step the specific heating demand by insulating the bridge inferior face or reducing the spacing of the pipes in the bridge carriageway. In the case of the Serso system, the bridge insulation impeded a massive increase of 50% of the total borehole length. The specific borehole heat exchanger length, defined by the necessary borehole length per square meter of heated carriageway, is established to 4.6 m/m². It corresponds to that of the real system.

The system is simulated in various sites. The results show that the required borehole length does not only depend in a considerable way on the ground thermal conductivity, but also on the specific heating demand to keep the bridge frost-free. For the Serso case, a ground thermal conductivity variation from 4 to 1 W/(mK) makes the specific borehole heat exchanger length increase from 4.7 to 8.9 m/m². The four bridge variants require a specific heating energy that lies between 100 and 130 kWh/(m²an). The resulting specific borehole heat exchanger length, having a ground thermal conductivity of 4.4 W/(mK), varies from 3.9 to 6.9 m/m². For all the other cases simulated in other places, the specific borehole heat exchanger length varies from 2.5 to 8.9 m/m². In certain situations no solution was found, as the total borehole length would have been far to large.

The sensitivity of the specific borehole heat exchanger length to the main ground parameters has been assessed. The ground thermal conductivity is remaining the preponderant parameter if a regional ground water flow is not present in a thick ground layer and with a large Darcy velocity. The effect of a ground water flow is positive if the incoming water has a temperature which is not smaller than the mean initial ground temperature in the store volume.

The BRIDGESIM simulation tool is also at the disposition of the sector professionals. It was developed as a TRNSED application, so that its usage does not require specific and prior knowledge of TRNSYS.

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.

Ein Verfahren zur Dimensionierung eines Systems ist vorgeschlagen. Zuerst geht es darum mit der geringst möglichen Wärmeenergie die Brücke zu heizen und die Bildung von Frost zu vermeiden. Eine Heizkurve muss erstellt werden. Da das System ohne zusätzliche Energie funktioniert, ist es nicht immer möglich zu garantieren, dass die Fahrbahn warm genug ist um die Bildung von Eis zu vermeiden. Ein Toleranzkonzept ist definiert, welches bei der Dimensionierung eines Systems angewendet wird.

BRIDGESIM ist eingesetzt, um das Serso-System neu zu dimensionieren. Als erstes wird die Heizkurve errechnet. Daraufhin werden die folgenden Grössen optimiert: der Abstand zwischen den Erdwärmesonden, die Regulierung der Solargewinne, die Länge der Erdwärmesonden und deren Tiefe. Der Einfluss anderer Variablen wird ebenfalls evaluiert, dieses sind: der thermische Widerstand der Erdwärmesonde, der Durchmesser der Bohrlöcher und zwei auf die Brücke bezogenen Parameter, welches die untere Isolationsschicht der Brücke und der Abstand der in der Fahrbahn verlegten Registern sind.

Da ein Abstand von 5m zwischen den Erdwärmesonden gewählt werden kann unabhängig von der Sondentiefe und von der Erdwärmeleitfähigkeit, ergibt sich die Gesamtlänge der Erdwärmesonden als der wichtigste Parameter bei der Dimensionierung eines solchen Systems. Tiefere Sonden haben einen positiven Effekt, allerdings ohne wesentliche Verbesserung der gesamten thermischen Systemleistung. Andere sekundäre Grössen sind der thermische Widerstand der Erdwärmesonden und deren Durchmesser. Eine Zunahme des spezifischen Wärmebedarfs erfordert eine immer grössere Gesamtlänge der Sonden, was immer relevanter wird. Anfangs kann es notwendig sein den spezifische Heizungsbedarf zu begrenzen, entweder durch Isolierung der unteren Seite der Brücke oder durch eine Reduzierung der Rohrabstände innerhalb der Fahrbahn. Im Fall des Serso Systems, hat man mit der Isolierung der Brücke um 50% längere Erdwärmesonden verhindern können. Das ergab eine spezifische Wärmetauscherlänge, die der Länge der Erdwärmetauscher entspricht die man pro Quadratmeter beheizter Fahrbahn benötigt, von 4.6 m/m². Dies entspricht der Länge im realen System.

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. Im Fall Serso, führt eine Änderung der Erdwärmeleitfähigkeit von 4 auf 1 W/(mK) zu einer Erhöhung der spezifischen Wärmetauscherlänge von 4.7 auf 8.9 m/m². Die verschiedenen simulierten Brückenvarianten erfordern eine spezifische Heizenergie, die zwischen 100 und 130 kWh/(m²an) liegt. Dies führt bei einer Wärmeleitfähigkeit des Bodens von 4.4 W/(mK) zu einer Variation der spezifischen Erdwärmesondenlänge von 3.9 bis zu 6.9 m/m². In allen für verschiedene Standorte simulierten Fällen, variierte die Länge der Erdwärmesonden von 2.5 bis 8.9 m/m². In einigen Fällen wurde keine Lösung gefunden, da die Gesamtlänge bei weitem zu groß wäre.

Die Empfindlichkeit der spezifischen Erdwärmesondenlänge auf die Hauptparameter des Bodens, wurden näher untersucht. Die Wärmeleitfähigkeit des Geländes bleibt der dominante Faktor, wenn kein Grundwasserfluss innerhalb einer grösseren Erdschicht und mit einer erhöhten Darcy-Geschwindigkeit vorhanden ist. Ein Grundwasserfluss hat einen positiven Effekt, wenn die Temperatur des Wassers am Eingang nicht niedriger ist als die mittlere Temperatur des Geländes im Speichervolumen vor der in Betriebnahme des Systems.

Das Simulationstool BRIDGESIM steht auch Fachleuten zur Verfügung, da es als TRNSED Anwendung entwickelt wurde. Besondere Erfahrungen und Vorkenntnisse von TRNSYS sind somit nicht erforderlich.

Table des matières

1. Introduction	2
2. Objectifs	3
3. Modèle de simulation	4
4. Courbe de chauffage	4
4.1 Définition de la courbe de chauffage	4
4.2 Etablissement de la courbe de chauffage	6
4.3 Courbe de chauffage pour quelques variantes de pont	8
5. Optimisation du système pour le cas de Serso	10
5.1 Tolérance	10
5.2 Situation de départ	10
5.3 Espacement entre les sondes	11
5.4 Contrôle des gains solaires	12
5.5 Longueur des sondes géothermiques	13
5.6 Profondeur des sondes géothermiques	14
5.7 Résistance thermique des sondes géothermiques	15
5.8 Diamètre des sondes géothermiques	16
5.9 Isolation du pont et espacement des serpentins	17
5.10 Caractéristiques du système optimal pour le projet Serso	18
6. Optimisation du système pour différents sites	19
6.1 Introduction	19
6.2 Système simulé à Serso -Därtingen	20
6.3 Système simulé à Faido	22
6.4 Système simulé à Wassen	24
6.5 Système simulé à Zürich	26
6.6 Système simulé à Stockholm	28
6.7 Synthèse des résultats	30
7. Sensibilité aux paramètres thermiques du terrain	32
7.1 Sensibilité à la conductivité thermique du terrain	32
7.2 Sensibilité à la température initiale du terrain	33
7.3 Sensibilité à la capacité thermique volumique	34
7.4 Sensibilité à l'écoulement de l'eau souterraine	35
8. Conclusions	38
9. Remerciements	38
10. Références	39

Annexe 1 : Simulation du stockage de chaleur dans le terrain de l'installation Serso et calibrage sur deux ans de mesure

Annexe 2 : Simulation du système complet et calibrage sur les mesures

Annexe 3 : BRIDGESIM, a simulation tool for the system design of bridge heating for ice prevention with solar heat stored in a seasonal ground duct store

1. Introduction

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.

L'objectif principal de ce projet est de pouvoir simuler et optimiser l'installation pilote 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.

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

Une application TRNSED du modèle de simulation de l'installation est créée pour mettre à la disposition des professionnels concernés un outil de calcul facile à utiliser pour le dimensionnement d'une installation fonctionnant selon le même concept. Cet outil de calcul est dénommé BRIDGESIM. L'installation pilote de Serso est recalculée avec BRIDGESIM pour illustrer la procédure établie pour un dimensionnement du système.

Dans le chapitre 2 les objectifs de l'étude sont présentés. Le chapitre 3 contient une brève description de BRIDGESIM, avec référence aux annexes 1 et 2 pour une description des modèles de calcul utilisés et de leur calibration sur les mesures du projet de Serso. L'annexe 3 est également référencée pour le manuel d'utilisation de BRIDGESIM. Dans le chapitre 4, la courbe de chauffage pour le dégivrage du pont est définie de même qu'une procédure pour sa détermination. Dans le chapitre 5, le concept de tolérance pour le dimensionnement d'un système est présenté. Les principaux paramètres du système sont optimisés avec BRIDGESIM et les résultats sont présentés de façon à montrer l'influence de chaque paramètre. Dans le chapitre 6 le système est optimisé pour différents climats. Finalement, la sensibilité aux paramètres thermiques du terrain est montrée dans le chapitre 7.

2. Objectifs

Les buts principaux du projet sont de simuler l'installation complète du système de Serso et de créer un modèle de calcul calibré sur les mesures effectuées. Les objectifs de l'étude peuvent se résumer à :

- analyser les mesures du système de Serso et déterminer les performances thermiques sur une période de 2 ans ;
- développer un outil de calcul pour la simulation du système de Serso et le valider sur les deux ans de mesure ;
- optimiser le système de Serso à l'aide de l'outil de calcul calibré ;
- déterminer les paramètres clefs pour un dimensionnement et établir des règles simples pour le pré-dimensionnement d'un système semblable ;
- illustrer le dimensionnement d'un système avec l'outil de calcul développé ;
- mettre à la disposition des professionnels l'outil de calcul pour le dimensionnement d'autres systèmes du même type.

3. Modèle de simulation

Le modèle de simulation a été créé avec TRNSYS 15.3 (Klein et al., 2005). Il utilise le type non standard TRNVDSTP (Pahud et al., 1996) 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. La description du modèle de l'installation et sa validation avec les mesures sont présentés dans les annexes 1 et 2.

Une application TRNSED a été créée à partir du modèle de simulation. Elle est appelée BRIDGESIM. Les paramètres de simulation et les résultats simulés sont décrits dans l'annexe 3.

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 s'appelle BRIDGEHEAT et son utilisation est illustrée dans le chapitre suivant.

4. Courbe de chauffage

4.1 Définition de la courbe de chauffage

Le module BRIDGEHEAT est une version simplifiée de BRIDGESIM. Seuls les paramètres liés au pont, à la météo et à la courbe de chauffage sont nécessaires. 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.

Le système doit être en mesure de satisfaire la condition 4.1 en tout temps:

$$T_s > 0^\circ\text{C} \quad \text{si} \quad T_{\text{air}} > -4^\circ\text{C} \quad (4.1)$$

T_s et T_{air} sont respectivement la température de surface de la chaussée et la température de l'air ambiant.

Toutefois le système ne peut pas garantir en tout temps la condition 4.1 sans devoir injecter une puissance thermique importante 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 choisi, basé sur un critère qui permette de mesurer « combien » le système s'écarte de la prestation de base qu'il doit satisfaire, définie par le critère 4.1. Le non respect du critère 4.1 est « mesuré » avec des degrés-heures annuels définis comme suit :

$$NT_s = \int_{t=0}^{t=1\text{an}} (0 - T_s) dt \quad \text{si } T_s < 0^\circ\text{C} \text{ et si } T_{\text{air}} > -4^\circ\text{C} \quad (4.2)$$

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, défini par la condition 4.1. 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.

La courbe de chauffage est définie par le diagramme de la figure 4.1.

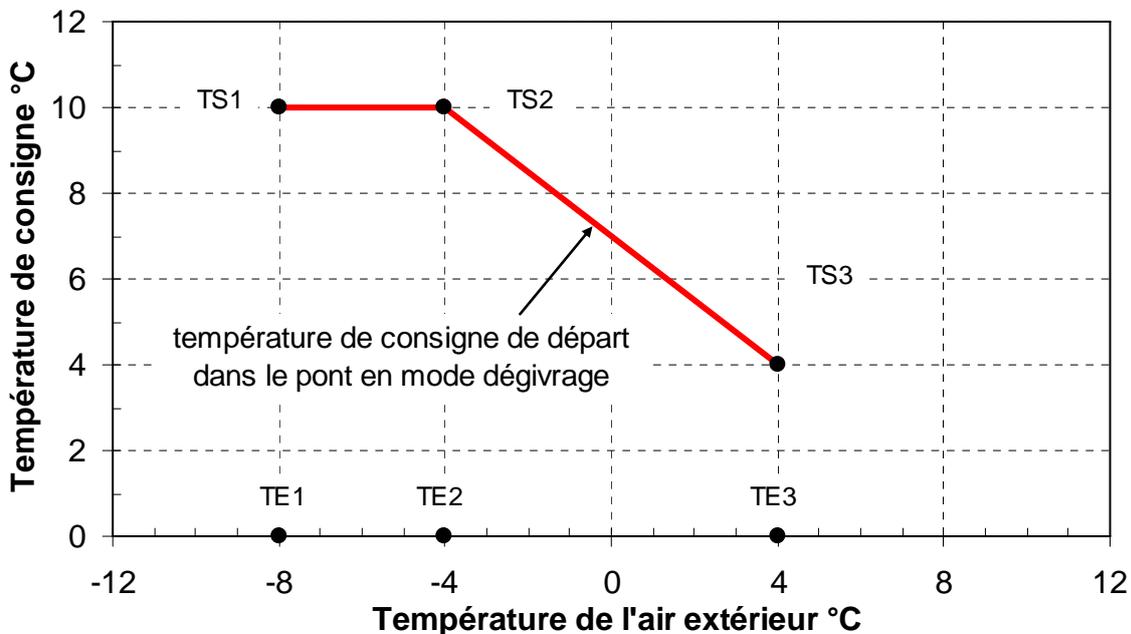


Figure 4.1 Courbe de chauffage pour le dégivrage du pont.

Le pont est chauffé lorsque la température de l'air extérieur descend en dessous de +4°C (TE3). La température de consigne augmente linéairement jusqu'à ce que la température de l'air extérieur descend à -4°C (TE2). Pour des températures de l'air plus basses, la température de consigne est maintenue constante (TS1 = TS2). Lorsque la température de l'air passe sous les -8°C (TE1), le chauffage du pont est arrêté.

La courbe de chauffage est choisie comme la courbe qui permet de minimiser l'énergie de chauffage tout en maintenant la surface du pont hors gel conformément au critère défini ci-dessus. Cela signifie que le nombre des degré-heures par année pour lesquels $T_s < 0^\circ\text{C}$ quand $T_a > -4^\circ\text{C}$ doit être aussi proche que possible de 0 (NTs ~ 0 Kh/a).

4.2 Etablissement de la courbe de chauffage

La courbe de chauffage est ajustée en variant les paramètres TS2 et TS3 séparément. La figure 4.2 permet d'illustrer l'influence de la variation de TS2 sur l'énergie annuelle de chauffage et NTs.

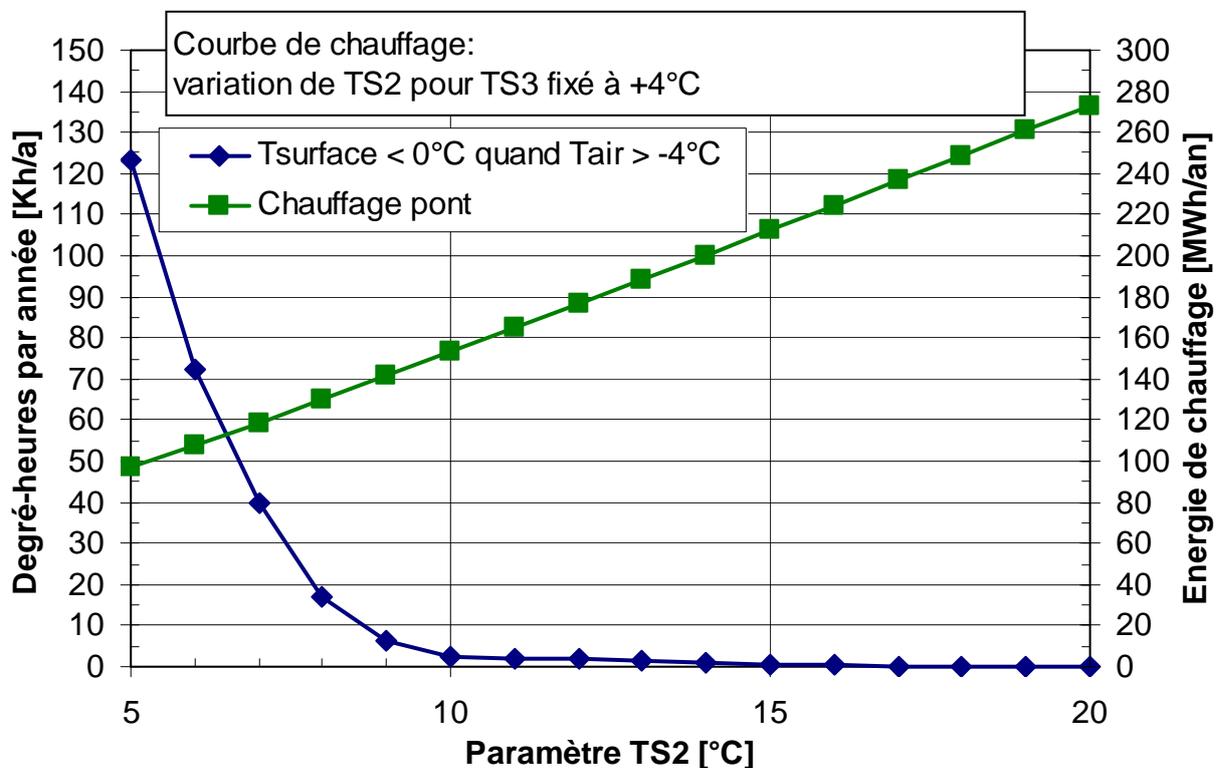


Figure 4.2 Variation du paramètre TS2 pour l'ajustement de la courbe de chauffage.

L'exemple de la figure 4.2 permet de montrer qu'à partir de TS2 égal à 10°C, NTs ne diminue plus de façon significative, malgré une énergie de chauffage annuelle toujours plus grande. Pour d'autres valeurs de TS3 fixées, l'allure de la courbe ne change pas sensiblement. Ceci permet de fixer TS2 à 10°C et de varier dans une étape successive TS3 (cf. figure 4.3).

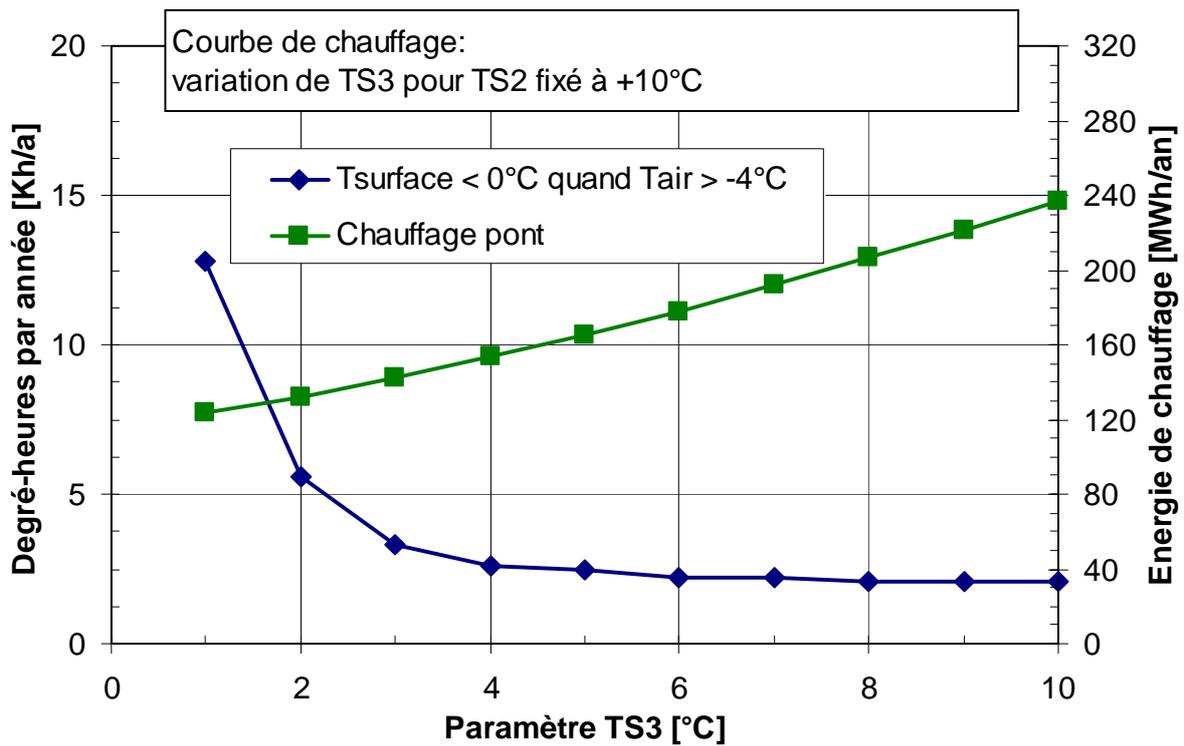


Figure 4.3 Variation du paramètre TS3 pour l'ajustement de la courbe de chauffage.

Le paramètre pour TS3 est choisi comme la plus petite valeur qui permet de maintenir NTs proche de sa valeur minimum. Dans ce cas, TS3 est choisi à 4°C. Le nombre des degrés-heures annuels NTs qui ne respectent pas le critère de température pour la surface du pont est inférieur à 3 Kh/a. Une représentation graphique des températures de la surface de la chaussée du pont en fonction de la température de l'air extérieur est montrée dans le graphique 4.4.

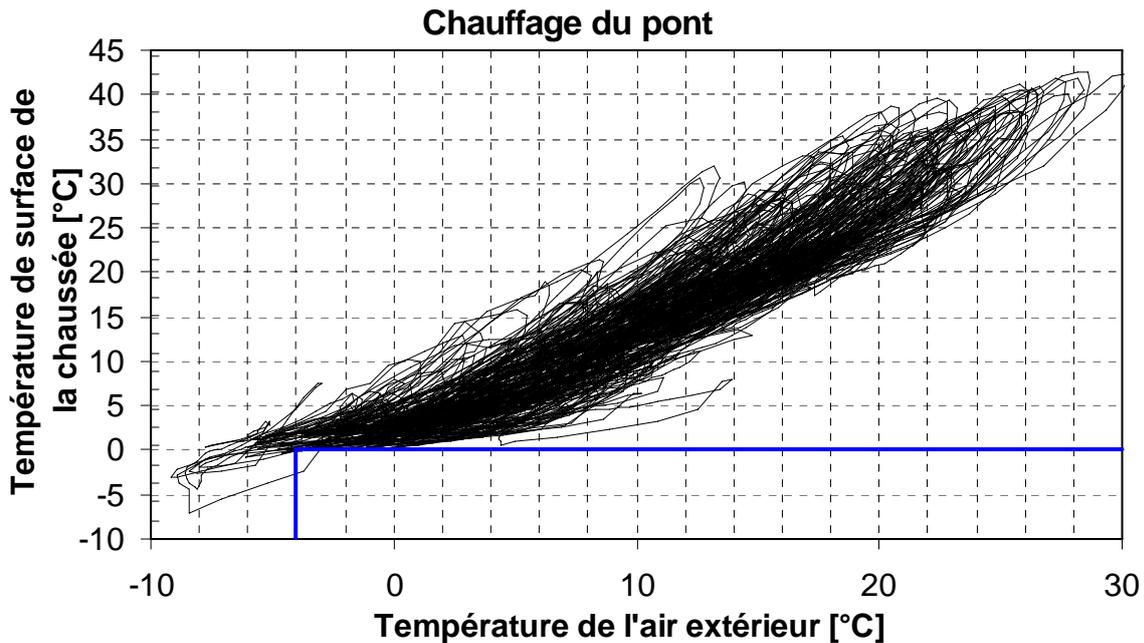


Figure 4.4 Température de surface du pont en fonction de la température extérieure avec effet de la courbe de chauffage.

En pratique le graphique de la figure 4.2, qui permet de visualiser la sensibilité de la courbe de chauffage au paramètre TS2, est répété pour diverses valeurs de TS3, afin de correctement fixer TS2. L'intervalle de variation de TS3 doit bien entendu inclure la valeur optimale qui sera choisie une fois le paramètre TS2 fixé.

4.3 Courbe de chauffage pour quelques variantes de pont

La courbe de chauffage a été établie pour quatre cas :

- le pont comme il a été construit, c'est-à-dire avec une isolation thermique de 10 cm d'épaisseur sous le pont et un espacement de 25 cm entre les tubes des serpentins de la chaussée (cf. section précédente) ;
- pont isolé et un espacement de 15 cm entre les tubes ;
- pont non isolé et un espacement de 25 cm entre les tubes ;
- pont non isolé et un espacement de 15 cm entre les tubes.

Les courbes de chauffage sont déterminées pour chaque variante et les résultats sont montrés dans la table 4.1. Les données météorologiques correspondent à Serso. Elles ont été obtenues avec Meteonorm 5.1 (Remund et Kunz, 2004) et incluent l'effet de l'horizon lointain pour les données d'ensoleillement.

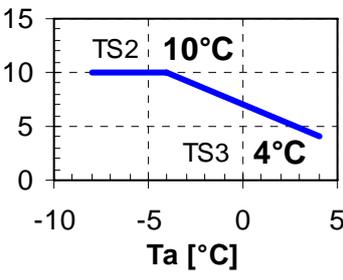
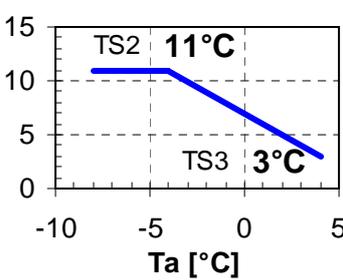
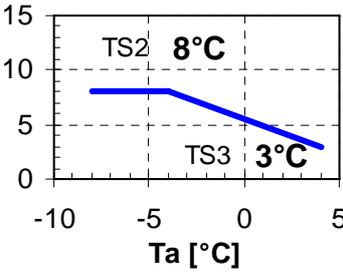
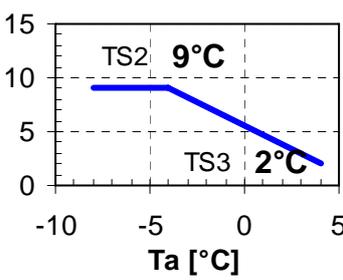
Variante de pont	avec isolation	sans isolation
espacement tubes : 25 cm	 <p>Pour $T_s < 0^\circ\text{C}$ et $T_a > -4^\circ\text{C}$ NTs = 2.6 Kh/an Energie de chauffage : Qch = 153 MWh/an 118 kWh/(m²an)</p>	 <p>Pour $T_s < 0^\circ\text{C}$ et $T_a > -4^\circ\text{C}$ NTs = 3.1 Kh/an Energie de chauffage : Qch = 177 MWh/an 136 kWh/(m²an)</p>
espacement tubes : 15 cm	 <p>Pour $T_s < 0^\circ\text{C}$ et $T_a > -4^\circ\text{C}$ NTs = 3.4 Kh/an Energie de chauffage : Qch = 135 MWh/an 104 kWh/(m²an)</p>	 <p>Pour $T_s < 0^\circ\text{C}$ et $T_a > -4^\circ\text{C}$ NTs = 2.9 Kh/an Energie de chauffage : Qch = 159 MWh/an 122 kWh/(m²an)</p>

Table 4.1 Courbes de chauffage pour les quatre variantes évaluées.

Ainsi la courbe de chauffage doit être ajustée pour chaque objet analysé avant d'effectuer les simulations d'un système complet.

L'établissement des courbes de chauffage pour les quatre variantes a montré que l'isolation du pont permet de réduire l'énergie de chauffage annuelle, de même qu'un espacement réduit entre les serpentins du pont. Ainsi l'effet de la couche de 10 cm d'isolation sous le pont est plus ou moins compensé par un espacement des serpentins réduit de 25 à 15 cm.

5. Optimisation du système pour le cas de Serso

5.1 Tolérance

La procédure établie pour la détermination de la courbe de chauffage ne permet pas de satisfaire à 100% le critère de température défini par la relation 4.1. Ceci est inévitable si l'énergie thermique injectée dans le pont ne doit pas être disproportionnellement élevée.

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 surdimensionner 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.

5.2 Situation de départ

Les paramètres variés sont énumérés dans la table 5.1 avec leurs valeurs de départ, qui correspondent aux valeurs de projet du système de Serso.

Stockage de chaleur	
nombre de sondes géothermiques N1	91 -
longueur d'une sonde géothermique H1	65 m
espacement entre les sondes BBORE	2.792 m
Contrôle ON/OFF solaire (charge stock)	
différence de température pour enclenchement DT1CST	10 K
différence de température pour déclenchement DT0CST	4 K
Courbe de chauffage	
température de départ minimale (consigne) TS3	6 K
température de départ maximale (consigne) TS2	10 K

Table 5.1 Liste des paramètres variés. Les valeurs correspondent aux valeurs calibrées du modèle sur les mesures et déterminent ainsi la situation de départ.

Les deux variables calculées sont NTs et la quantité d'énergie thermique injectée en hiver dans le pont. Ils sont calculés à :

$$NTs = 24.3 \text{ Kh/a} \quad \text{et} \quad Q_{\text{chauf}} = 154 \text{ MWh/an}$$

En adaptant la courbe de chauffage sur celle qui a été obtenue par la procédure décrite dans le chapitre 4 (TS3 = 4°C et TS2 = 10°C), les valeurs deviennent :

$$NTs = 21.7 \text{ Kh/a} \quad \text{et} \quad Q_{\text{chauf}} = 139 \text{ MWh/an}$$

On peut observer que le système pilote satisfait pratiquement le critère de température. Les paramètres sont maintenant variés pour réduire NTs sous la barre des 10 Kh/a.

5.3 Espacement entre les sondes

La figure 5.1 permet de montrer la sensibilité du critère de température NTs et de l'énergie thermique annuelle injectée dans le pont Q_{chauf} à l'espacement.

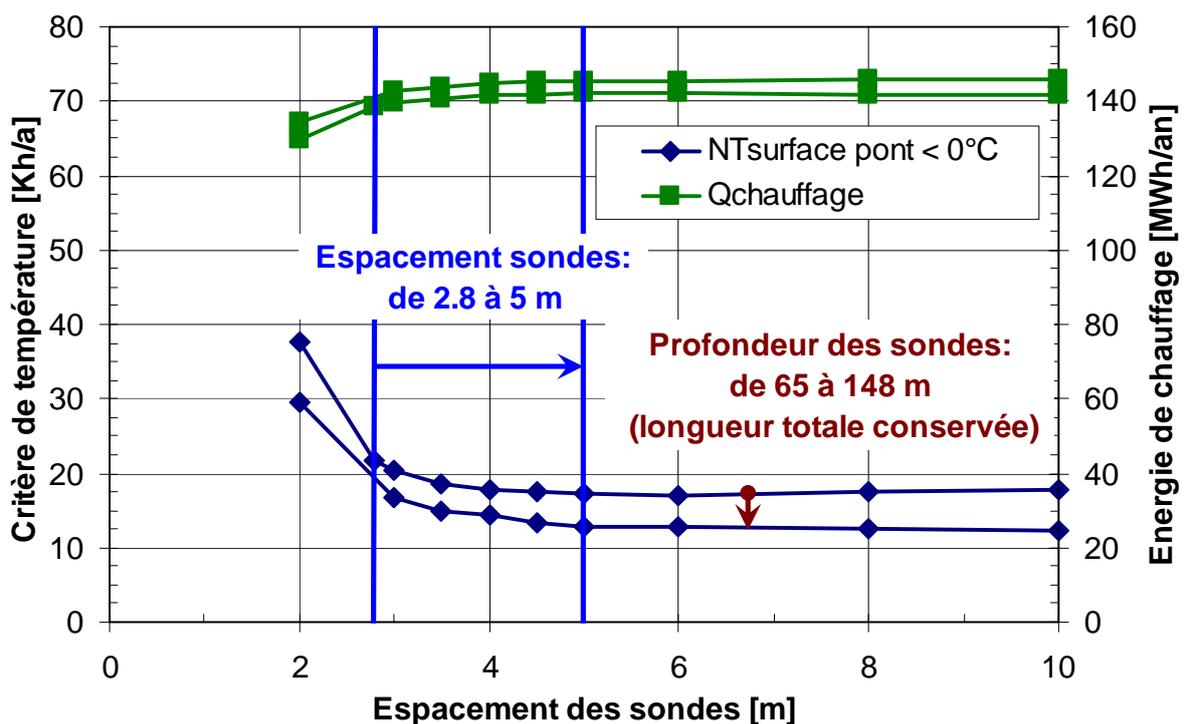


Figure 5.1 Sensibilité du critère de température et de l'énergie annuelle de chauffage à l'espacement entre les sondes. La sensibilité est calculée pour deux profondeurs de sonde différentes, pour lesquelles la longueur totale des sondes est égale.

Un espacement de **5 m** entre les sondes peut être adopté aussi bien avec les sondes de 65 m que celles de 148 m. Comme le critère de température est mieux satisfait avec des

sondes plus profondes, la longueur des sondes est fixée à 148 m, ce qui réduit le nombre de sondes de 91 à 40.

Des simulations ont montré que l'allure des courbes de la figure 5.1 restent les mêmes si la conductivité thermique du terrain est variée de 2 à 4 W/(mK). Il s'ensuit seulement un déplacement vertical, qui va vers le bas pour une conductivité thermique du terrain plus élevée. En conséquence l'espacement de 5 m est également approprié pour d'autres valeurs de conductivité thermique du terrain.

5.4 Contrôle des gains solaires

Le captage des gains solaires est contrôlé par un régulateur qui fonctionne sur une différence de température. Cette dernière doit avoir une valeur plus élevée pour l'enclenchement que pour le déclenchement, afin de limiter un fonctionnement instable du système, caractérisé par une alternance d'enclenchements et de déclenchements des pompes de circulation.

La figure 5.2 permet de montrer la sensibilité du critère de température NTs et de l'efficacité annuelle du système aux différences de température d'enclenchement et de déclenchement du contrôleur solaire. L'efficacité annuelle du système est définie comme la quantité d'énergie thermique injectée dans le pont pour son dégivrage rapportée à l'énergie électrique absorbée par les pompes de circulation durant un cycle annuel.

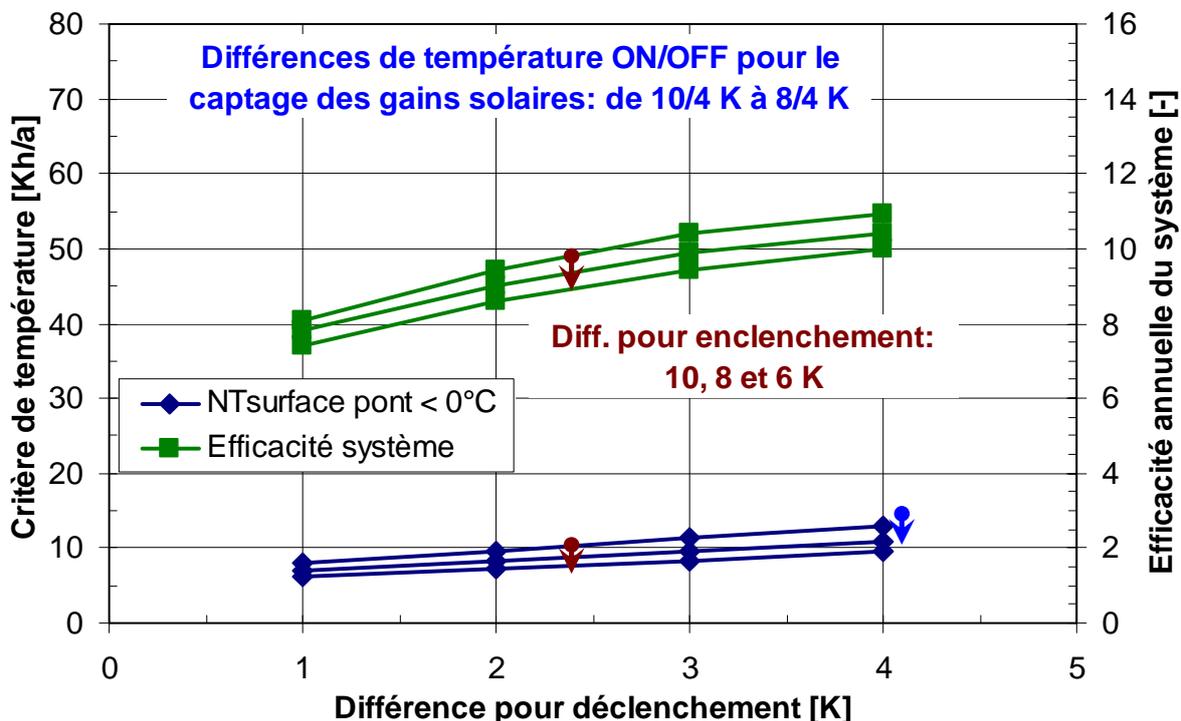


Figure 5.2 Sensibilité du critère de température et de l'efficacité annuelle du système aux critères d'enclenchement et de déclenchement du contrôleur solaire.

Le critère de température est mieux satisfait si les différences de température pour le captage des gains solaires sont abaissées. Toutefois ceci allonge le temps de marche des pompes de circulation et par conséquent la consommation électrique du système. Cet effet

n'est pas compensé par l'énergie de chauffage supplémentaire injectée en hiver dans le pont. Un compromis a été trouvé en choisissant des critères d'enclenchement et de déclenchement qui conduisent à une efficacité annuelle du système d'au moins 10.

Les différences de température pour le captage des gains solaires ont été fixées à **8K** pour l'enclenchement des pompes et à **4K** pour leur déclenchement.

5.5 Longueur des sondes géothermiques

Le nombre des sondes est varié, tout en maintenant leur profondeur constante et fixée à 150m. La figure 5.3 permet de montrer la sensibilité du critère de température NTs et de l'énergie thermique annuelle injectée dans le pont Q_{chauf} à la longueur totale des sondes.

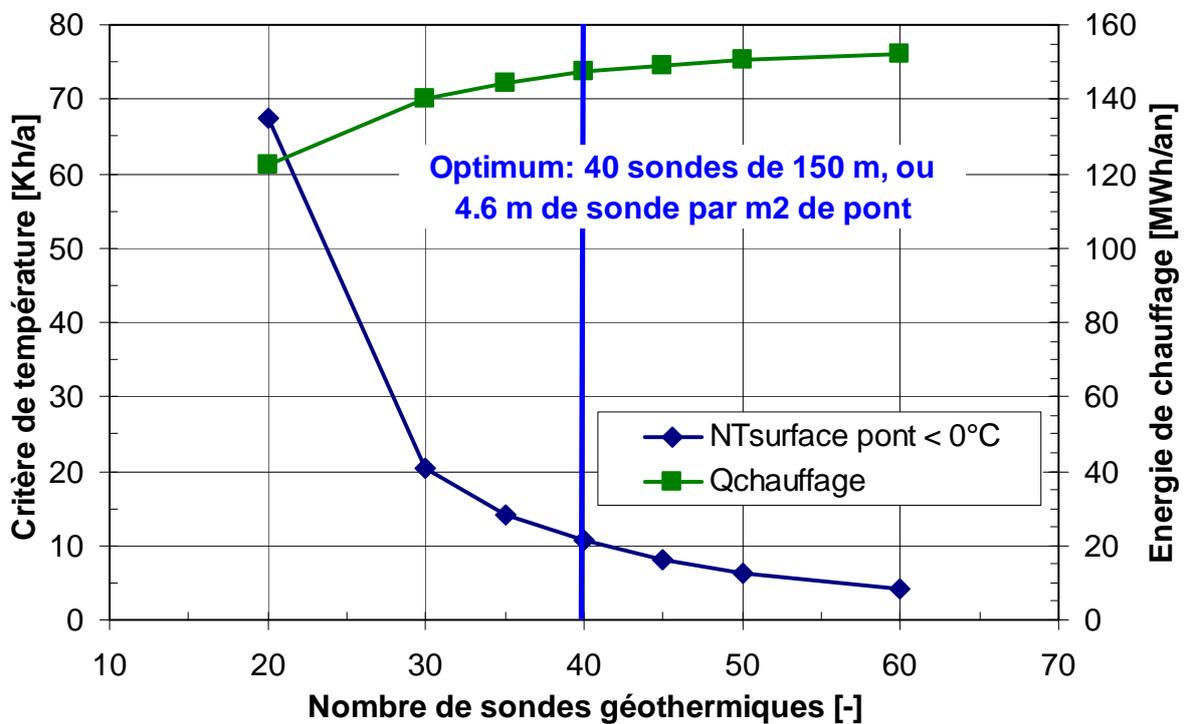


Figure 5.3 Sensibilité du critère de température et de l'énergie thermique annuelle injectée dans le pont Q_{chauf} à la longueur des sondes. Leur nombre est varié tout en maintenant leur profondeur à 150 m.

Le principal paramètre de dimensionnement du stockage saisonnier est la longueur totale des sondes, une fois leur espacement fixé. La courbe de la figure 5.3 permet de montrer que l'influence d'un sous-dimensionnement est beaucoup plus importante qu'un surdimensionnement. Cet effet est typique pour un système fonctionnement avec des sondes géothermiques.

Le système retenu a donc **40 sondes** géothermiques de **150 m de profondeur**. Ceci donne un rapport de 4.6 m de sonde géothermique pour chaque mètre carré de surface de pont chauffé.

5.6 Profondeur des sondes géothermiques

La profondeur des sondes est variée de 100 à 200 m, tout en maintenant la longueur totale constante. La figure 5.4 permet de montrer la sensibilité du critère de température NTs et de l'énergie thermique annuelle injectée dans le pont Q_{chauf} à la profondeur des sondes. Trois courbes sont calculées, chacune pour une longueur totale des sondes fixée (4'500, 6'000 et 7'500 m).

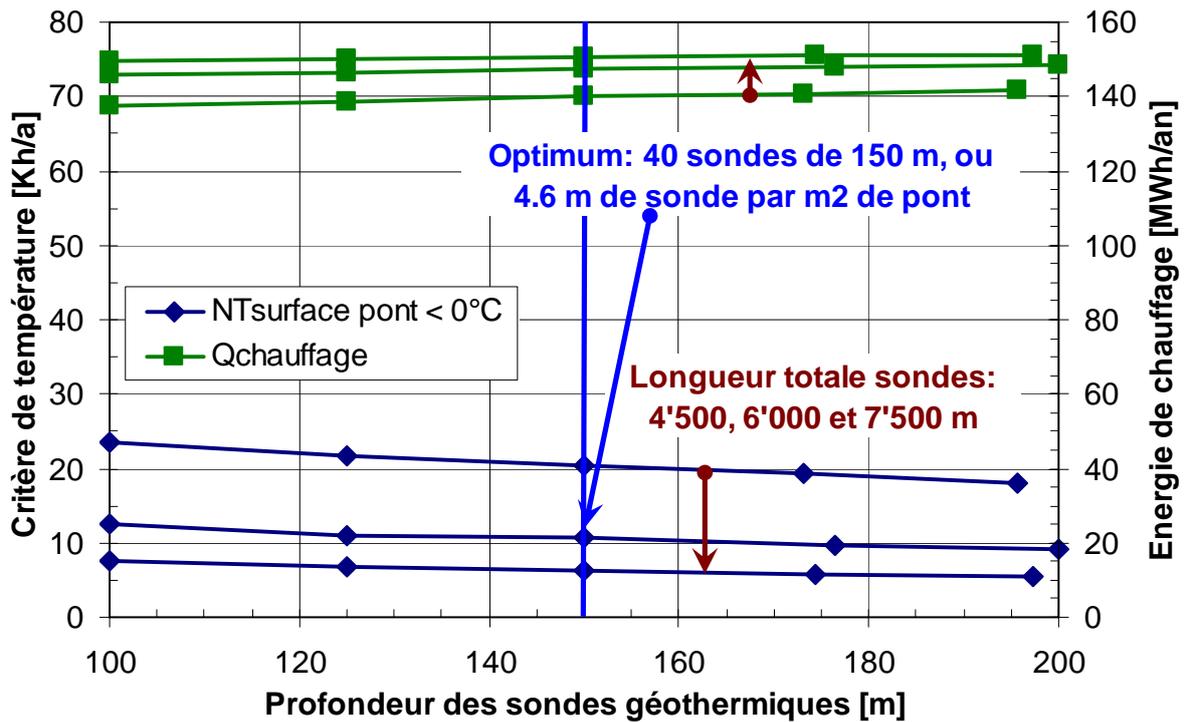


Figure 5.4 Sensibilité du critère de température et de l'énergie thermique annuelle injectée dans le pont Q_{chauf} à la profondeur des sondes. Leur profondeur est variée tout en maintenant la longueur totale des sondes constante.

Pour une longueur totale des sondes donnée, l'influence de la profondeur n'est pas décisive entre 100 et 200 m. L'influence devient plus faible pour une longueur de sonde plus grande. Les calculs ont été fait avec un gradient géothermique de 25 K par kilomètre.

5.7 Résistance thermique des sondes géothermiques

Dans cette section, l'influence de la résistance thermique est évaluée sur la longueur totale des sondes géothermiques. Tous les calculs ont été exécutés avec une valeur de résistance thermique pour les sondes géothermiques de 0.12 K/(W/m). Avec le programme EED (Earth Energy Designer ; Hellström and Sanner, 2000), cette valeur de résistance thermique a été recalculée en ajustant les paramètres de la sonde. Une valeur de 0.09 K/(W/m) est calculée en augmentant la conductivité thermique du matériau de remplissage de 0.8 à 2.0 W/(mK). Ceci correspondrait à l'amélioration de la résistance thermique de la sonde en substituant le traditionnel mélange de ciment et de bentonite par un matériau de remplissage plus conducteur, comme on peut en trouver sur le marché.

La figure 5.5 permet de montrer la sensibilité du critère de température NTs à la valeur de résistance thermique des sondes, pour les deux cas de figure mentionnés ci-dessus.

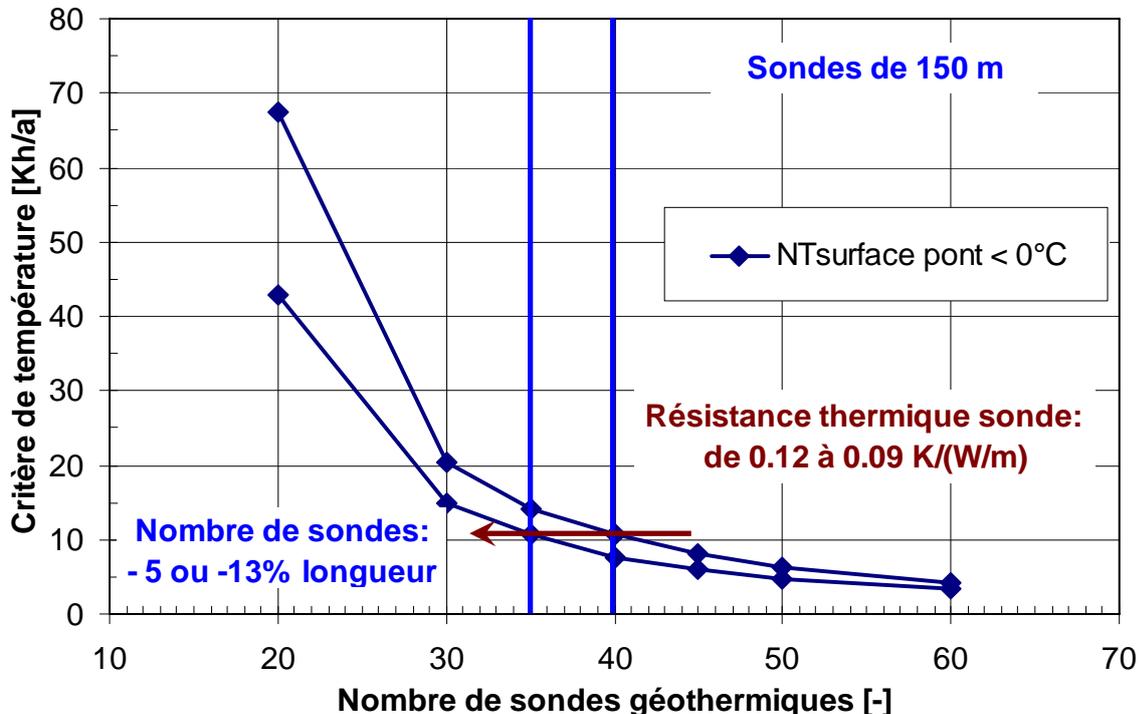


Figure 5.5 Sensibilité du critère de température à la résistance thermique des sondes géothermiques.

L'utilisation d'un matériau de remplissage plus conducteur que le traditionnel mélange de ciment et bentonite permettrait de réduire la longueur totale des sondes géothermiques de 13%, ce qui correspond à l'économie de 5 sondes de 150m sur les 40 du cas analysé. Il s'agit donc de savoir si le coût supplémentaire causé par l'utilisation du matériau de remplissage plus conducteur est inférieur à l'économie réalisée par la réduction de la longueur totale des sondes géothermiques.

5.8 Diamètre des sondes géothermiques

Dans cette section, l'influence du diamètre de forage des sondes géothermiques est évaluée sur la longueur totale des sondes géothermiques. Tous les calculs ont été exécutés avec un diamètre de forage de 0.115 m. En se basant sur le cas optimisé de la section 5.5, les simulations sont refaites avec un diamètre de 0.15 m. La résistance thermique des sondes est donc maintenue à 0.12 K/(W/m) dans les deux cas.

La figure 5.6 permet de montrer la sensibilité du critère de température NTs au diamètre de forage des sondes géothermiques, pour les deux cas de figure mentionnés ci-dessus.

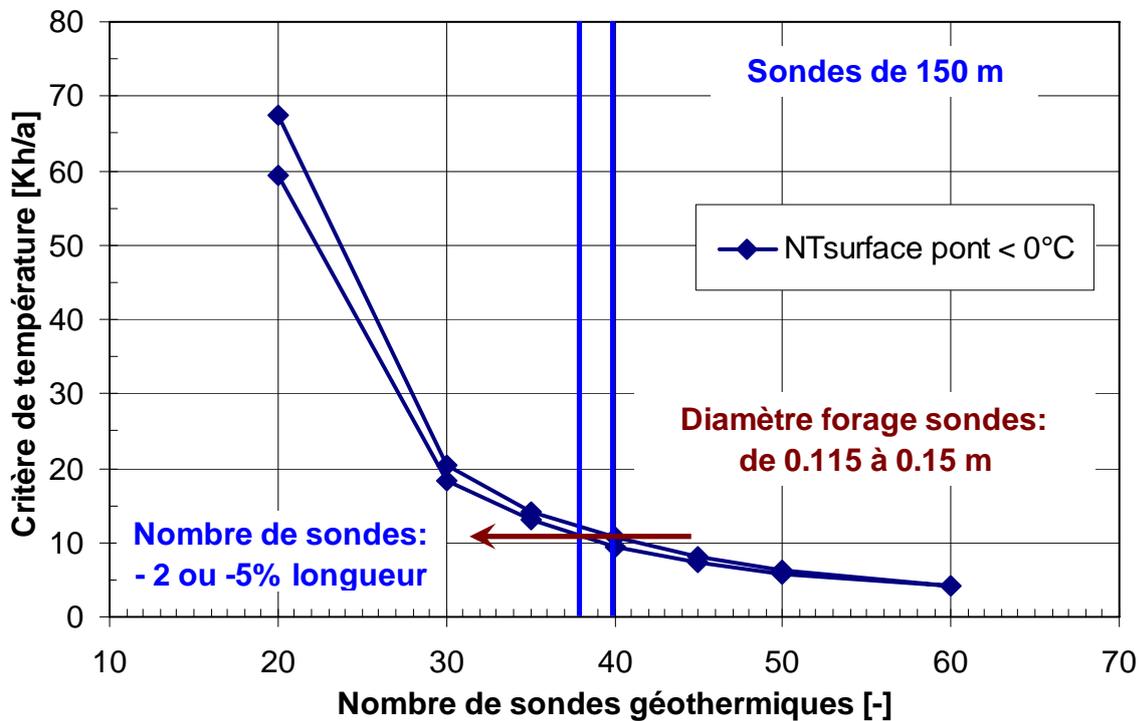


Figure 5.6 Sensibilité du critère de température au diamètre de forage des sondes géothermiques.

Un diamètre de forage plus grand (0.15 m au lieu de 0.115 m) permettrait de réduire la longueur totale des sondes géothermiques de 5%, ce qui correspond à l'économie de 2 sondes de 150m sur les 40 du cas analysé. Il s'agit donc de savoir si le coût supplémentaire causé par l'utilisation d'une machine plus puissante pour forer avec un diamètre plus grand est inférieur à l'économie réalisée par la réduction de la longueur totale des sondes géothermiques.

5.9 Isolation du pont et espacement des serpentins

Dans cette section, l'influence de l'isolation sous le pont et de l'espacement des serpentins dans la chaussée du pont est évaluée sur la longueur totale des sondes géothermiques. Le cas de référence (cas optimisé de la section 5.5) est un pont isolé avec 10 cm d'isolation sous sa face inférieure et un espacement de 25 cm des serpentins. Trois cas supplémentaires sont simulés, ce qui permet de comparer les 4 situations suivantes :

- cas 1: pont isolé avec 10 cm d'isolation dessous, espacement de 25 cm des serpentins
- cas 2: pont isolé avec 10 cm d'isolation dessous, espacement de 15 cm des serpentins
- cas 3: pont sans isolation, espacement de 25 cm des serpentins
- cas 4: pont sans isolation, espacement de 15 cm des serpentins

La figure 5.7 permet de montrer la sensibilité du critère de température NTs aux quatre variantes de pont définies ci-dessus.

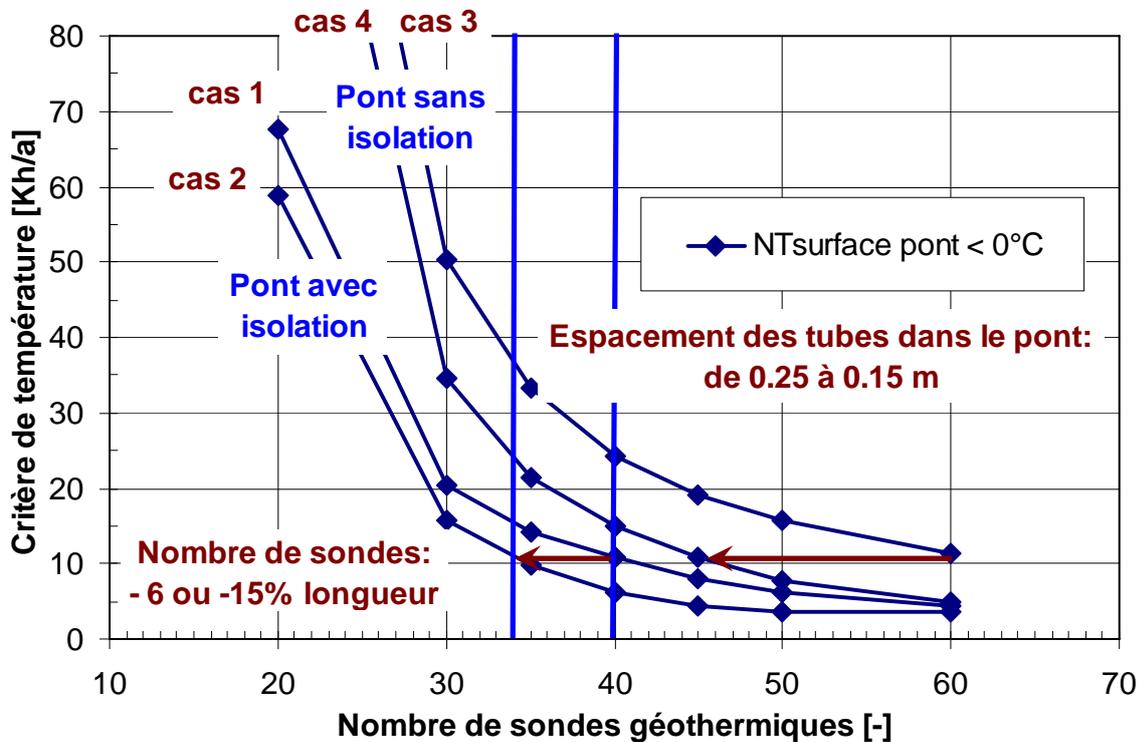


Figure 5.7 Sensibilité du critère de température aux quatre variantes de pont.

Une disposition plus serrée des serpentins (15 cm au lieu de 25 cm) permettrait de réduire la longueur totale des sondes géothermiques de 15%, ce qui correspond à l'économie de 6 sondes de 150m sur les 40 du cas analysé. L'effet est sensiblement plus important avec un pont non isolé.

Ne pas isoler le pont, tout en maintenant l'espacement des serpentins à 25 cm, nécessite une augmentation massive des sondes géothermiques. Pour le cas de référence, il faudrait augmenter la longueur des sondes géothermiques de 50%, ce qui correspond à 20 sondes

géothermiques supplémentaires sur les 40 initiales. L'effet de l'économie de l'isolation du pont pourrait également être compensée par une augmentation plus raisonnable de la longueur des sondes (+13% de la longueur totale ou 5 sondes géothermiques supplémentaires), si l'espacement des serpentins dans le pont est réduit de 25 cm à 15 cm.

La table 5.2 permet de montrer la longueur nécessaire de sonde géothermique pour le dégivrage d'un mètre carré de chaussée, de façon à ce que le critère de température NTs défini dans la section 5.1 soit respecté.

Système optimum pour différents cas de figure pour le pont du projet pilote de Serso	Longueur de sonde par mètre carré de chaussée
Cas 1 : pont isolé, serpentins espacés de 25cm	4.6 m/m ²
Cas 2 : pont isolé, serpentins espacés de 15cm	3.9 m/m ²
Cas 3 : pont non isolé, serpentins espacés de 25cm	6.9 m/m ²
Cas 4 : pont non isolé, serpentins espacés de 15cm	5.2 m/m ²

Table 5.2 Longueur de sonde par mètre carré de chaussée pour les quatre cas de pont simulé.

Pour un lieu comme Serso à Därlingen, le dégivrage d'un pont nécessite **4 à 7m de sonde géothermique pour chaque mètre carré de chaussée dégivrée**, en fonction de l'isolation ou non de la face inférieure du pont et de l'espacement des serpentins dans la chaussée.

Pour le pont de référence tel qu'il a été réalisé à Serso, les principales caractéristiques du système sont énumérées dans la section suivante.

5.10 Caractéristiques du système optimal pour le projet Serso

Les principales caractéristiques du système optimisé pour le projet de Serso sont énumérées dans la table 5.3.

Conductivité thermique moyenne du terrain	4.4 W/(mK)
Température moyenne initiale du terrain ¹⁾	11.9 °C
Nombre de sondes géothermiques	40 -
Longueur d'une sonde géothermique	150 m
Type de sonde géothermique	double-U
Résistance thermique d'une sonde géothermique	0.12 K/(W/m)
Espacement entre les sondes	5 m
Surface de chaussée de pont à dégivrer	1'300 m ²
Courbe de chauffage du pont	TS2=10°C et TS3= 4°C
Contrôle des gains solaires	EN : ΔT=8K et HORS : ΔT=4K

¹⁾ sur les 150 premiers mètres de profondeur. Température moyenne du terrain en surface : 10°C

Table 5.3 Caractéristiques du système optimal pour le projet Serso.

6. Optimisation du système pour différents sites

6.1 Introduction

Le pont simulé pour le système de Serso (cas de référence : pont isolé sur sa face inférieure et espacement des serpentins de 25 cm dans la chaussée), est utilisé pour dimensionner le système dans d'autres endroits géographiques. Dans ce chapitre, le système est simulé pour les sites suivants :

- Serso – Därlingen (nord des Alpes) ;
- Faido (sud des Alpes sur l'axe du Gotthard) ;
- Wassen (nord des Alpes sur l'axe du Gotthard) ;
- Zürich ;
- Stockholm.

Le même critère de température NTs est utilisé pour obtenir le système optimal (NTs < 10 Kh/a). Les simulations sont exécutées pour 4 valeurs différentes de conductivité thermique de terrain (1, 2, 3 et 4 W/(mK)). Tout en maintenant l'espacement et la longueur des sondes à respectivement 5 et 150 m, le nombre de sondes géothermiques est varié pour déterminer le système optimal.

La simulation du système dans un autre endroit géographique nécessite d'adapter les paramètres liés au site, définis dans la section « Weather parameters » du programme BRIDGESIM. Ce sont la latitude, la longitude relative et l'altitude du lieu, et le fichier contenant les données météorologiques pour une année type en valeurs horaires. La température initiale du terrain doit également être adaptée (paramètre TGRDIN). Elle est fixée à une valeur qui est 1 K plus élevée que la température moyenne annuelle de l'air. Le gradient de température géothermique, quant à lui, n'est pas modifié. Il est maintenu constant à 25 K/km. Finalement la courbe de chauffage doit être recalculée pour le site en question.

6.2 Système simulé à Serso -Därlingen

Les caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Serso - Därlingen, obtenues avec le logiciel Meteonorm 5.1 (Remund et Kunz, 2004), sont résumées dans la table 6.1.

Site	Serso – Därlingen	
Altitude	560 m	
Latitude	46.4°	
Longitude	7.5° Est	
Situation	voisinage d'un lac	
Température	moyenne annuelle de l'air	8.9°C
	moyenne journalière minimum de l'air	-6.7°C
	moyenne journalière maximum de l'air	23.4°C
Ensoleillement horizontal annuel	1'170 kWh/(m ² a)	
Ensoleillement horizontal annuel avec effet de l'horizon lointain ¹⁾	1'120 kWh/(m ² a)	

¹⁾ les simulations sont effectuées avec la prise en compte de l'horizon lointain

Table 6.1 Caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Serso – Därlingen.

La courbe de chauffage, déjà calculée dans le chapitre 4, est montrée à nouveau dans la table 6.2.

Pont de référence	isolation sous la face inférieure du pont	
espacement tubes : 25 cm	<p>TS2 10°C TS3 4°C Ta [°C]</p>	<p>Pour $T_s < 0^\circ\text{C}$ et $T_a > -4^\circ\text{C}$ $NT_s = 2.6 \text{ Kh/an}$ Energie de chauffage : $Q_{ch} = 153 \text{ MWh/an}$</p>

Table 6.2 Courbe de chauffage pour le pont de référence situé à Serso – Därlingen.

Les résultats des simulations sont montrés dans la figure 6.1.

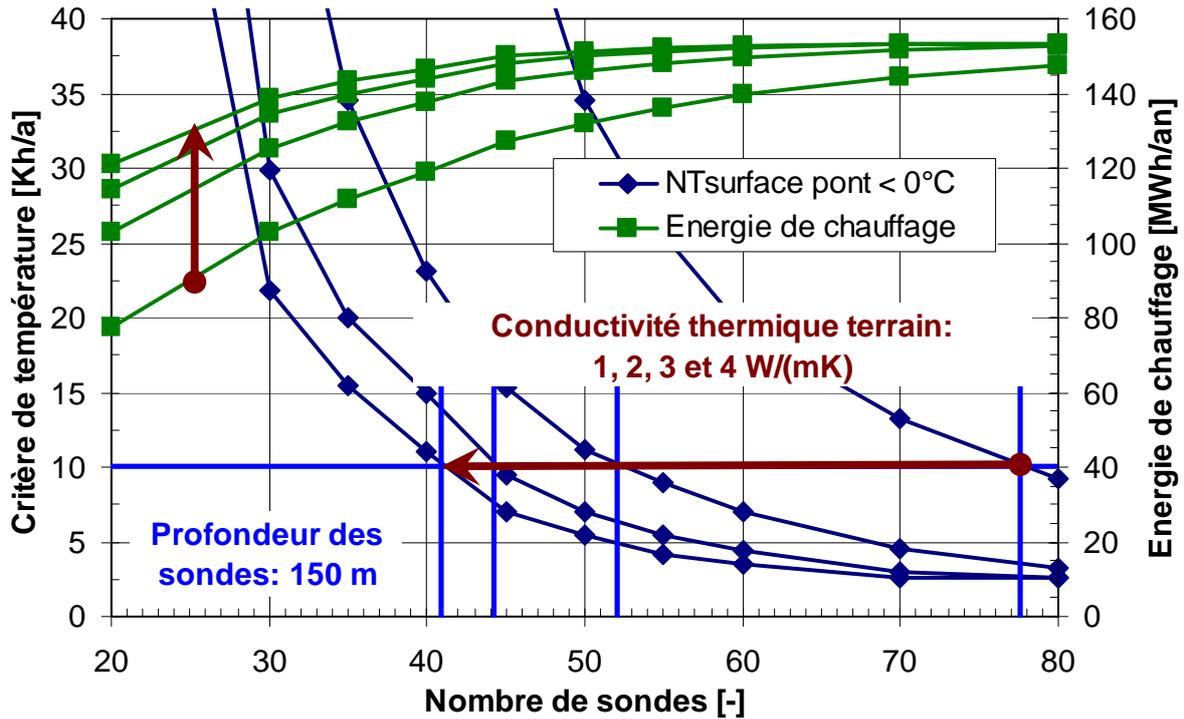


Figure 6.1 Sensibilité du critère de température à la conductivité thermique du terrain pour le système de référence simulé à Serso - Därlingen. Le système optimal est celui qui permet de satisfaire la valeur maximum tolérée du critère de température avec le nombre minimum de sondes géothermiques.

La figure 6.1 permet de déterminer le système optimal en fonction de la conductivité thermique du terrain. La longueur de sonde par mètre carré de surface de pont chauffé dépend fortement de cette dernière. Une valeur inférieure à 2 W/(mK) nécessite une longueur de sonde sensiblement plus importante. Les valeurs obtenues sont énumérées dans la table 6.3.

Système optimum pour le pont de référence simulé à Serso – Därlingen	Longueur de sonde par mètre carré de chaussée
conductivité thermique du terrain : 1 W/(mK)	8.9 m/m ²
conductivité thermique du terrain : 2 W/(mK)	6.0 m/m ²
conductivité thermique du terrain : 3 W/(mK)	5.1 m/m ²
conductivité thermique du terrain : 4 W/(mK)	4.7 m/m ²

Table 6.3 Longueur de sonde par mètre carré de chaussée pour le système simulé à Serso – Därlingen en fonction de la conductivité thermique du terrain.

6.3 Système simulé à Faido

Les caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Faido, obtenues avec le logiciel Meteonorm 5.1 (Remund et Kunz, 2004), sont résumées dans la table 6.4.

Site	Faido
Altitude	715 m
Latitude	46.3°
Longitude	8.5° Est
Situation	vallée à foehn
Température moyenne annuelle de l'air	9.9°C
moyenne journalière minimum de l'air	-4.9°C
moyenne journalière maximum de l'air	23.7°C
Ensoleillement horizontal annuel	1'260 kWh/(m ² a)
Ensoleillement horizontal annuel avec effet de l'horizon lointain ¹⁾	1'150 kWh/(m ² a)

¹⁾ les simulations sont effectuées avec la prise en compte de l'horizon lointain

Table 6.4 Caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Faido.

La courbe de chauffage, recalculée pour le site de Faido, est montrée dans la table 6.5.

Pont de référence	isolation sous la face inférieure du pont	
espacement tubes : 25 cm		Pour $T_s < 0^\circ\text{C}$ et $T_a > -4^\circ\text{C}$ $NT_s = 2.0 \text{ Kh/an}$ Energie de chauffage : $Q_{ch} = 150 \text{ MWh/an}$

Table 6.5 Courbe de chauffage pour le pont de référence situé à Faido.

Les résultats des simulations sont montrés dans la figure 6.2.

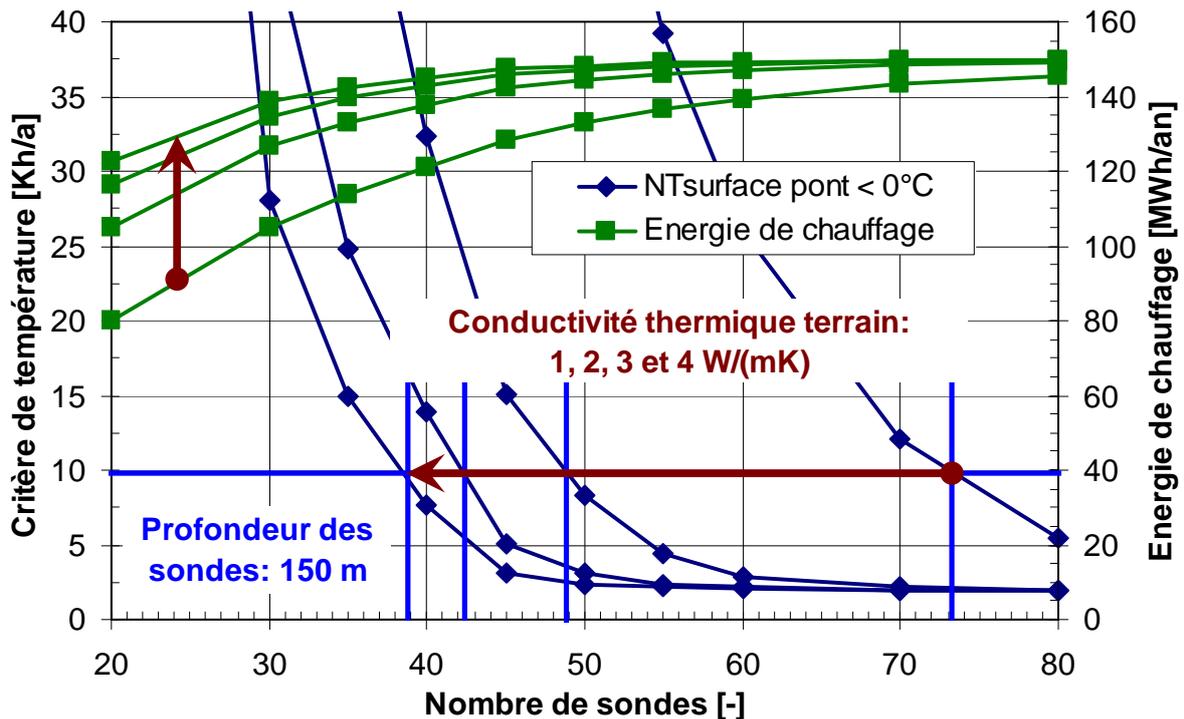


Figure 6.2 Sensibilité du critère de température à la conductivité thermique du terrain pour le système de référence simulé à Faïdo. Le système optimal est celui qui permet de satisfaire la valeur maximum tolérée du critère de température avec le nombre minimum de sondes géothermiques.

La figure 6.2 permet de déterminer le système optimal en fonction de la conductivité thermique du terrain. Comme pour Serso, la longueur de sonde par mètre carré de surface de pont chauffé dépend fortement de cette dernière, et de façon très forte pour les faibles valeurs. Les résultats obtenus sont énumérés dans la table 6.6.

Système optimum pour le pont de référence simulé à Faïdo	Longueur de sonde par mètre carré de chaussée
conductivité thermique du terrain : 1 W/(mK)	8.4 m/m ²
conductivité thermique du terrain : 2 W/(mK)	5.7 m/m ²
conductivité thermique du terrain : 3 W/(mK)	4.9 m/m ²
conductivité thermique du terrain : 4 W/(mK)	4.5 m/m ²

Table 6.6 Longueur de sonde par mètre carré de chaussée pour le système simulé à Faïdo en fonction de la conductivité thermique du terrain.

6.4 Système simulé à Wassen

Les caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Wassen, obtenues avec le logiciel Meteonorm 5.1 (Remund et Kunz, 2004), sont résumées dans la table 6.7.

Site	Wassen
Altitude	931 m
Latitude	46.4°
Longitude	8.4° Est
Situation	fond de vallée
Température moyenne annuelle de l'air	7.0°C
moyenne journalière minimum de l'air	-8.9°C
moyenne journalière maximum de l'air	20.7°C
Ensoleillement horizontal annuel	1'250 kWh/(m ² a)
Ensoleillement horizontal annuel avec effet de l'horizon lointain ¹⁾	1'070 kWh/(m ² a)

¹⁾ les simulations sont effectuées avec la prise en compte de l'horizon lointain

Table 6.7 Caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Wassen.

La courbe de chauffage, recalculée pour le site de Wassen, est montrée dans la table 6.8.

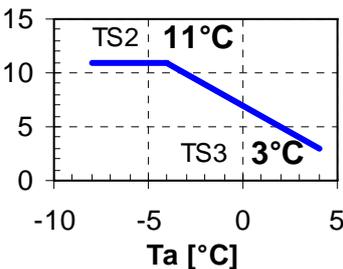
Pont de référence	isolation sous la face inférieure du pont	
espacement tubes : 25 cm		Pour $T_s < 0^\circ\text{C}$ et $T_a > -4^\circ\text{C}$ $NT_s = 2.5 \text{ Kh/an}$ Energie de chauffage : $Q_{ch} = 238 \text{ MWh/an}$

Table 6.8 Courbe de chauffage pour le pont de référence situé à Wassen.

Les résultats des simulations sont montrés dans la figure 6.3.

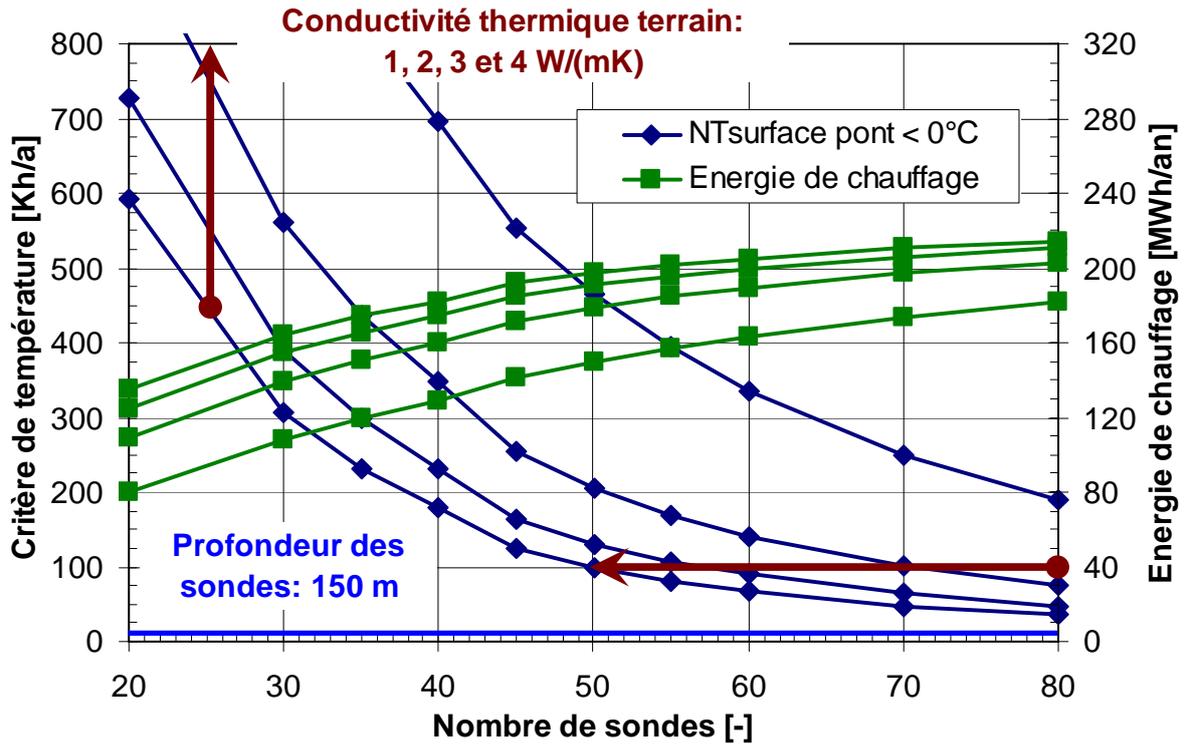


Figure 6.3 Sensibilité du critère de température à la conductivité thermique du terrain pour le système de référence simulé à Wassen. Le système optimal est celui qui permet de satisfaire la valeur maximum tolérée du critère de température avec le nombre minimum de sondes géothermiques.

La figure 6.3 ne permet pas de déterminer de système optimal, même pour une conductivité thermique du terrain élevée. Une augmentation de la longueur des sondes ne permet pas d'abaisser sensiblement le critère de température. Il est possible que la limite fixée pour le critère soit trop basse et reste en dessous de l'asymptote horizontale vers laquelle tendent les courbes simulées. Dans ce cas, si un tel système est malgré tout souhaité, il est nécessaire d'augmenter significativement le niveau de tolérance et d'accepter une longueur des sondes géothermiques importantes.

6.5 Système simulé à Zürich

Les caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Zürich, obtenues avec le logiciel Meteonorm 5.1 (Remund et Kunz, 2004), sont résumées dans la table 6.9.

Site	Zürich
Altitude	413 m
Latitude	47.2°
Longitude	8.3° Est
Situation	lac
Température moyenne annuelle de l'air	9.3°C
moyenne journalière minimum de l'air	-8.5°C
moyenne journalière maximum de l'air	24.4°C
Ensoleillement horizontal annuel	1'090 kWh/(m ² a)
Ensoleillement horizontal annuel avec effet de l'horizon lointain ¹⁾	1'090 kWh/(m ² a)

¹⁾ les simulations sont effectuées avec la prise en compte de l'horizon lointain

Table 6.9 Caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Zürich.

La courbe de chauffage, recalculée pour le site de Zürich, est montrée dans la table 6.10.

Pont de référence	isolation sous la face inférieure du pont	
espacement tubes : 25 cm		Pour $T_s < 0^\circ\text{C}$ et $T_a > -4^\circ\text{C}$ $NT_s = 2.4 \text{ Kh/an}$ Energie de chauffage : $Q_{ch} = 99 \text{ MWh/an}$

Table 6.10 Courbe de chauffage pour le pont de référence situé à Zürich.

Les résultats des simulations sont montrés dans la figure 6.4.

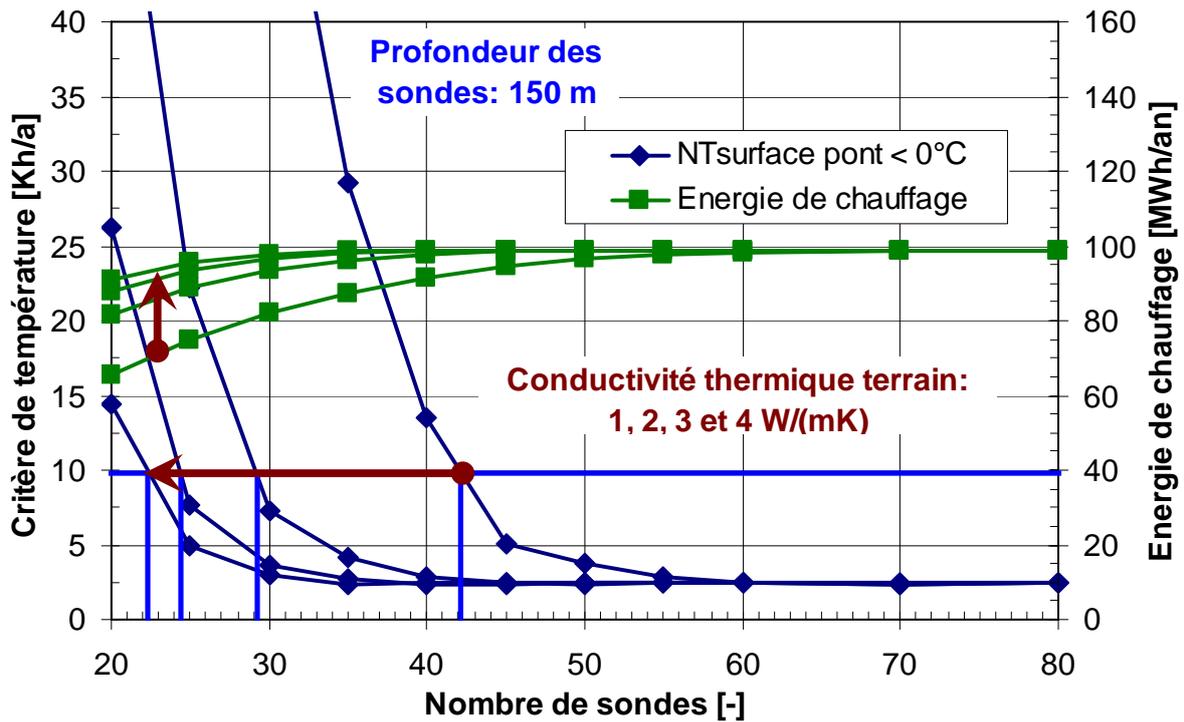


Figure 6.4 Sensibilité du critère de température à la conductivité thermique du terrain pour le système de référence simulé à Zürich. Le système optimal est celui qui permet de satisfaire la valeur maximum tolérée du critère de température avec le nombre minimum de sondes géothermiques.

La figure 6.4 permet de déterminer le système optimal en fonction de la conductivité thermique du terrain. La longueur de sonde par mètre carré de surface de pont chauffé dépend fortement de cette dernière. Les valeurs obtenues sont énumérées dans la table 6.11.

Système optimum pour le pont de référence simulé à Zürich	Longueur de sonde par mètre carré de chaussée
conductivité thermique du terrain : 1 W/(mK)	4.8 m/m ²
conductivité thermique du terrain : 2 W/(mK)	3.3 m/m ²
conductivité thermique du terrain : 3 W/(mK)	2.8 m/m ²
conductivité thermique du terrain : 4 W/(mK)	2.5 m/m ²

Table 6.11 Longueur de sonde par mètre carré de chaussée pour le système simulé à Zürich en fonction de la conductivité thermique du terrain.

6.6 Système simulé à Stockholm

Les caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Stockholm, obtenues avec le logiciel Meteonorm 5.1 (Remund et Kunz, 2004), sont résumées dans la table 6.12.

Site	Stockholm
Altitude	15 m
Latitude	59.2°
Longitude	18.1° Est
Situation	Ville
Température moyenne annuelle de l'air	6.7°C
moyenne journalière minimum de l'air	-15.1°C
moyenne journalière maximum de l'air	24.4°C
Ensoleillement horizontal annuel	980 kWh/(m ² a)
Ensoleillement horizontal annuel avec effet de l'horizon lointain ¹⁾	970 kWh/(m ² a)

¹⁾ les simulations sont effectuées avec la prise en compte de l'horizon lointain

Table 6.12 Caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Stockholm.

La courbe de chauffage, recalculée pour le site de Stockholm, est montrée dans la table 6.13.

Pont de référence	isolation sous la face inférieure du pont	
espacement tubes : 25 cm		<p>Pour $T_s < 0^\circ\text{C}$ et $T_a > -4^\circ\text{C}$ $NT_s = 1.4 \text{ Kh/an}$ Energie de chauffage : $Q_{ch} = 256 \text{ MWh/an}$</p>

Table 6.13 Courbe de chauffage pour le pont de référence situé à Stockholm.

Les résultats des simulations sont montrés dans la figure 6.5.

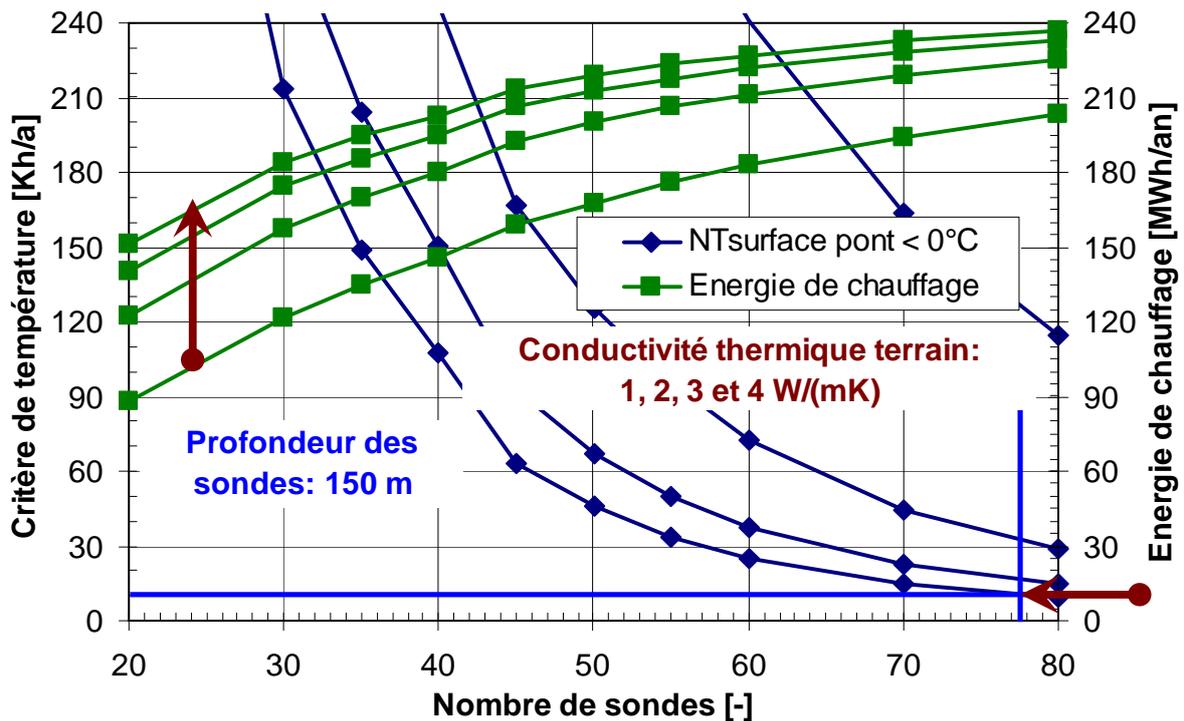


Figure 6.5 Sensibilité du critère de température à la conductivité thermique du terrain pour le système de référence simulé à Stockholm. Le système optimal est celui qui permet de satisfaire la valeur maximum tolérée du critère de température avec le nombre minimum de sondes géothermiques.

La figure 6.5 ne permet la détermination d'un système optimal que pour la valeur de conductivité thermique la plus élevée du terrain. A noter que la valeur de 4 W/(mK) est souvent rencontrée dans la région de Stockholm, étant donné que le type de rocher est généralement granitique. La valeur obtenue est énumérée dans la table 6.14.

Système optimum pour le pont de référence simulé à Stockholm	Longueur de sonde par mètre carré de chaussée
conductivité thermique du terrain : 4 W/(mK)	8.9 m/m ²

Table 6.11 Longueur de sonde par mètre carré de chaussée pour le système simulé à Stockholm en fonction de la conductivité thermique du terrain.

6.7 Synthèse des résultats

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. Dans le graphe de la figure 6.6, 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. Pour rappel, 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 les différentes variantes de pont à Serso sont également montrées. Ces cas ont été simulés avec un terrain dont la conductivité thermique moyenne est de 4.4 W/(mK).

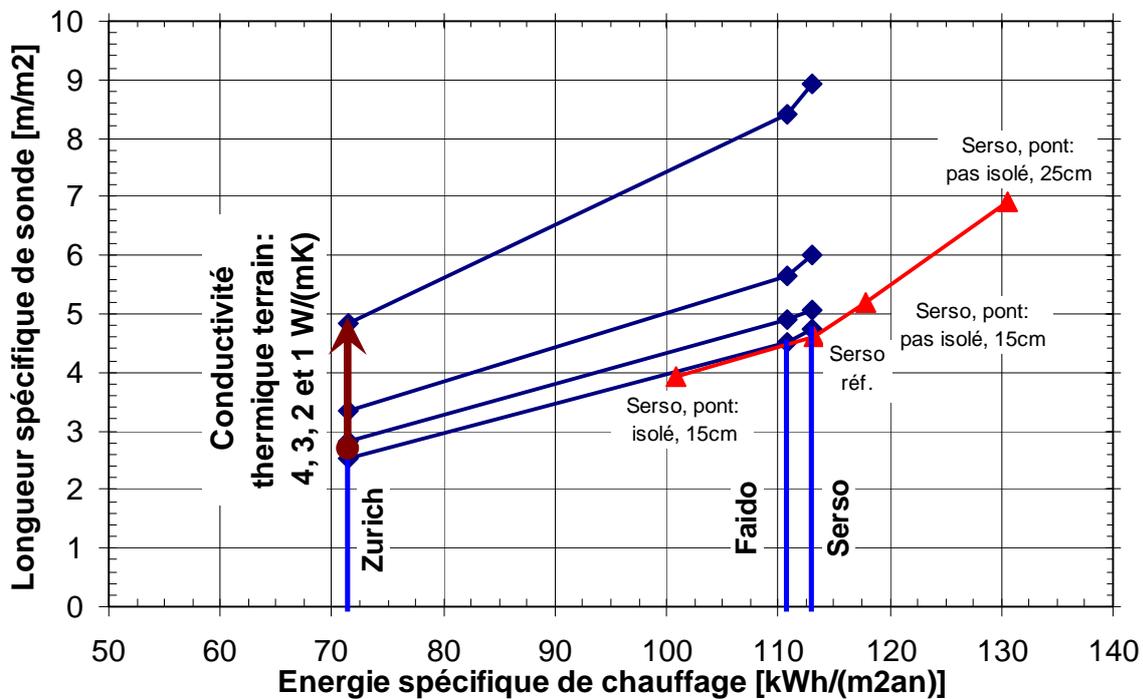


Figure 6.6 Longueur spécifique en fonction de l'énergie spécifique de chauffage pour le dégivrage du pont pour différentes valeurs de la conductivité thermique du terrain.

Pour le site de Wassen, aucune solution n'a été trouvée avec une longueur spécifique de sonde inférieure à 10 m/m². L'énergie de chauffage spécifique a été calculée à 180 kWh/(m²an). 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 kWh/(m²an). Pour ce cas, un système avec une longueur spécifique de sonde inférieure à 10 m/m² est malgré tout possible si la conductivité thermique du terrain est

supérieure à 4 W/(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 10m/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. Sensibilité aux paramètres thermiques du terrain

Dans ce chapitre, la sensibilité de la longueur spécifique de sonde aux principaux paramètres thermiques du terrain est calculée. L'influence de la conductivité thermique a déjà été mise en évidence dans les chapitres précédents. Trois autres paramètres liés aux caractéristiques du milieu souterrain sont considérés. Ce sont la température initiale moyenne, la vitesse de Darcy d'un écoulement souterrain et la capacité thermique volumique.

Le cas de Serso est sélectionné mais avec une conductivité thermique du terrain de 3 W/(mK). Le système optimisé avec le pont réalisé est utilisé comme référence pour l'étude de sensibilité.

7.1 Sensibilité à la conductivité thermique du terrain

En reprenant les calculs du chapitre précédent, le critère de température est montré en fonction de la longueur de sonde dans la figure 7.1 pour 3 valeurs de conductivité thermique du terrain : 2, 3 et 4 W/(mK).

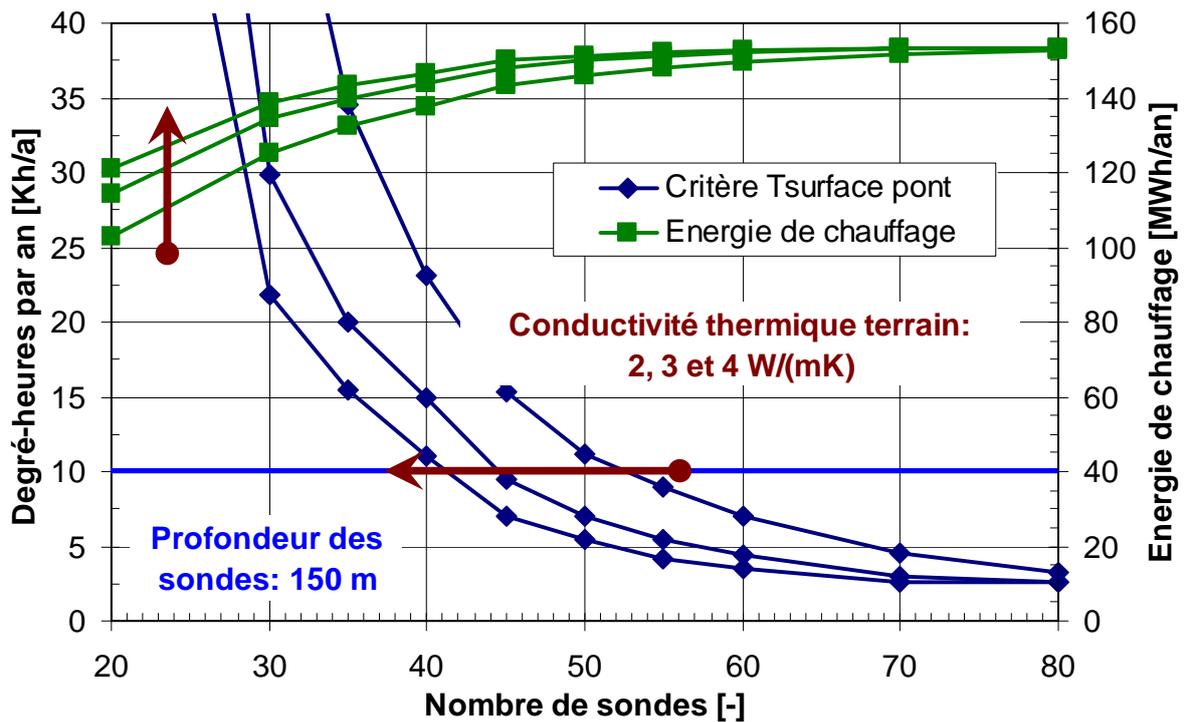


Figure 7.1 Sensibilité du critère de température à la conductivité thermique du terrain pour le système de référence simulé à Serso-Därblingen.

Dans la table 7.1, la sensibilité de la longueur spécifique de sonde à la conductivité thermique du terrain est indiquée pour le critère de température NTs fixé à 10 Kh/a.

Système optimum pour le pont de référence simulé à Serso - Därlingen	Longueur de sonde par mètre carré de chaussée	
conductivité thermique du terrain : 2 W/(mK)	6.1 m/m ²	+18%
3 W/(mK)	5.1 m/m ²	0%
4 W/(mK)	4.8 m/m ²	-7%

Table 7.1 Sensibilité de la longueur de sonde par mètre carré de chaussée à la conductivité thermique du terrain pour le système simulé à Serso - Därlingen.

7.2 Sensibilité à la température initiale du terrain

La température moyenne initiale du terrain peut être plus élevée ou plus basse en fonction du gradient géothermique et de la température du terrain vers la surface. En partant de l'hypothèse que la température du terrain vers la surface est conditionnée par les conditions météorologiques et reste invariable pour un lieu déterminé, le gradient géothermique est varié de façon à ce que la température moyenne du terrain sur les 150 premiers mètres varie par pas de 1K. Dans la figure 7.2, le critère de température est montré en fonction de la longueur de sonde pour 3 valeurs de température moyenne initiale du terrain : 10.9, 11.9 et 12.9 °C.

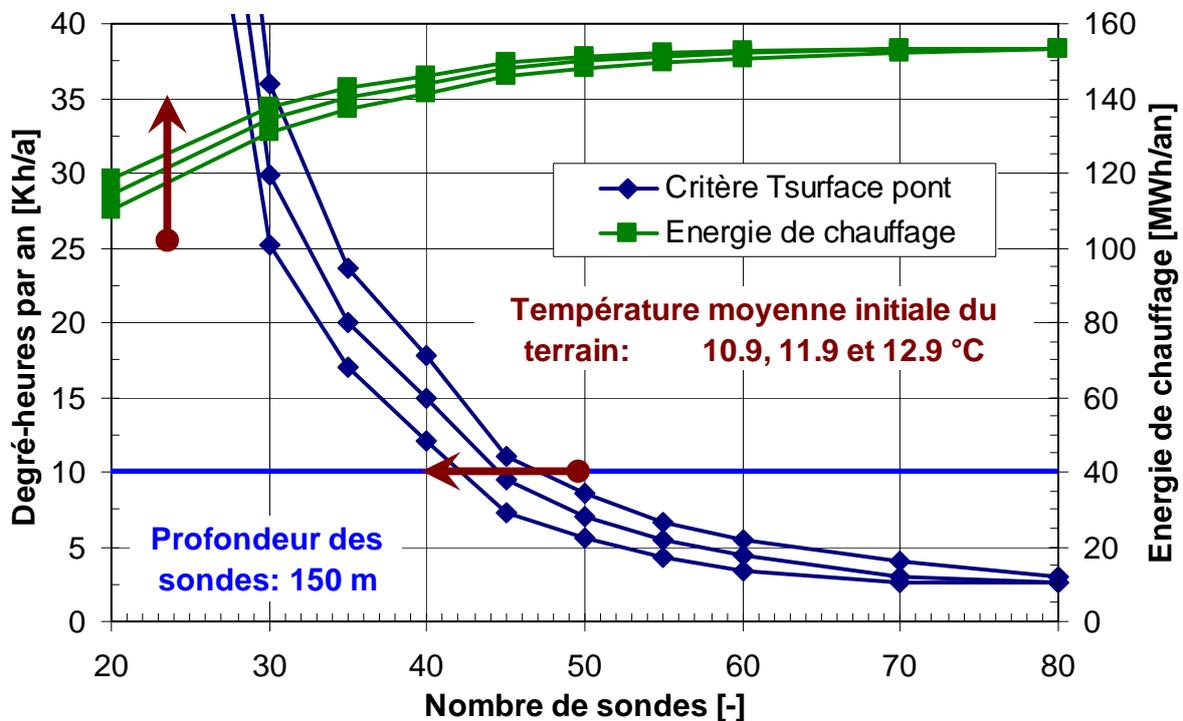


Figure 7.2 Sensibilité du critère de température à la température initiale du terrain pour le système de référence simulé à Serso-Därlingen.

Dans la table 7.2, la sensibilité de la longueur spécifique de sonde à la température moyenne initiale du terrain est indiquée pour le critère de température NTs fixé à 10 Kh/a.

Système optimum pour le pont de référence simulé à Serso – Därlingen		Longueur de sonde par mètre carré de chaussée	
température moyenne initiale	10.9 °C	5.4 m/m ²	+6%
du terrain :	11.9 °C	5.1 m/m ²	0%
	12.9 °C	4.9 m/m ²	-5%

Table 7.2 Sensibilité de la longueur de sonde par mètre carré de chaussée à la température moyenne initiale du terrain pour le système simulé à Serso - Därlingen.

7.3 Sensibilité à la capacité thermique volumique

Dans la figure 7.3, le critère de température est montré en fonction de la longueur de sonde pour 3 valeurs de capacité thermique volumique du terrain : 1.7, 2.2 et 2.7 MJ/(m³K).

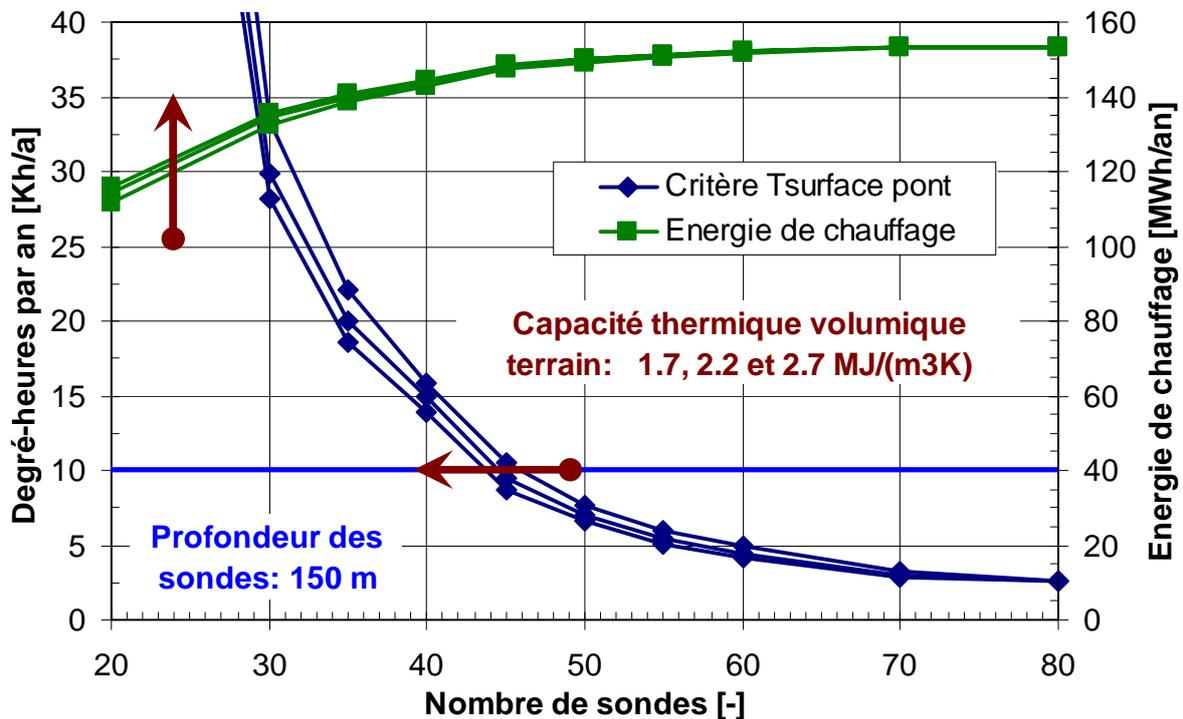


Figure 7.3 Sensibilité du critère de température à la capacité thermique volumique du terrain pour le système de référence simulé à Serso-Därlingen.

Dans la table 7.3, la sensibilité de la longueur spécifique de sonde à la capacité thermique volumique du terrain est indiquée pour le critère de température NTs fixé à 10 Kh/a.

Système optimum pour le pont de référence simulé à Serso - Därlingen		Longueur de sonde par mètre carré de chaussée	
Capacité thermique volumique	1.7 MJ/(m ³ K)	5.3 m/m ²	+3%
du terrain :	2.2 MJ/(m ³ K)	5.1 m/m ²	0%
	2.7 MJ/(m ³ K)	5.0 m/m ²	-2%

Table 7.3 Sensibilité de la longueur de sonde par mètre carré de chaussée à la capacité thermique volumique du terrain pour le système simulé à Serso - Därlingen.

7.4 Sensibilité à l'écoulement de l'eau souterraine

La sensibilité à l'écoulement de l'eau souterraine est calculé pour deux cas de figure. Un écoulement dans une couche de terrain de faible épaisseur (2 m) et localisée vers la surface, entre -7 et -9 m, et donc encore sous l'influence des variations saisonnières des conditions météorologiques. Et un écoulement dans une couche de terrain d'épaisseur extrême (100 m), située entre -7 et -107 m. Les résultats des simulations sont à considérer de façon indicative, puisque les calculs liés au déplacement de l'eau souterraine sont basés sur des approximations dans le modèle de stockage diffusif utilisé dans BRIDGESIM (voir Pahud et al., 1996).

Les deux cas de figure sont présentés dans les figures 7.4 et 7.5. Le critère de température est montré en fonction de la longueur de sonde pour diverses valeurs de vitesse d'écoulement de l'eau souterraine : 0, 0.01, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 10 et 100 m/jour.

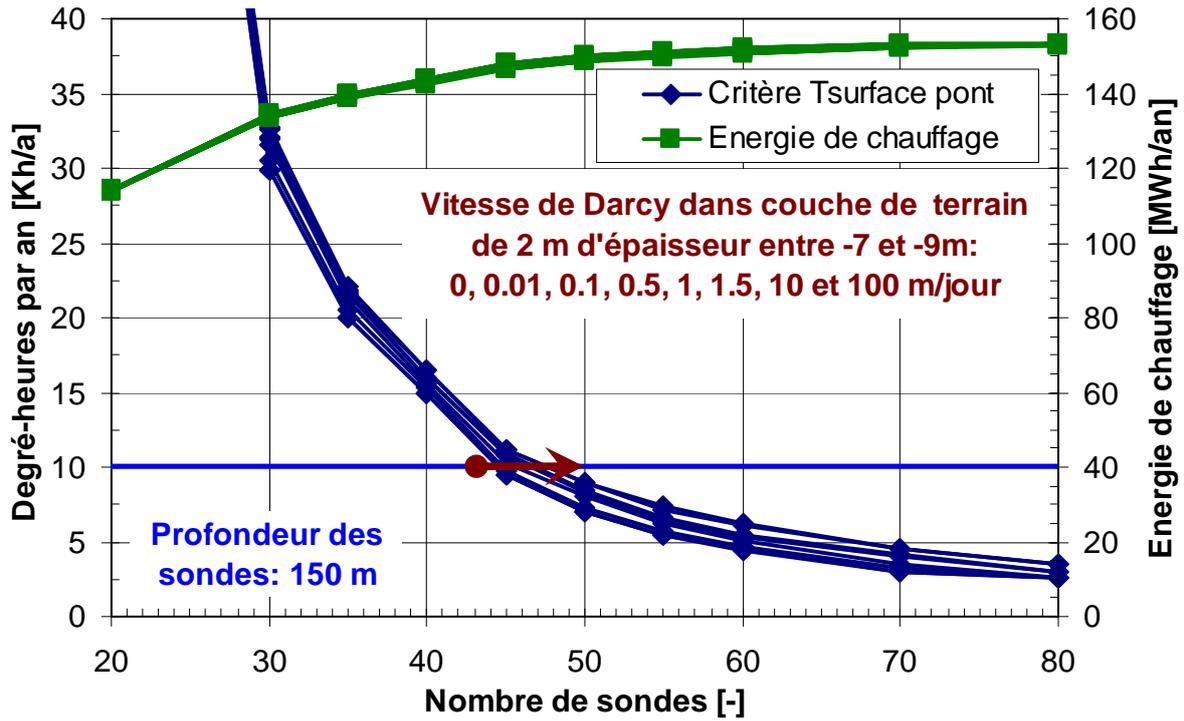


Figure 7.4 Sensibilité du critère de température à la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine dans une couche de 2 m d'épaisseur pour le système de référence simulé à Serso-Därtingen.

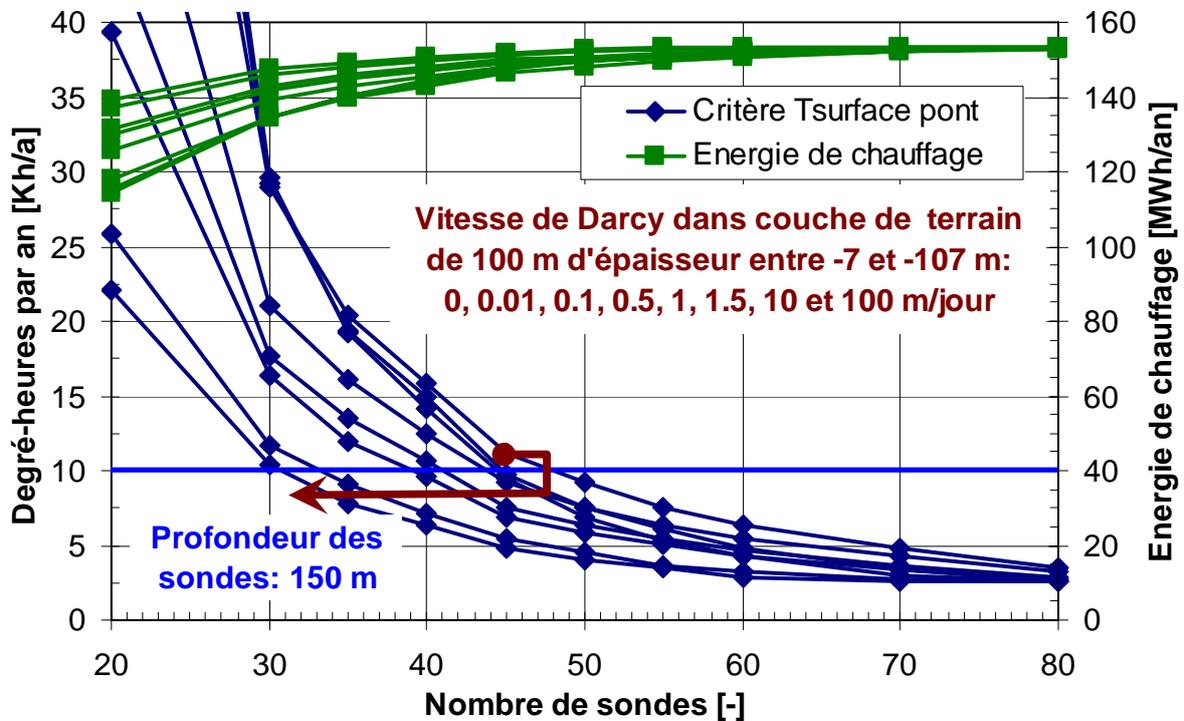


Figure 7.5 Sensibilité du critère de température à la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine dans une couche de 100 m d'épaisseur pour le système de référence simulé à Serso-Därtingen.

Dans le premier cas de figure, avec la couche de 2 m d'épaisseur située vers la surface, l'influence reste relativement modeste, même pour des déplacements d'eau très importants. L'effet est une augmentation de la longueur des sondes, en raison d'une amenée d'eau dont la température moyenne annuelle est de 10°C, valeur qui est plus basse que la température moyenne du terrain sur les premiers 150 mètres de profondeur. L'effet se fait sentir à partir d'une vitesse de Darcy de 0.5 à 1.0 m/jour, mais il reste inférieur à 10%.

Dans le deuxième cas de figure, avec la couche de 100 m d'épaisseur, l'influence est négative pour une vitesse de Darcy de 0.1 m/jour (augmentation de la longueur des sondes de 8%), et devient positive pour des vitesses supérieures. L'effet permettrait une réduction de la longueur des sondes d'environ 10% pour une vitesse de Darcy de 1 à 1.5 m/jour, et continuerait à augmenter avec des vitesses supérieures pour se stabiliser vers une réduction de 30% de la longueur des sondes.

Mis à part un écoulement de l'eau souterraine important dans une couche d'épaisseur significative, le paramètre prépondérant sur le dimensionnement du système reste la conductivité thermique du terrain. Vient ensuite la température initiale du terrain dans la couche traversée par les sondes. L'influence de la capacité thermique volumique du terrain, quant à elle, est un effet de faible importance.

8. Conclusions

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 dans cette étude pour développer et valider un outil de simulation pour ce type de système. L'outil de simulation, appelé BRIDGESIM, est appliqué au système de façon à illustrer la procédure proposée pour un dimensionnement. Les résultats sont présentés de façon à montrer l'influence des principaux paramètres de dimensionnement. Appliqué à d'autres endroits géographiques, des règles simples pour effectuer un pré-dimensionnement ont été établies.

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 kWh/(m²an), un système comme celui de Serso ne peut plus satisfaire la demande de chauffage. Pour des valeurs plus basses, la longueur spécifique de sonde peut varier de 2 à près de 10 m/m² (l'unité de surface se réfère à la surface de pont dégivrée).

Pour ce qui concerne le terrain, la conductivité thermique reste le paramètre qui a l'influence la plus importante si un écoulement de l'eau souterraine ne traverse pas le stockage dans une couche de terrain de forte épaisseur et avec une vitesse de Darcy élevée. L'effet d'un écoulement de l'eau souterraine est positif si l'arrivée d'eau n'a pas une température inférieure à la température moyenne du terrain non perturbé dans le volume du stockage (soit avant la mise en service du système).

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.

9. Remerciements

L'Office Fédéral de l'Énergie est remercié pour son soutien financier sans lequel cette étude n'aurait pas pu être effectuée. L'Abteilung Energietechnik de la Berner Fachhochschule (HTA Burgdorf) est également vivement remerciée pour la disponibilité et la mise à disposition des mesures effectuées sur l'installation. Enfin, toutes les personnes impliquées d'une manière ou d'une autre dans ce travail sont également remerciées.

10. Références

- Fromentin A., Pahud D., Jaquier C. et Morath M. (1997) Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs. Empfehlungen für Energiepfahlsysteme, Rapport final, décembre 1997, Office fédéral de l'énergie, Bern, Switzerland.
- Hellström G. (1989) Duct Ground Heat Storage Model, Manual for Computer Code. Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- Hellström G. and Nordell B. (1988) A Posteriori Study and Redesign of Large-Scale Borehole Heat Store in Luleå, Sweden. Proceedings of JIGASTOCK'88, Versailles, France.
- Hellström G., Sanner B. (2000): Earth Energy Designer, User's Manual, version 2.0 (<http://www.blocon.se/earth.htm>).
- Hopkirk R. J., Hess K., Eugster W. J. und Knobel P. (1994) Serso: Pilotprojekt zur Sonnenenergie rückgewinnung aus Strassenoberflächen. Technischer Bericht, Bundesamt für Strassenbau und Tiefbauamt des Kantons Bern, Bern.
- Hopkirk R., Hess K. und Eugster W. (1995) Erdwärmesonden-Speicher zur Strassenheizung bei Därlingen, Schweiz, Polydynamics Ltd., Zürich, Schweiz.
- Klein S. A. et al. (2005) TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Version 15.3. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.
- Koschütz M. and Dorer V. (1996) Design of Air Systems with Concrete Slab Cooling. Roomvent'96, 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, Yokohama, Japan.
- Mazzarella L. (1993) Duct Thermal Storage Model. Lund-DST. TRNSYS 13.1 Version 1993. ITW, Universität Stuttgart, Germany, Dipartimento di Energetica, Politecnico di Milano, Italy.
- Pahud D. (1993) Etude du Centre Industriel et Artisanal Marcinhès à Meyrin (GE). Rapport final. GAP et CUEPE, Univ. de Genève.
- Pahud D. (1999) PILESIM - LASSEN. Simulation Tool for Heating/Cooling Systems with Heat Exchanger Piles or Borehole Heat Exchangers. User Manual. Swiss Federal Office of Energy, Switzerland.
- Pahud D. (2007) PILESIM2: Simulation Tool for Heating/Cooling Systems with Energy Piles or multiple Borehole Heat Exchangers. User Manual. ISAAC – DACD – SUPSI, Switzerland.
- Pahud D. (2007) 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.
- Pahud D. and Hellström G. (1996) The New Duct Ground Heat Model for TRNSYS. EURO THERM, Physical Models for Thermal Energy Stores. A.A. van Steenhoven and W.G.L van Helden (eds), March 25-27, pp. 127 – 136, Eindhoven, The Netherlands.
- 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. LASSEN - DGC- EPFL, Switzerland.

- Remund J. and Kunz S. (2004) Meteonorm Version 5.1. Global meteorological database for applied climatology. www.meteonorm.com
- Sommer M. (1999) Serso, Sonnenenergieerückgewinnung aus Strassenoberflächen, Messkampagne und Simulation des saisonalen Erdspeichers. Zwischenbericht, Bundesamt für Energie, Bern.

Annexe 1: Simulation du stockage de chaleur dans le terrain de l'installation Serso et calibrage sur deux ans de mesure

Table des matières:

A1. Simulation du stockage de chaleur dans le terrain de l'installation Serso et calibrage sur deux ans de mesure	p. A1.1
A1.1 Modèle de stockage	p. A1.1
A1.2 Mesures effectuées sur le stockage	p. A1.1
A1.2.1 Puissances thermiques transférées.....	p. A1.2
A1.2.2 Température moyenne du stockage diffusif.....	p. A1.3
A1.2.3 Capacité thermique du stockage.....	p. A1.3
A1.3 Etablissement des paramètres de simulation	p. A1.4
A1.3.1 Paramètres relatifs au stockage.....	p. A1.5
A1.3.2 Paramètres relatifs au terrain.....	p. A1.6
A1.3.3 Conditions initiales.....	p. A1.7
A1.4 Comparaison simulation - mesure	p. A1.8
A1.5 Conclusion	p. A1.13
Références	p. A1.13

A1. Simulation du stockage de chaleur dans le terrain de l'installation Serso et calibrage sur deux ans de mesure

A1.1 Modèle de stockage

Le modèle de calcul utilisé pour simuler le comportement thermique du stockage est basé sur le modèle DST (Hellström, 1989), développé à l'université de Lund en Suède. Le stockage a un échangeur de chaleur souterrain, formé dans notre cas par un ensemble de sondes géothermiques, qui permet de transférer de l'énergie thermique entre la zone de stockage et le fluide caloporteur qui circule dans les sondes. Le modèle calcule, en particulier, la relation entre la température d'entrée du fluide (et son débit) et la puissance thermique transférée pour des conditions d'exploitation arbitraires.

Le modèle DST a été intégré dans le programme de simulation de système thermique TRNSYS comme un module de calcul non standard appelé TRNVDST (Mazzarella, 1993). Le modèle a été amélioré par Pahud et Hellström (1996), puis adapté à la problématique des pieux échangeurs et nommé TRNVDSTP (Pahud et al., 1996). Cette dernière version est utilisée pour la simulation du stockage de Serso, puisqu'elle permet, en plus de toutes les fonctionnalités que possède les autres versions, de tenir compte de l'influence thermique des raccordements hydrauliques entre les forages et de pouvoir estimer l'influence d'un mouvement régional de l'eau souterraine dans une couche horizontale de terrain.

Le programme de simulation de système thermique TRNSYS 15 (Klein S. A. et al., 2000) est donc naturellement choisi pour simuler le stockage comme partie intégrante d'un système thermique. Le modèle de calcul DST a déjà été largement utilisé et validé par le passé (Pahud, 1993 ; Hellström et Nordell, 1988). La méthodologie suivie pour définir les paramètres de calcul est la même que celle qui a été développée pour la simulation de systèmes avec pieux échangeurs (Fromentin et al., 1997). Elle se base essentiellement sur des paramètres physiques qui permettent de tenir compte des processus thermiques les plus influents. Le modèle de stockage TRNVDSTP est utilisé pour Serso avec la même configuration que celle qui a été implémentée dans PILESIM (Pahud, 1999). Pour information, PILESIM est un outil de simulation dynamique d'une installation de chauffage/refroidissement avec pieux échangeurs.

A1.2 Mesures effectuées sur le stockage

Les mesures disponibles pour le calibrage du modèle de stockage ont été enregistrées en valeurs de 15 minutes du 1.1.1998 au 31.12.1999, soit deux années complètes de mesures. La mise en route de l'installation a débuté en 1994, soit près de 4 ans auparavant. Bien que l'installation a été mesurée depuis le début de sa mise en service, il n'a pas été nécessaire de disposer de la totalité des mesures effectuées.

Les mesures relatives au stockage sont les puissances thermiques transférées par son échangeur souterrain (mesures de températures de fluide et de débit) et des températures de terrain effectuées à différents endroits dans la zone du stockage (Hopkirk et al., 1995).

La première étape avant de pouvoir utiliser les mesures est de contrôler si possible leur exactitude, de déterminer quels sont les capteurs de mesure erronés, d'effectuer des corrections éventuelles et de remplir les trous de mesures.

A1.2.1 Puissances thermiques transférées

Fort heureusement, les puissances thermiques transférées sont mesurées de manière redondantes. Ainsi, l'énergie thermique extraite et injectée dans le stockage est connue par deux groupes de mesures indépendants : par une mesure globale de la puissance thermique transférée et par 4 mesures de puissance dans chacune des 4 branches du stockage (les 4 branches étaient couplées en parallèle durant les deux ans de mesure). L'analyse de ces puissances montre que la puissance globale mesurée est en moyenne plus de 20% inférieure à la somme des puissances des 4 branches du stock, aussi bien en injection qu'en extraction.

D'autre part, de l'autre côté des installations techniques, l'énergie thermique collectée ou diffusée par les chaussées des deux ponts est mesurée séparément pour chacun des ponts. La totalité de cette énergie est également mesurée à l'entrée du local technique. L'analyse de ces trois puissances thermiques montre une très bonne concordance de mesure.

Les installations techniques ont deux stockages à eau de 2'200 litres chacun pour découpler le circuit hydraulique des ponts de celui du stockage diffusif. Compte tenu du débit nominal de l'installation, un tel volume d'eau est déplacé en moins de 10 minutes. La comparaison des puissances thermiques transférées par le stockage et les ponts est donc possible pour des durées de marche du système supérieures au pas de temps de mesure (15 minutes). La comparaison avec la somme des puissances transférées dans les 4 branches du stockage montre que cette dernière est en moyenne 5% inférieure à la puissance transférée par les ponts, aussi bien en injection qu'en extraction. Ceci permet de confirmer un problème de précision dans la mesure de puissance globale échangée par le stockage, qui est environ 25% plus faible que les valeurs mesurées du côté des ponts.

Compte tenu de la bonne concordance des mesures des puissances thermiques absorbées et diffusées par les ponts, la mesure de puissance thermique des deux ponts est choisie comme référence pour la correction des puissances thermiques. Ainsi la puissance thermique transférée dans le stockage diffusif est prise comme la somme des mesures des 4 branches du stock, corrigée par un facteur 1/0.95 (augmentation d'environ 5%).

Finalement, les mesures de températures et de débit permettent de recalculer les puissances thermiques enregistrées avec une très bonne corrélation. Pour toutes les mesures de puissance thermique, la pente de la corrélation est quasiment égale à l'unité si la capacité thermique volumétrique du fluide est fixée à 4.17 MJ/m³K, ce qui correspond à celle de l'eau pure. Le fluide utilisé dans l'installation est un mélange d'éthylène glycol (40%) et d'eau (60%), dont la capacité thermique volumétrique est environ 10% inférieure à celle de l'eau. En conséquence, toutes les mesures de puissances thermiques doivent être réduites de 10% pour cette raison. En particulier, la **puissance thermique échangée par l'échangeur souterrain** est prise comme la **somme des mesures des 4 branches du stock, corrigée par un facteur de 0.9/0.95** (diminution des valeurs mesurées d'environ 5%).

A1.2.2 Température moyenne du stockage diffusif

La température du terrain dans la zone du stockage a été mesurée dans 9 forages (voir Hopkirk et al., 1995), placés à différents endroits représentatifs et à égale distance des sondes les plus proches, de manière à ne pas être influencée par les variations de température à court terme au voisinage des sondes. La visualisation de l'évolution de chacune des mesures de température a permis de déterminer les mesures défectueuses pendant les deux années analysées. Sur les 45 mesures de température enregistrées, 34 ont pu être utilisées.

La température moyenne du stockage est par définition la température moyenne du terrain dans le volume de stockage. Ce dernier est simplement défini en sachant que les sondes de l'échangeur souterrain sont verticales, de même longueur et régulièrement espacées. Ainsi chaque sonde occupe la même surface de terrain. En multipliant cette surface par la longueur d'un forage et par leur nombre, le volume obtenu équivaut au volume « touché » par l'échangeur souterrain. Ce volume est défini comme le volume du stockage.

Le calcul de la température moyenne du stockage a été fait en découpant son volume en couches horizontales superposées et en cylindres creux emboîtés. A chaque portion de volume ainsi découpé correspond une température constante qui est déterminée par une ou plusieurs mesures. La température moyenne du stockage est ensuite calculée en pondérant les températures de chaque portion de volume par leur taille.

La température moyenne du stockage est le résultat des conditions passées de charge et décharge du stockage et des transferts de chaleur avec l'environnement. Elle a en mémoire le passé de l'installation. En d'autres termes, elle permet de remplir les trous de mesure au cours des deux années étudiées. Ces derniers ne sont pas nombreux. Le plus grand trou dure environ 5 jours et leur totalité ne dépasse pas 20 jours, soit moins de 3% de la période de mesure. Les trous sont remplis avec des jours voisins de la date du trou qui conduisent à la même variation de la température moyenne du stockage.

A1.2.3 Capacité thermique du stockage

Les mesures de la puissance transférée par l'échangeur souterrain et de la température moyenne du stockage permettent d'établir la relation entre l'énergie stockée ou déstockée et sa variation de température. La figure A1.1 permet de la montrer avec les mesures corrigées des deux années.

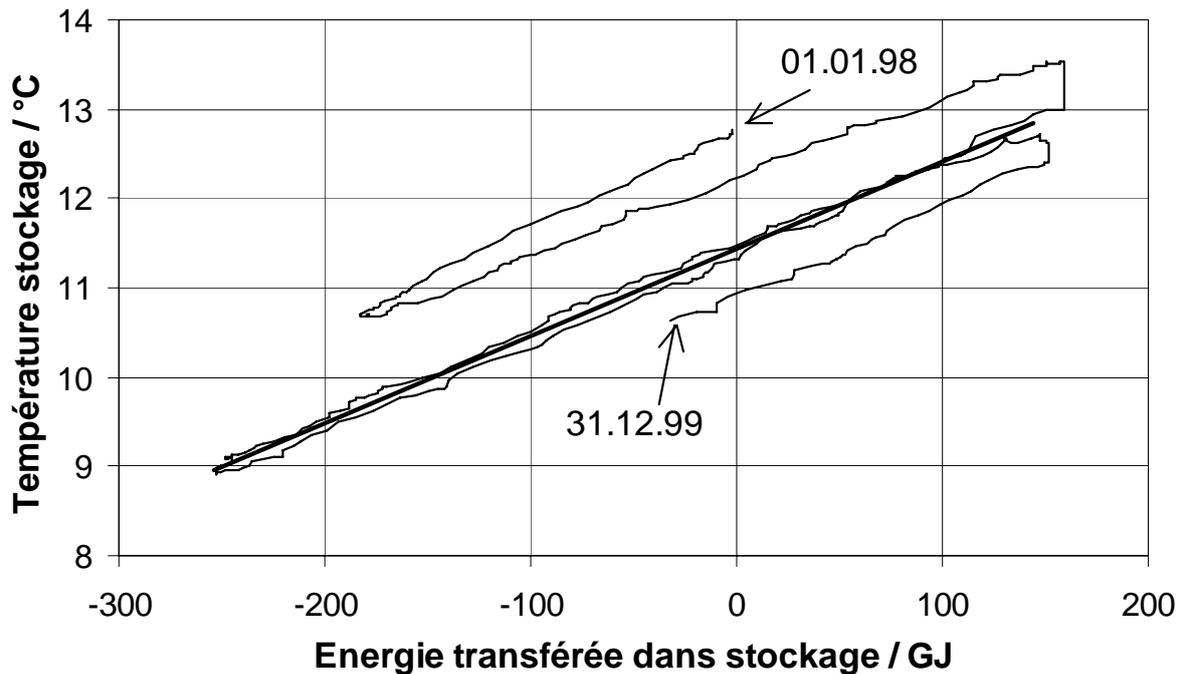


Fig. A1.1 Température moyenne du stockage représentée en fonction de l'énergie nette transférée par l'échangeur souterrain (énergie injectée – énergie extraite).

Si le stockage n'a pas de pertes thermiques, un cycle de charge – décharge fera déplacer les points de la courbe sur une droite dont la pente (en K/GJ) est l'inverse de sa capacité thermique (en GJ/K). Les pertes thermiques du stockage ont pour effet de déplacer les points sur la droite. A l'inverse ils seront déplacés à gauche, si les pertes thermiques sont en réalité des gains thermiques. Lors de l'hiver 98 – 99, l'extraction importante de chaleur a eu pour résultat de sensiblement abaisser la température du stockage, si bien que les pertes du stockages ont été réduites à zéro, voir inversées. Au cours de la décharge du stockage pendant l'hiver 98-99 et de sa recharge le printemps – été suivant, les pertes thermiques du stockage ont été faibles relativement aux énergies transférées. Cette période a l'avantage de permettre une estimation directe de la capacité thermique du stockage. La régression linéaire montrée dans la figure A1.1 permet de l'estimer à environ **100 GJ/K**. La capacité thermique volumétrique moyenne du terrain est ensuite déterminée sur la base du volume du stockage, évalué selon la définition donnée dans la section précédente (section A1.2.2).

Capacité thermique du stockage :	102 GJ/K
Volume du stockage :	46'100 m ³
Capacité thermique volumétrique du terrain :	2.2 MJ/m ³ K

A1.3 Etablissement des paramètres de simulation

Les paramètres de simulation doivent permettre de caractériser les propriétés thermiques et hydrauliques du terrain ainsi que ceux qui définissent le stockage (sondes géothermiques, raccordements hydrauliques horizontaux au sommet des sondes et isolation sur le toit du stockage). D'autre part, les conditions initiales doivent être représentatives des conditions

dans lesquelles se trouvait le stockage au début de la période de mesure (soit 4 ans après la mise en service de l'installation).

A1.3.1 Paramètres relatifs au stockage

Les paramètres donnés dans les tables A1.1 à A1.3 sont les paramètres nécessaires à la simulation du stockage. La liste des paramètres, établie pour la simulation d'un système avec pieux échangeurs (Fromentin et al., 1997), permet de prendre en compte les transferts de chaleur principaux pour ce type d'application.

Echangeur souterrain	
Nombre de sondes géothermiques (N)	91
Longueur active des sondes (H)	65 m
Espacement des sondes (B)	3 m (arrangement hexagonal)
Surface de terrain occupée par sonde ($B^2 \times \sqrt{3}/2$)	7.8 m ² /sonde
Volume de stockage ($B^2 \times \sqrt{3}/2 \times N \times H$)	46'100 m ³
Diamètre des sondes (forage)	11.5 cm
Type de sonde	Double-U
Diamètre intérieur des tubes formant les U	26 mm
Matériau de remplissage	Bentonite et ciment
Résistance thermique d'une sonde $R_b^{(1)}$	0.12 K/(W/m)
Résistance thermique interne d'une sonde $R_a^{(1)}$	0.44 K/(W/m)

(1) calculé avec le programme EED (Hellström and Sanner, 2000) et les paramètres supplémentaires suivants :

diamètre externe / interne du tube en plastique	32 / 26 mm
conductibilité thermique du tube en plastique	0.42 W/mK
conductibilité thermique du matériau de remplissage	0.8 W/mK
espacement axe – axe de deux tubes opposés	75 mm
débit de fluide par sonde	440 litres/h
type de fluide	éthylène glycol
point de congélation du fluide	-21 °C

Table A1.1 Paramètres de simulation relatifs à l'échangeur souterrain.

Couplage hydraulique, fluide	
Couplage hydraulique des sondes	En parallèle
Longueur estimée des raccords horizontaux (sans les retours, donc moitié de la longueur totale)	315 m
Diamètre externe des raccords horizontaux	90 mm
Densité du fluide caloporteur	1070 kg/m ³
Capacité thermique du fluide	3.5 kJ/kgK

Table A1.2 Paramètres de simulation relatifs au couplage hydraulique et au fluide caloporteur.

Les raccordements hydrauliques horizontaux entre les sondes sont noyés dans une couche de sable de 20 cm d'épaisseur. Cette couche est sous l'isolation et fait donc encore partie du stockage. La couche d'isolation est constituée par des morceaux de mousse de verre et fait une épaisseur de 25 cm. Elle est recouverte par une couche de 30 cm d'épaisseur avec des matériaux de très faible perméabilité pour limiter les infiltrations d'eau à travers la couche d'isolation. Puis une couche de drainage de 30 cm d'épaisseur et finalement une couche de terre recouvre le tout. La surface occupée par le stockage peut à nouveau être cultivée. Dans les calculs, l'effet de l'isolation sur le toit du stockage est pris en compte avec un facteur de perte thermique (valeur U) formé par deux couches : la couche d'isolation et une couche de terrain correspondant aux différents matériaux recouvrant l'isolation (cf. table A1.3).

Isolation sur le toit du stockage	
Epaisseur de la couche d'isolation	0.25 m
Conductibilité thermique de la couche d'isolation	0.38 W/mK
Valeur U de la couche d'isolation	1.5 W/m ² K
Epaisseur couche terrain sur l'isolation	0.60 m
Conductibilité thermique correspondante	1.5 W/mK
Valeur U de la couche de terrain	2.5 W/m ² K
Valeur U totale prise en compte	0.9 W/m ² K
Extension horizontale de la couche d'isolation au-delà du bord du stockage	Environ 2 m

Table A1.3 Paramètres de simulation relatifs au toit du stockage.

A1.3.2 Paramètres relatifs au terrain

A l'endroit du stockage, une couche de rocher non consolidé de 4 à 8 m d'épaisseur recouvre une couche d'au moins 100 m de molasse. Des travaux ont été entrepris pour diminuer la perméabilité du terrain du côté « montagne » du stockage, de manière à limiter les infiltrations d'eau possibles. La conductibilité thermique de la molasse a été mesurée sur des échantillons. Une valeur moyenne de 4.5 W/mK a été obtenue. La capacité thermique volumétrique du terrain a été estimée à 2.2 MJ/m³K dans la section A1.2.3 sur la base des 2 ans de mesure.

Le modèle de calcul du stockage, TRNVDSTP, est configuré comme dans PILESIM (Pahud, 1999) avec 4 couches de terrain. La première couche permet de tenir compte de la couche de sable dans laquelle se trouve les raccordements horizontaux entre les sondes. Les trois couches suivantes permettent par exemple de définir une couche intermédiaire dans laquelle circule de l'eau souterraine. Dans notre cas, l'eau souterraine ne circule pas de façon significative et deux couches suffisent pour tenir compte des propriétés thermiques du rocher non consolidé et de la molasse. Comme il n'est pas désiré de changer la configuration du modèle, les mêmes propriétés sont assignées à deux couches dans le modèle (cf. table A1.4).

La température initiale du terrain est fixée constante à 10 °C (légèrement supérieure à la température moyenne annuelle de l'air, notamment pour tenir compte du gradient géothermique naturel).

Terrain	
Température initiale du terrain	10 °C
1. couche contenant les raccordements hydrauliques	
épaisseur	0.8 m (dont 0.5 m sur toit du stockage)
conductibilité thermique	2.0 W/mK
capacité thermique volumétrique	2.2 MJ/m ³ K
2. couche de rocher non consolidé	
épaisseur	6 m
conductibilité thermique	2.8 W/mK
capacité thermique volumétrique	2.2 MJ/m ³ K
vitesse de Darcy (écoulement eau souterraine)	0 m/s
3. couche de molasse (partie 1)	
épaisseur	2 m
conductibilité thermique	4.5 W/mK
capacité thermique volumétrique	2.2 MJ/m ³ K
vitesse de Darcy (écoulement eau souterraine)	0 m/s
4. couche de molasse (partie 2)	
épaisseur	1000 m
conductibilité thermique	4.5 W/mK
capacité thermique volumétrique	2.2 MJ/m ³ K
vitesse de Darcy (écoulement eau souterraine)	0 m/s

Table A1.4 Paramètres de simulation relatifs au terrain.

A1.3.3 Conditions initiales

Les conditions initiales sont également importantes dans la mesure où le stockage doit se trouver dans un état semblable à celui dans lequel il se trouvait au début de la période de mesure. En particulier la température moyenne du stockage doit correspondre à celle qui est obtenue des mesures. Avant de débiter la simulation, le modèle de calcul permet de simuler une variation sinusoïdale de la température du stockage avec une période annuelle et pendant un nombre arbitraire de périodes (cycles de préchauffage). Les conditions initiales de ce calcul sont la température initiale du terrain. Les conditions aux bords sont fixées par la température de l'air, dont l'évolution suit également une variation sinusoïdale. Ce calcul permet d'amener l'état du stockage dans des conditions initiales pour la simulation qui sont proches de celles qui sont désirées (dans notre cas, c'est l'état du stockage au début de la période de mesure). L'amplitude de variation de la température du stockage est d'environ 3 K. Le niveau de température moyen du stockage est ajusté pour obtenir une température moyenne de stockage comparable à celle du début des 2 ans de mesures. L'ajustement livre une température moyenne de 13 °C. Les paramètres relatifs aux cycles de préchauffage sont énumérés dans la table A1.5.

Cycles de préchauffage du stockage	
Nombre de cycles (1 cycle dure 1 année)	4
Température du stockage	
température moyenne	13 °C
amplitude de variation	1.5 K (Min : 11.5 °C, max : 14.5 °C)
déphasage	180 jours
Température de l'air	
température moyenne	9 °C
amplitude de variation	10 K (Min : -1 °C, max : 19 °C)
déphasage	120 jours

Table A1.5 Paramètres de simulation relatifs au préchauffage du stockage.

A1.4 Comparaison simulation - mesure

Le débit total et la température du fluide caloporteur sont donnés comme variables d'entrée au modèle de simulation, de même que la température de l'air extérieur. Parmi les variables calculées par le modèle, la température moyenne du stockage et la puissance thermique transférée par l'échangeur souterrain peuvent être directement comparées aux valeurs issues des mesures (cf. figures A1.2 et A1.3).

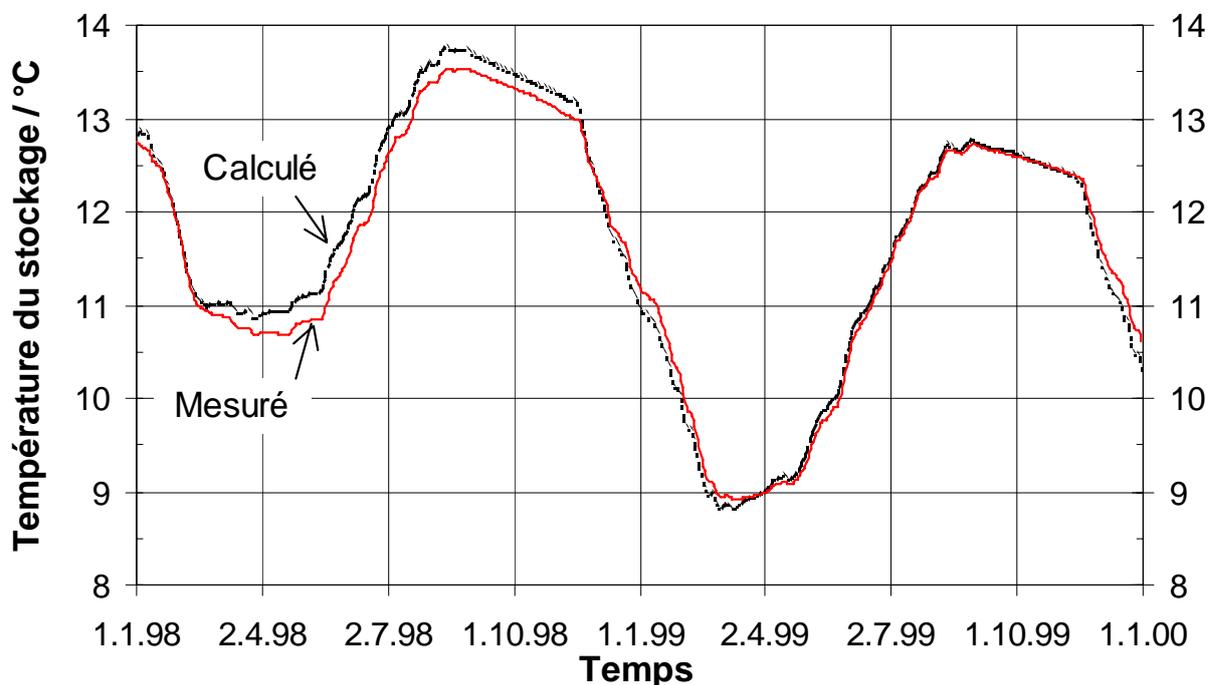


Fig. A1.2 Mesure et calcul de la température moyenne du stockage au cours des deux ans de mesure.

L'écart de température entre les mesures et les calculs reste inférieur à 0.5 K.

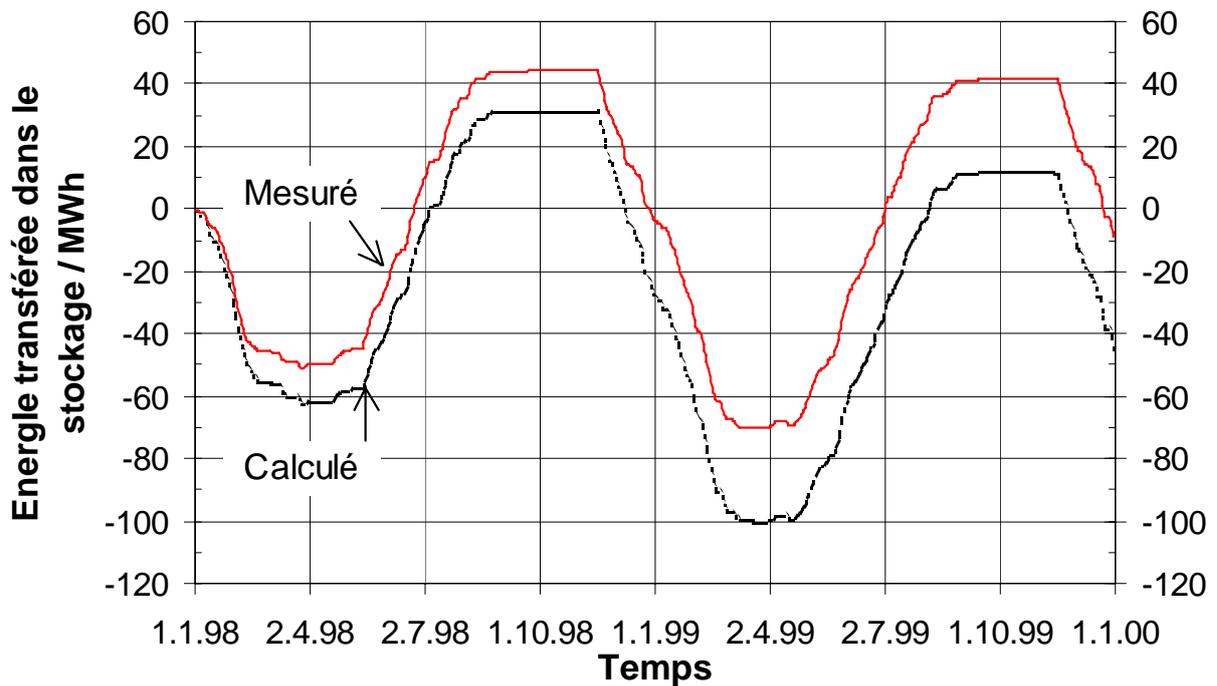


Fig. A1.3 Mesure et calcul de l'énergie nette transférée dans le stockage au cours des deux ans de mesure.

Le concept hydraulique du stockage permet de n'utiliser qu'une partie des sondes. Ainsi, pour un débit et une température d'entrée dans les sondes donnés, la puissance thermique transférée est plus faible lorsque le nombre de sondes utilisées est plus petit. En extraction de chaleur, l'utilisation partielle des sondes est plus fréquente qu'en injection. Comme le modèle de calcul ne permet pas de réduire le nombre de sondes utilisées, les calculs surestiment davantage les mesures en période d'extraction, ce qui se traduit par un décalage vers le bas de la courbe calculée relativement à la courbe mesurée.

Une comparaison directe entre les mesures et les calculs de l'énergie journalière transférée par l'échangeur souterrain permet de mettre en évidence cet effet (cf. figure A1.4). Les calculs correspondent bien aux mesures pour les jours où toutes les sondes sont utilisées. Les points qui se détachent sous la fonction identité en période d'extraction (énergie journalière négative), sont ceux pour lesquels le nombre de sondes géothermiques utilisées a été réduit. Inversement ces points se détachent au dessus de la fonction identité en période d'injection (énergie journalière positive).

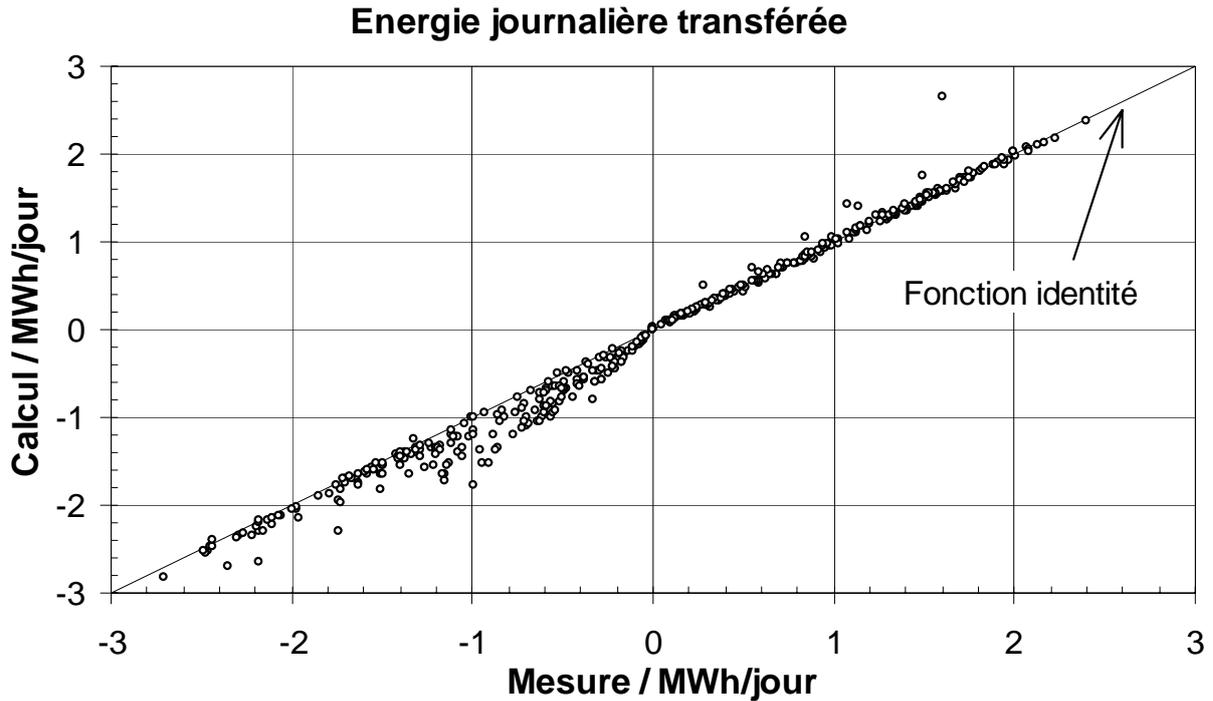


Fig. A1.4 Comparaison calcul – mesure des énergies journalières transférées par l'échangeur souterrain pour les deux années de mesures.

Le nombre de sondes utilisées est fonction du nombre de branches en fonction. Chacune des 4 branches du stockage a sa propre pompe, dont l'état de marche est mesuré. En conséquence la fraction de sondes utilisées est connue au cours du temps. La figure A1.5 permet de visualiser des périodes de 2 jours où parfois seule une fraction des sondes est utilisée. Les graphes des figures A1.5 et A1.6 permettent de confirmer la surestimation de la puissance transférée lorsque seule une fraction des sondes est utilisée.

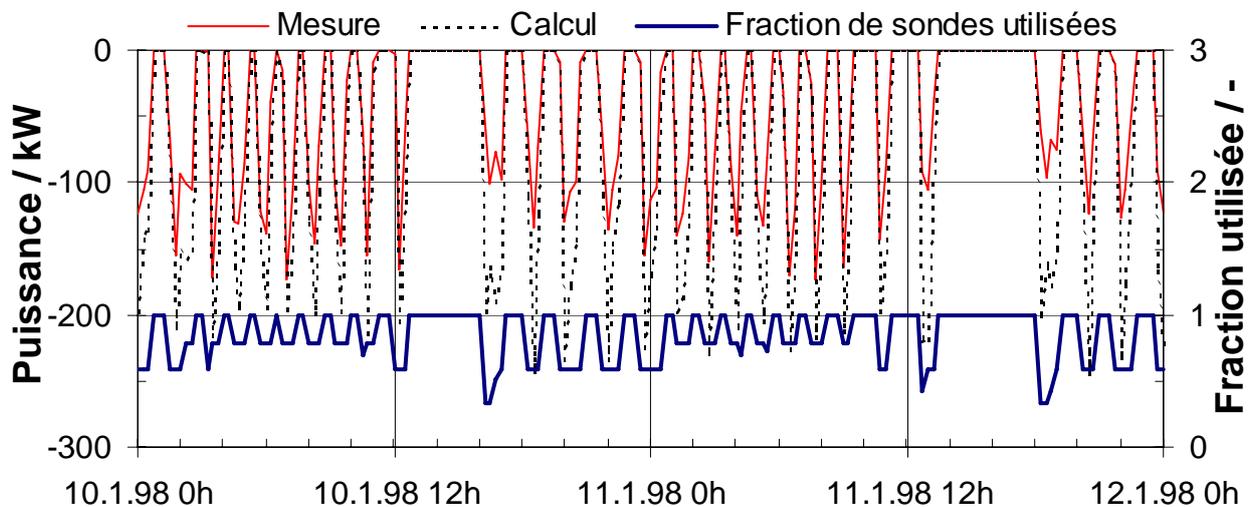


Fig. A1.5 Puissance thermique calculée et mesurée en extraction de chaleur au cours d'une période avec une utilisation partielle des sondes du stockage.

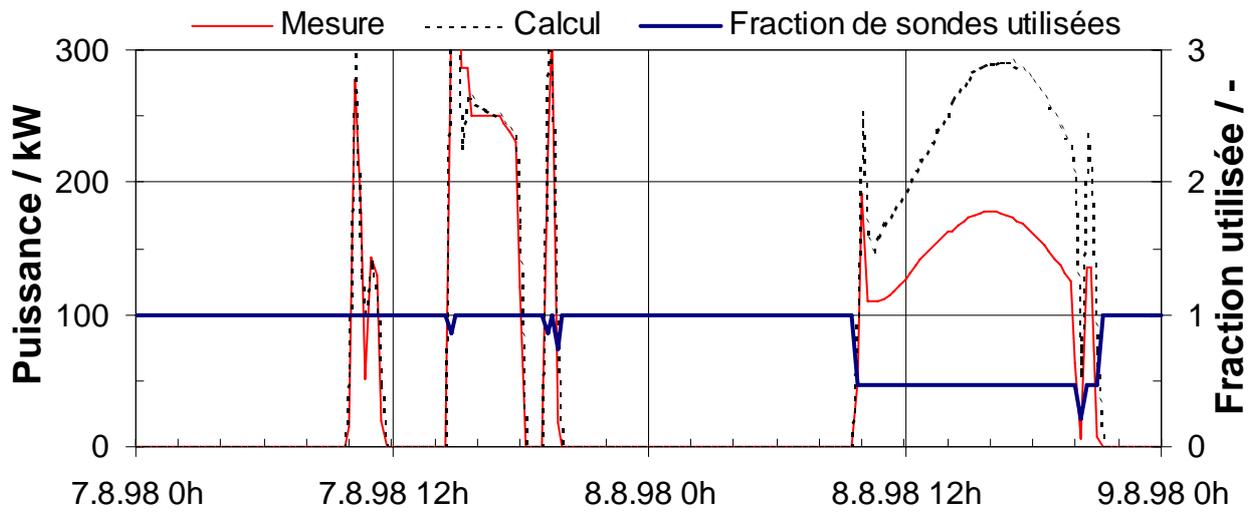


Fig. A1.6 Puissance thermique calculée et mesurée en injection de chaleur. On observe une utilisation partielle des sondes le 8 août 1998.

Lorsque la totalité des sondes sont utilisées, la correspondance calcul – mesure est tout à fait satisfaisante, et montre que les effets dynamiques à court terme sont bien reproduits par le modèle. Les graphes des figures A1.7 et A1.8 permettent de le confirmer pour différents jours au cours des deux ans de mesure.

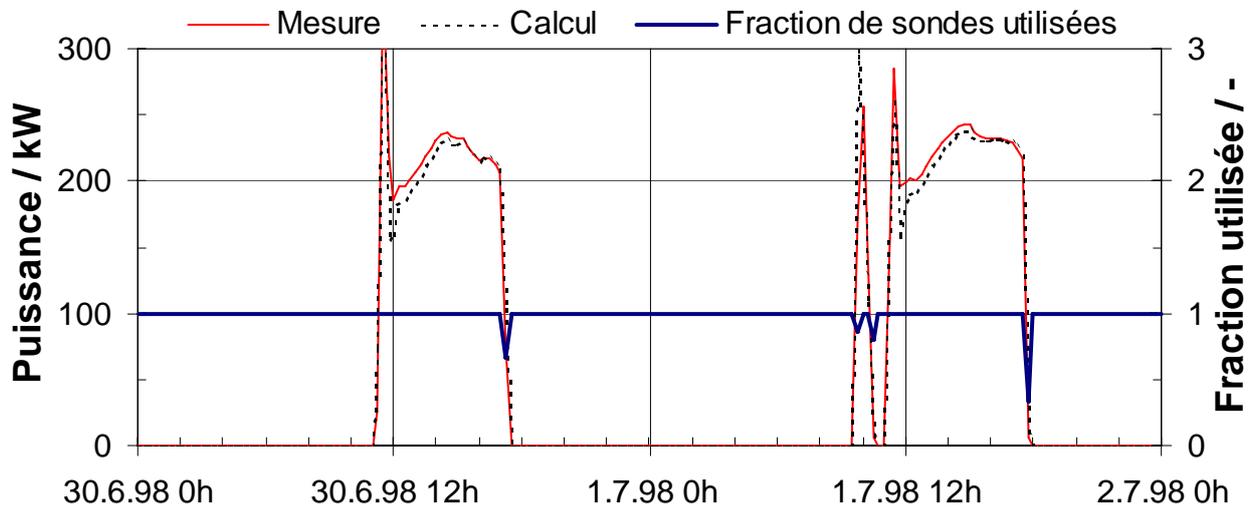


Fig. A1.7 Puissance thermique calculée et mesurée en injection de chaleur durant l'été 1998.

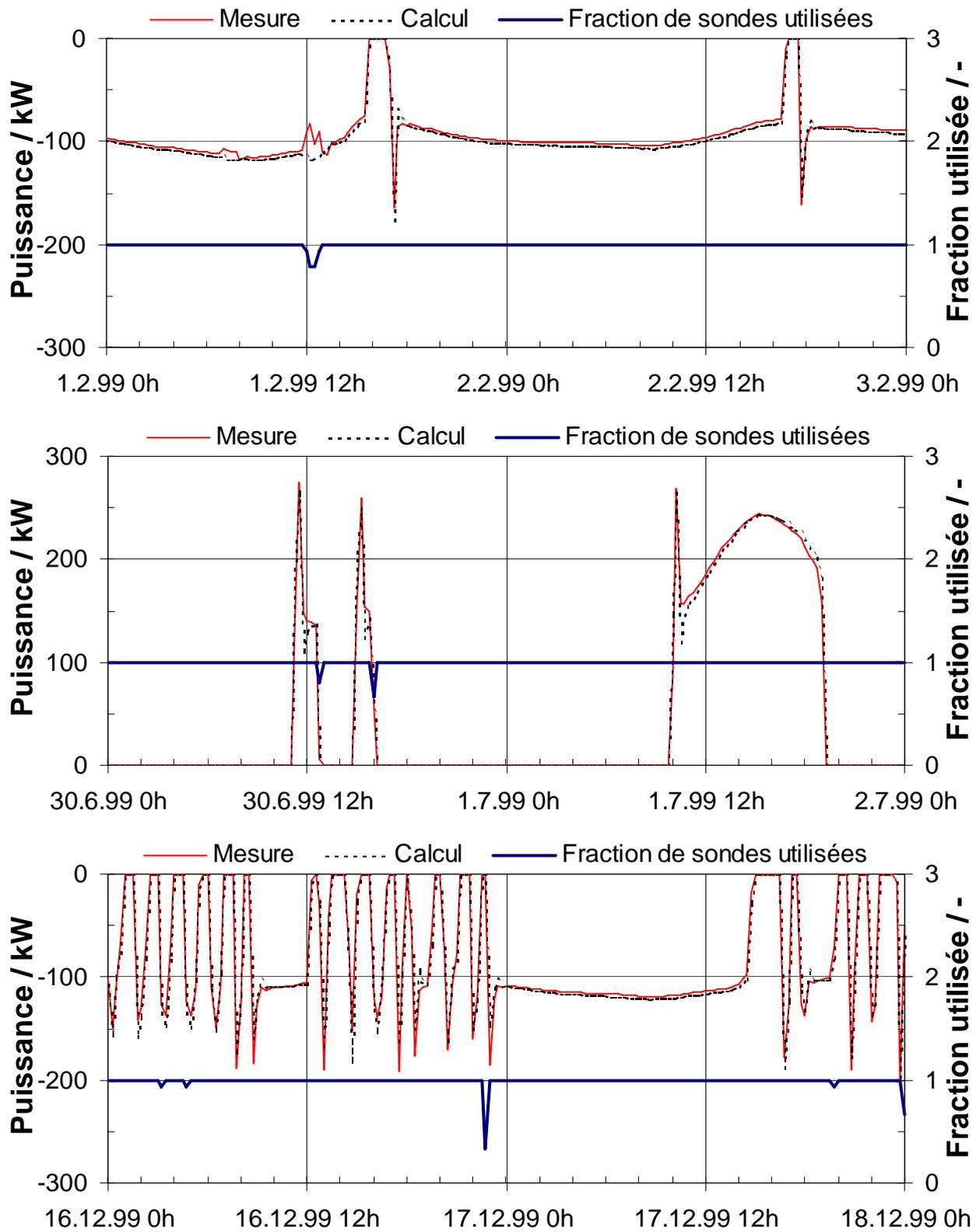


Fig. A1.8 Puissance thermique calculée et mesurée en 1999.

A1.5 Conclusion

Comme attendu le modèle utilisé permet de simuler de façon satisfaisante le stockage diffusif de Serso. Le modèle de simulation utilisé combine ensemble plusieurs composants TRNSYS, dont le composant non standard TRNVDSTP. L'outil de simulation TRNSYS résultant a été mis au point dans une étude visant à simuler un système avec pieux échangeurs sur la base de mesures d'installations existantes. Il s'avère tout à fait satisfaisant pour la simulation d'un stockage du type de Serso. Il permet de reproduire aussi bien les effets à long terme qu'à court terme. Tous les paramètres utilisés reposent sur des grandeurs géométriques ou des propriétés physiques.

Contrairement au concept du stockage de Serso, le modèle de calcul ne permet pas de n'utiliser qu'une seule partie des sondes du stockage. Néanmoins cette propriété n'apparaît pas indispensable à la simulation de ce type de système, car il en résulte une puissance de transfert réduite qui peut également être obtenue avec par exemple un débit plus faible. D'autre part, l'utilisation d'une partie des sondes plutôt que la totalité permet, en période d'extraction, d'extraire la chaleur dans la zone périphérique du stockage et de conserver la zone centrale du stockage plus chaude. La comparaison mesure – calcul ne permet pas de mettre en évidence un avantage à procéder de la sorte, et la complexité supplémentaire engendrée au niveau du concept, du schéma de principe et de la régulation du stockage ne sont pas, dans ce cas, justifiés.

Références

- Fromentin A., Pahud D., Jaquier C. et Morath M. (1997) Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs. Empfehlungen für Energiepfahlsysteme, Rapport final, décembre 1997, Office fédéral de l'énergie, Bern, Switzerland.
- Hellström G. (1989) Duct Ground Heat Storage Model, Manual for Computer Code. Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- Hellström G. and Nordell B. (1988) A Posteriori Study and Redesign of Large-Scale Borehole Heat Store in Luleå, Sweden. Proceedings of JIGASTOCK'88, Versailles, France.
- Hellström G., Sanner B. (2000): Earth Energy Designer, User's Manual, version 2.0 (<http://www.blocon.se/earth.htm>).
- Hopkirk R., Hess K. und Eugster W. (1995) Erdwärmesonden-Speicher zur Strassenheizung bei Därlingen, Schweiz, Polydynamics Ltd., Zürich, Schweiz.
- Klein S. A. et al. (2000) TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Version 15. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.
- Mazzarella L. (1993) Duct Thermal Storage Model. Lund-DST. TRNSYS 13.1 Version 1993. ITW, Universität Stuttgart, Germany, Dipartimento di Energetica, Politecnico di Milano, Italy.
- Pahud D. (1993) Etude du Centre Industriel et Artisanal Marcinhès à Meyrin (GE). Rapport final. GAP et CUEPE, Univ. de Genève.

- Pahud D. (1999) PILESIM - LASEN. Simulation Tool for Heating/Cooling Systems with Heat Exchanger Piles or Borehole Heat Exchangers. User Manual. Swiss Federal Office of Energy, Switzerland.
- Pahud D. and Hellström G. (1996) The New Duct Ground Heat Model for TRNSYS. EURO THERM, Physical Models for Thermal Energy Stores. A.A. van Steenhoven and W.G.L van Helden (eds), March 25-27, pp. 127 – 136, Eindhoven, The Netherlands.
- 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.

Annexe 2: Simulation du système complet et calibrage sur les mesures

Table des matières:

A2. Simulation du système complet et calibrage sur les mesures	p. A2.1
A2.1 Modèle de pont capteur et dégivreur	p. A2.1
A2.2 Modèle de simulation pour le système complet	p. A2.5
A2.2.1 Schéma de principe	p. A2.5
A2.2.2 Variables météorologiques	p. A2.7
A2.2.3 Régulation du système	p. A2.9
A2.3 Comparaison simulation - mesure	p A2.9
A2.3.1 Performances thermiques mesurées et procédure de calibration	p A2.9
A2.3.2 Sensibilité des performances du système aux principaux paramètres de simulation	p A2.13
A2.3.3 Paramètres de simulation calibrés et performances thermiques simulées	p A2.14
A2.4 Conclusion	p A2.16
Références	p A2.17

A2. Simulation du système complet et calibrage sur les mesures

A2.1 Modèle de pont capteur et dégivreur

Le modèle de calcul utilisé pour simuler le comportement thermique du pont capteur et dégivreur est le modèle TRNSYS standard pour la simulation d'un bâtiment. Il s'agit du TYPE 56 (Klein et al., 2005), développé par TRANSSOLAR. Le pont est simulé comme une dalle active, en utilisant explicitement le formalisme développé par Koschenz et Dorrer (1996). Ce formalisme permet de ramener le problème bi-dimensionnel du transfert thermique entre les tubes et le béton à un problème à une dimension. Ainsi, le champ de température dans le plan des tubes est réduit à une température moyenne équivalente T_m . Dans la figure A2.1, une coupe du pont, dont l'épaisseur totale est d_1+d_2 , est montrée. La surface extérieure (surface supérieure) de la partie supérieure correspond à la surface de la chaussée du pont, tandis que la surface extérieure (surface inférieure) de la partie inférieure correspond au dessous du pont. Le plan dans lequel se trouvent les tubes est à la profondeur d_1 depuis la face supérieure et d_2 depuis la face inférieure. La résistance R permet de calculer le transfert de chaleur du fluide circulant dans les tubes à température T_f à la zone fictive à température T_m . La température de cette zone fictive correspond à la température moyenne équivalente du pont dans le plan des tubes.

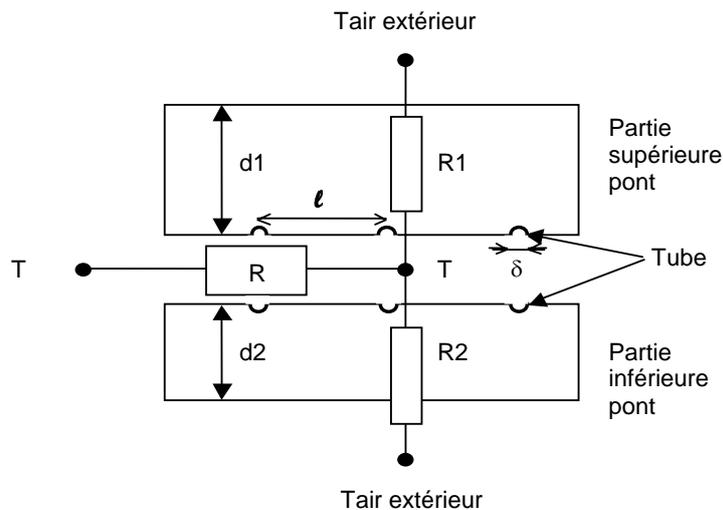


Figure A2.1 Coupe transversale du pont. Le plan des tubes (serpentins dans la chaussée) est représenté par la température moyenne équivalente T_m . Elle permet de ramener le calcul des transferts de chaleur entre les tubes et les surfaces supérieure et inférieure du pont à un problème à une dimension.

- d_1+d_2 : épaisseur totale du pont [m] ;
- d_1 : profondeur des tubes depuis la face supérieure du pont (chaussée) [m] ;
- d_2 : profondeur des tubes depuis la face inférieure du pont [m] ;
- l : espacement des tubes [m] ;
- δ : diamètre extérieur des tubes [m] ;
- T_m : température moyenne équivalente du pont dans le plan des tubes [°C] ;

T_f : température du fluide circulant dans les tubes [$^{\circ}\text{C}$] ;
 $T_{\text{air ext\u00e9rieur}}$: température de l'air ext\u00e9rieur [$^{\circ}\text{C}$] ;
 R : r\u00e9sistance thermique entre T_f et T_m [$\text{K}/(\text{W}/\text{m}^2)$] ;
 R_1 : r\u00e9sistance thermique de la partie sup\u00e9rieure du pont [$\text{K}/(\text{W}/\text{m}^2)$] ;
 R_2 : r\u00e9sistance thermique de la partie inf\u00e9rieure du pont [$\text{K}/(\text{W}/\text{m}^2)$] ;

L'expression de la r\u00e9sistance thermique R est donn\u00e9e par la relation A2.1, qui est la somme de trois composantes : la r\u00e9sistance de contact fluide - paroi int\u00e9rieure des tubes, r\u00e9sistance des tubes de la paroi int\u00e9rieure \u00e0 la paroi ext\u00e9rieure et la r\u00e9sistance effective de la paroi ext\u00e9rieure des tubes \u00e0 la zone fictive \u00e0 temp\u00e9rature T_m . Les r\u00e9sistances thermiques se rapportent \u00e0 la surface dans laquelle se trouvent les serpentins, soit la surface de la chauss\u00e9e du pont.

$$R = \left(\frac{\ell}{\pi \lambda_f \text{Nu}} + \frac{\ell}{2 \pi \lambda_p} \ln \left(\frac{\delta}{\delta_{pi}} \right) + R' \right) \quad (\text{A2.1})$$

Avec λ_f : conductivit\u00e9 thermique du fluide [W/mK] ;
 Nu : nombre de Nusselt, d\u00e9pend du r\u00e9gime d'\u00e9coulement [-];
 λ_p : conductivit\u00e9 thermique de la paroi du tube [W/mK] ;
 δ_{pi} : diam\u00e8tre int\u00e9rieur du tube [m] ;
 T_f : temp\u00e9rature du fluide dans les tubes [$^{\circ}\text{C}$] ;
 R' : r\u00e9sistance thermique entre la temp\u00e9rature de surface de la paroi ext\u00e9rieure des tubes et T_m [$\text{K}/(\text{W}/\text{m}^2)$] ;

Koschenz et Dorrer (1996) donnent une expression pour R' (cf. relation A2.2), si les conditions (A2.3) et (A2.4) sont remplies :

$$R' = \frac{\ell}{2 \pi \lambda} \ln \left(\frac{\ell}{\delta \pi} \right) \quad (\text{A2.2})$$

$$\text{si } d_i / \ell > 0.3, \quad i = 1 \text{ et } 2 \quad (\text{A2.3})$$

$$\text{si } \delta / \ell < 0.2 \quad (\text{A2.4})$$

Avec λ : conductivit\u00e9 thermique du mat\u00e9riau dans lequel sont noy\u00e9s les tubes [W/mK] ;

La relation (A2.1) permet d'avoir une relation entre la temp\u00e9rature locale du fluide $T_f(x)$ et la temp\u00e9rature moyenne \u00e9quivalente du pont dans le plan des tubes T_m . En supposant que T_m est constant dans tout le plan des tubes, on peut \u00e9crire une relation pour la puissance transf\u00e9r\u00e9e du fluide au pont (cf. relation A2.5) :

$$q(x) = \frac{1}{R} (T_f(x) - T_m) \quad (\text{A2.5})$$

$q(x)$: puissance thermique transférée du fluide au pont [W/m^2] ;

La puissance thermique transférée par les tubes provient de la capacité thermique du fluide. Ceci permet d'écrire une équation différentielle pour la puissance transférée par le fluide en fonction du chemin parcouru (cf. relation A2.6) :

$$q(x) N \ell dx = -m_f A C_f dT_f(x) \quad (A2.6)$$

ℓ : espacement des tubes dans la chaussée du pont (rappel) [m] ;

L : longueur d'un tube dans le pont [m] ;

N : nombre de tubes connectés en parallèle dans le pont [-] ;

A : surface du pont équipée avec des tubes ; $A = N \cdot L \cdot \ell$ [m^2] ;

m_f : débit massique spécifique du fluide caloporteur dans le pont [$kg/(s m^2)$] ;

$m_f = M_f / A$ (M_f : débit massique total dans le pont [kg/s]) ;

C_f : chaleur spécifique du fluide caloporteur [J/kgK] ;

En combinant (A2.5) dans (A2.6) et en intégrant le long du chemin parcouru, de $x=0$ à $x=L$, on obtient une expression pour la température de sortie du fluide T_{fout} (cf. relation A2.7).

$$T_{fout} = T_m + (T_{fin} - T_m) \exp\left(-\frac{1}{R m_f C_f}\right) \quad (A2.7)$$

$T_{fin} = T_f(x=0)$ température d'entrée du fluide dans le pont [$^{\circ}C$] ;

$T_{fout} = T_f(x=L)$ température de sortie du fluide du pont [$^{\circ}C$] ;

La puissance thermique Q échangée par le fluide dans le pont est calculée par la relation (A2.8).

$$Q = m_f A C_f (T_{fin} - T_{fout}) \quad (A2.8)$$

Q : puissance thermique échangée par le fluide circulant dans le pont [W] ;

Avec le modèle de bâtiment TYPE56, on définit donc une zone fictive dont la température est T_m , la température moyenne équivalente du pont dans le plan des tubes. La frontière de la zone est définie par deux murs de même surface, correspondant aux parties supérieure et inférieure du pont. Le transfert de chaleur vers le haut est calculé par conduction à travers les couches des matériaux qui recouvrent les tubes (mur supérieur), et de la même manière vers le bas. La capacité thermique du pont est donc prise en compte par le modèle TYPE56. Comme le processus de transfert de chaleur dans le pont est purement diffusif, le modèle de bâtiment est utilisé en supprimant les pertes par ventilation. Un coefficient de transfert convectif arbitrairement grand est défini dans la zone, de sorte que la température de l'air de la zone soit égale à la température des surfaces intérieures des murs. La température de la zone, T_m , est définie comme variable de sortie du TYPE56, ce qui permet, avec les relations (A2.7) et (A2.8), de calculer la puissance thermique transférée par le fluide (le TYPE294 a été créé pour faire ce calcul). Cette puissance est ensuite retournée comme variable d'entrée au TYPE56, qui la traite comme des gains convectifs dans la zone concernée. A chaque pas de temps, le programme TRNSYS réitère les calculs jusqu'à ce qu'une solution soit obtenue.

Les caractéristiques du pont sont énumérées dans la table A2.1. Elles sont tirées de Hopkirk et al., 1994.

Surface chauffée du pont côté lac	760 m ²
Surface chauffée du pont côté montagne	540 m ²
Diamètre extérieurs des tubes	26.9 mm
Matériau des tubes	Chrome-nickel
Espacement moyen des tubes	25 cm
Longueur moyenne d'un tube	32 m
Nombre total de tubes	160 -
Couches formant le pont (de haut en bas)	
asphalte, épaisseur	50 mm
couche contenant les tubes	80 mm
dalle en béton armée	400 mm
isolation (polistyrol)	100 mm

Table A2.1 Principales caractéristiques du pont.

Un seul pont est simulé. Les paramètres de simulation sont donnés dans la table A2.2 et la figure A2.2 (valeurs calibrées).

Surface chauffée du pont	1'300 m ²
Débit total fluide caloporteur	41 m ³ /h
Débit par m ² de pont	32 litre/m ² h
Résistance thermique R (fluide – pont)	0.03 K/(W/m ²) *
Absorption solaire de la chaussée	0.7
Coefficient de transfert convectif chaussée	10 W/m ² K (constant)

* valeur calibrée, environ 20% plus basse (meilleur échange) que le calcul avec les formules ci-dessus

Table A2.2 Principales caractéristiques du pont.

Le coefficient de transfert convectif de la chaussée ne contient pas les transferts par radiation, qui sont calculés séparément avec la température radiative équivalente du ciel et une émissivité de 1.

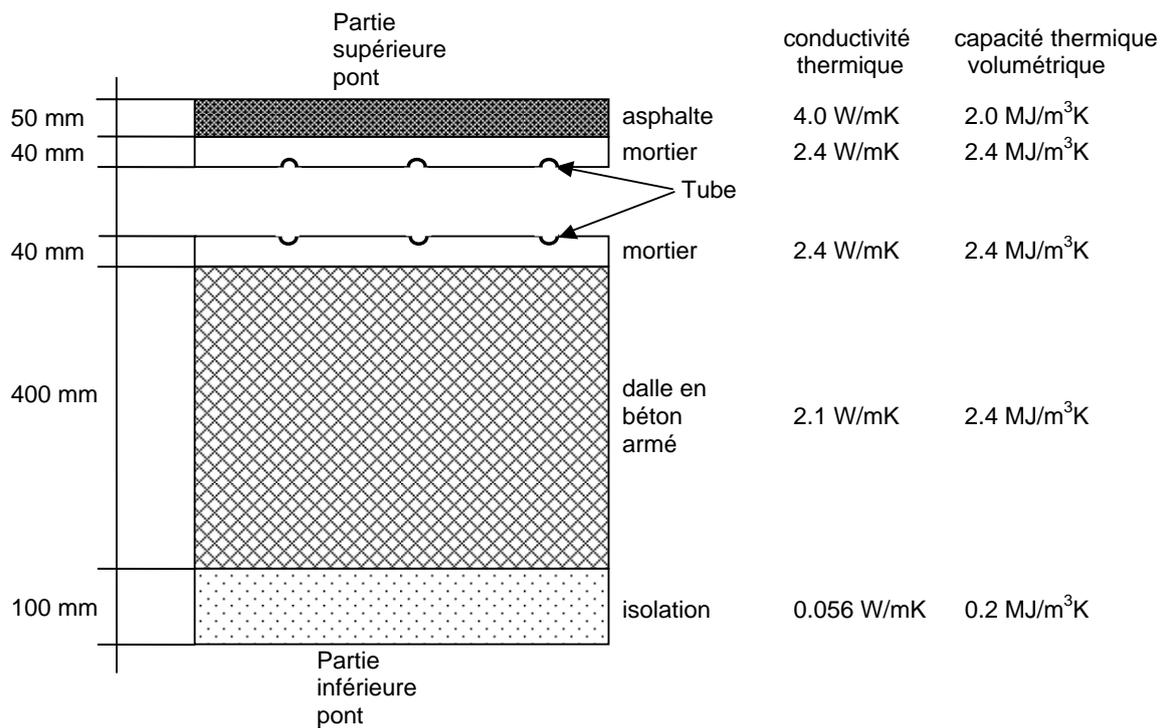


Figure A2.2 Coupe transversale du pont avec les couches définies par leur épaisseur et leurs propriétés thermiques pour la simulation du pont.

A2.2 Modèle de simulation pour le système complet

Le modèle de pont capteur – dégivreur est couplé au modèle de stockage diffusif calibré conformément au schéma de principe du système.

A2.2.1 Schéma de principe

Le schéma de principe de l'installation est montré de façon simplifiée dans la figure A2.3. Il est en réalité plus complexe (voir Hopkirk et al., 1994), même si cela n'a pas d'incidence sur le concept du système.

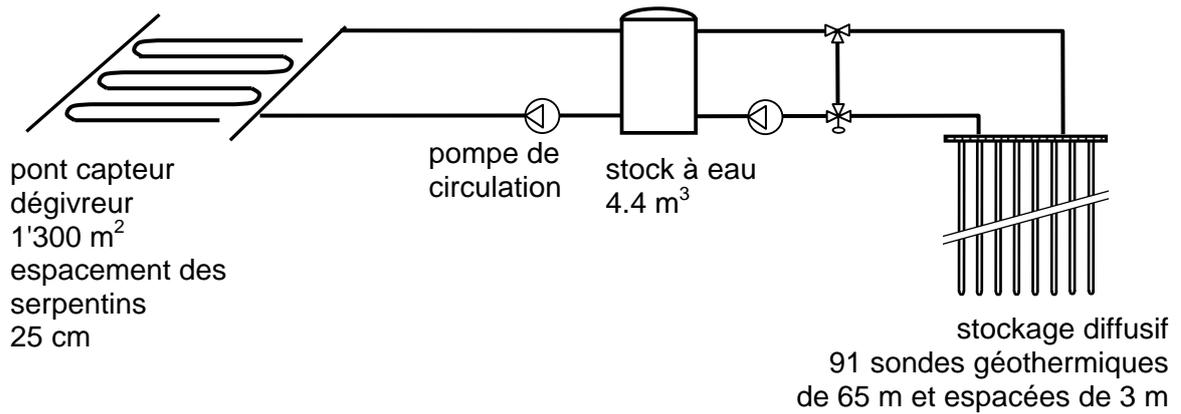


Figure A2.3 Schéma de principe simplifié de l'installation réalisée.

La vanne mélangeuse permet de limiter la température du fluide qui sort du stockage en période de déstockage et ainsi de contrôler la température « aller » dans les serpentins du pont en hiver lors du dégivrage. Elle ne « mélange pas » en été, lorsque le stockage diffusif est chargé. La température de consigne est définie en fonction de la température de l'air extérieure en fonction du graphique de la figure A2.4 (Sommer, 1999). Le dégivrage du pont n'a lieu que lorsque la température de l'air extérieur passe sous 4°C.

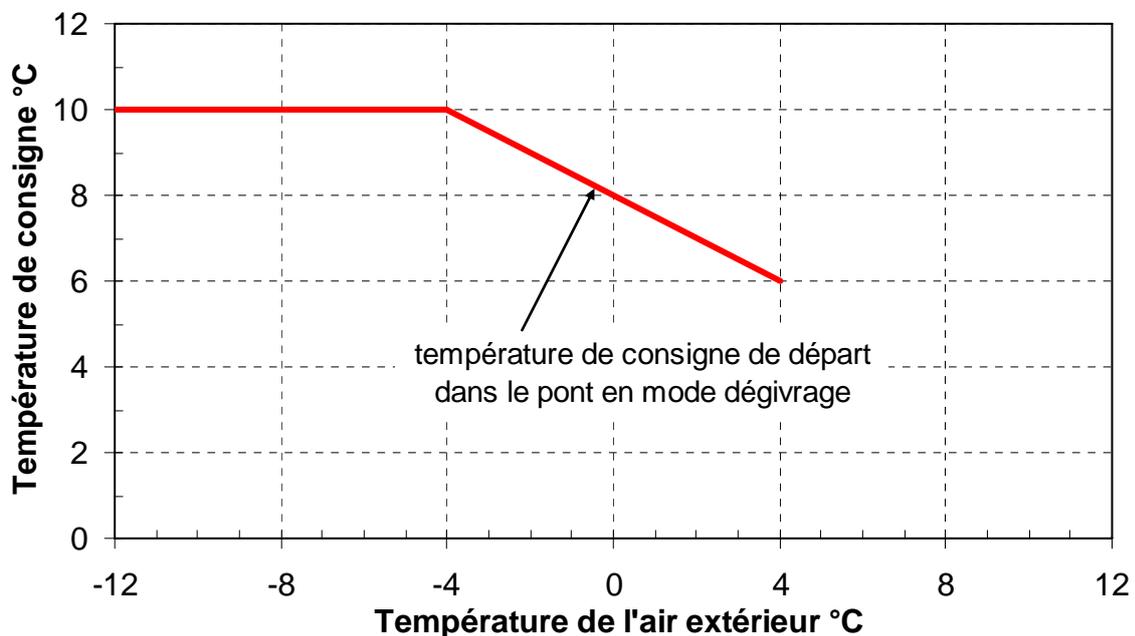


Figure A2.4 Température de consigne pour le fluide au départ du circuit des serpentins des ponts. Si la température de l'air extérieur est supérieure à 4°C, le fonctionnement du système en mode « dégivrage » est arrêté.

Une différence importante pour la simulation du système est que les raccords hydrauliques du système réel sont faits de manière que seul la différence de débit entre le circuit du pont et le circuit du stockage diffusif traverse le stock à eau. La simulation du schéma de principe de la figure A2.3 implique que tout le débit traverse le haut ou le bas du stock à eau. Ceci ne pose pas de problème en été, car la température du fluide entrant dans le haut du stock à eau est toujours plus élevée que celle qui entre en bas. En revanche, en hiver la situation est inversée, ce qui signifie que le fluide plus chaud qui entre en bas est toujours entièrement mélangé au fluide plus froid qui entre en haut. En conséquence la température du fluide qui sort en haut pour décharger le stock diffusif est égale à la température du fluide qui sort en bas pour dégivrer le pont. Cela signifie que la température de fluide à la sortie du pont est plus basse que la température du fluide en entrée dans le stockage diffusif. Les mesures de températures montrent au contraire que ces deux températures sont très proches l'une de l'autre, et le mélange simulé dans le modèle n'a en réalité pas lieu.

D'autre part, comme les deux pompes de circulation fonctionnent pratiquement toujours simultanément, une seule pompe est simulée dans le modèle de l'installation. Le système effectivement simulé est montré dans la figure A2.5. Il est équivalent au système réel du point de vue des performances thermiques.

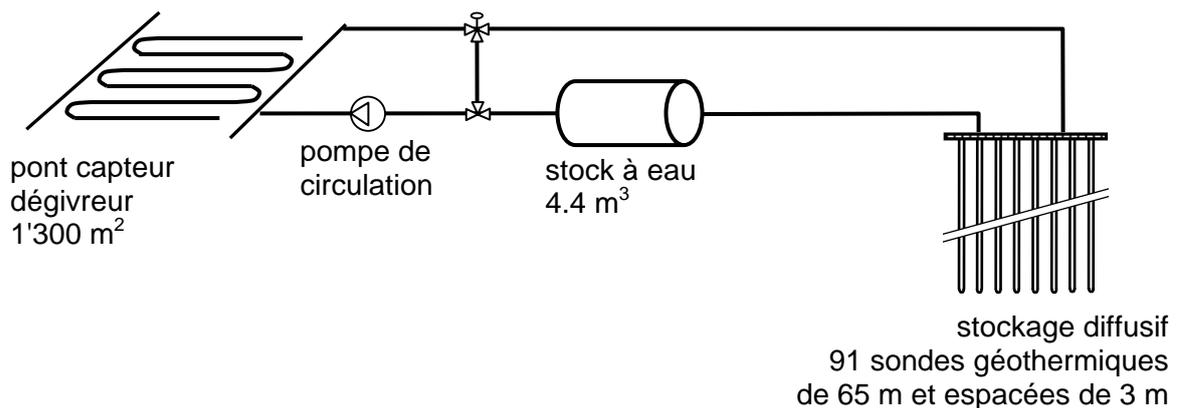


Figure A2.5 Schéma de principe simplifié de l'installation simulée.

Le stock à eau est simulé avec le modèle standard de tuyau, le TYPE31.

A2.2.2 Variables météorologiques

Le fichier météo est créé avec METEON 5.0 (Remund J. und Kunz S., 2003) et le format « user defined ». Les variables sélectionnées sont enregistrées en valeurs horaires. Chaque ligne contient les variables sélectionnées ci-dessous dans l'ordre suivant :

- heure de l'année (-)
- rayonnement global horizontal (W/m^2)
- rayonnement diffus horizontal (W/m^2)
- rayonnement global, plan incliné (W/m^2)
- rayonnement diffus, plan incliné (W/m^2)
- rayonnement direct, incidence normale (W/m^2)

- température de l'air (°C)
- humidité relative (%)
- point de rosée (°C)
- nébulosité (-)

Le plan incliné est le plan horizontal (azimut : 0° et inclinaison : 0°), mais calculé avec l'horizon lointain, déterminé par METEON avec les coordonnées du site :

- coordonnée suisse X : 627.869 km
- coordonnée suisse Y : 168.114 km
- altitude : 570 m
- latitude : 46.399°
- longitude : 7.482°

L'horizon a pour effet de réduire l'ensoleillement global horizontal annuel de 5%. La table A2.3 contient les valeurs mensuelles des principales variables météorologiques.

Mois	Ensoleillement global horizontal (sans effet horizon) (kWh/m ²)	Ensoleillement global horizontal (avec effet d'horizon) (kWh/m ²)	Température de l'air extérieur (°C)
Janvier	35	28	0.8
Février	54	47	1.0
Mars	95	89	4.3
Avril	115	113	7.1
Mai	151	149	11.5
Juin	155	154	14.5
Juillet	178	176	18.2
Août	149	147	17.9
Septembre	106	102	14.6
Octobre	69	63	10.1
Novembre	39	30	4.5
Décembre	29	20	2.2
Année	1'171	1'118	8.9

Table A2.3 Valeurs mensuelles d'ensoleillement et de température pour Serso (source METEON 5.0).

La nébulosité, le point de rosée, la température de l'air et les rayonnement global et diffus horizontaux sont utilisés par le TYPE69 pour calculer la température radiative équivalente du ciel. Cette dernière est nécessaire au calcul des échanges radiatifs entre la surface du pont et le ciel.

A2.2.3 Régulation du système

Le système peut fonctionner dans trois modes différents :

- mode « repos » : le système est à l'arrêt ;
- mode « captage » : le système est mis en marche pour collecter les gains solaires du pont et les stocker dans le stockage diffusif ;
- mode « dégivrage » : le système est mis en marche pour dégivrer le pont en le chauffant avec l'énergie thermique déstockée du stockage diffusif.

Deux contrôleurs ON/OFF (TYPE2) sont utilisés pour sélectionner les modes « captage » ou « dégivrage ».

Mode « captage » :

condition pour fonctionner dans ce mode : $T_{\text{air extérieur}} > 4^{\circ}\text{C}$

si $(T_m - T_{\text{bot-tank}}) > 10 \text{ K}$ alors pompe enclenchée

si $(T_m - T_{\text{bot-tank}}) < 4 \text{ K}$ alors pompe déclenchée

Mode « dégivrage » :

condition pour fonctionner dans ce mode : $T_{\text{air extérieur}} < 4^{\circ}\text{C}$

si $T_m < 3^{\circ}\text{C}$ alors pompe enclenchée

si $T_m > 4^{\circ}\text{C}$ alors pompe déclenchée

T_m : température du pont dans le plan des tubes [$^{\circ}\text{C}$] ;

$T_{\text{bot-tank}}$: température du fluide dans le stock à eau, au retour dans le pont (bas) [$^{\circ}\text{C}$] ;

$T_{\text{air extérieur}}$: température de l'air extérieur [$^{\circ}\text{C}$] ;

A2.3 Comparaison simulation - mesure

A2.3.1 Performances thermiques mesurées et procédure de calibration

La température du pont a été mesurée à plusieurs endroits dans le plan des tubes et complète les mesures de température du fluide caloporteur à l'aller et au retour des serpentins et les mesures des puissances thermiques échangées. Une synthèse des mesures est donnée dans la table A2.4 et les figures A2.6 et A2.7 pour 1998, et la table A2.5 et les figures A2.8 et A2.9 pour 1999.

Mesures de 1998	Température moyenne du fluide en mode « captage » (°C)	Energie solaire stockée dans le stockage diffusif (kWh)	Température moyenne du fluide en mode « dégivrage » (°C)	Energie thermique déstockée pour dégivrer les ponts (kWh)
Janvier	-	-	7.1	23'780
Février	-	-	7.0	22'300
Mars	13.9	880	6.8	5'490
Avril	15.2	4'430	6.9	200
Mai	17.6	19'140	-	-
Juin	18.8	35'060	-	-
Juillet	20.1	27'840	-	-
Août	21.5	9'210	-	-
Septembre	-	-	-	-
Octobre	-	-	-	-
Novembre	-	-	7.2	17'960
Décembre	-	-	6.7	30'270
Année	19.0	96'560	7.1	100'000
Durée de marche annuelle	560 heures		1'050 heures	

Table A2.4 Valeurs mensuelles des mesures effectuées en 1998 relatives aux ponts pour l'installation Serso.

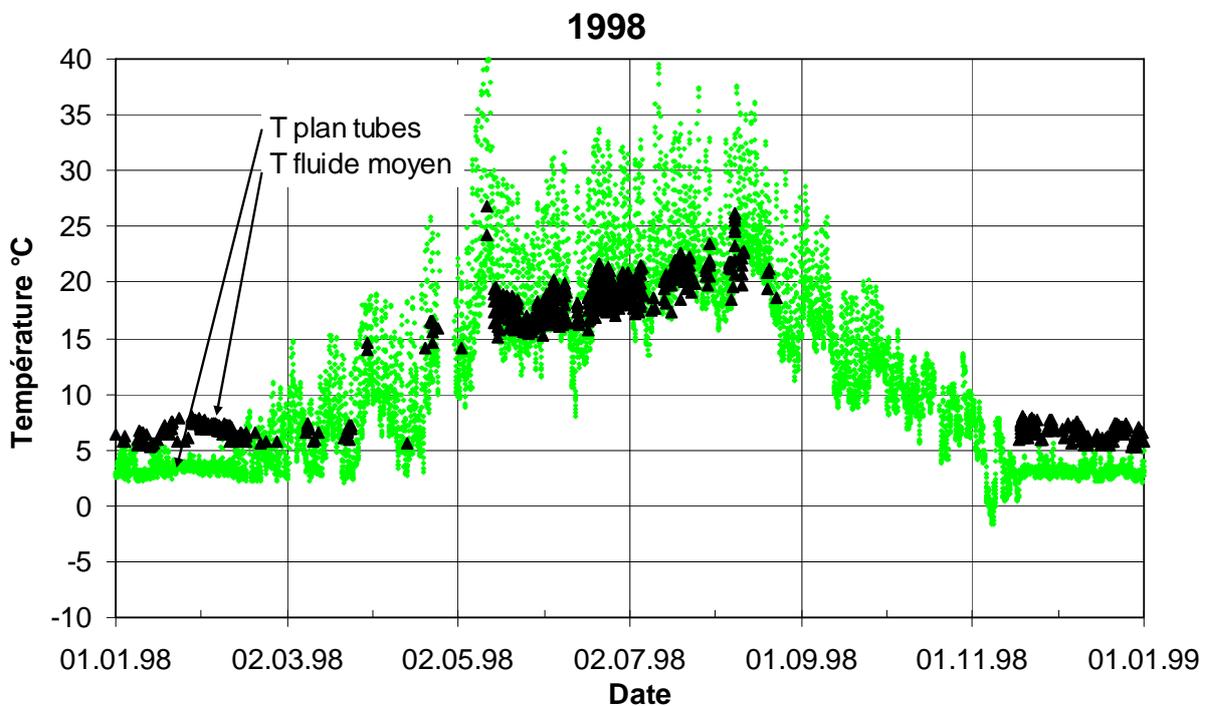


Figure A2.6 Valeurs horaires des mesures de température effectuées en 1998 relatives aux ponts pour l'installation Serso.

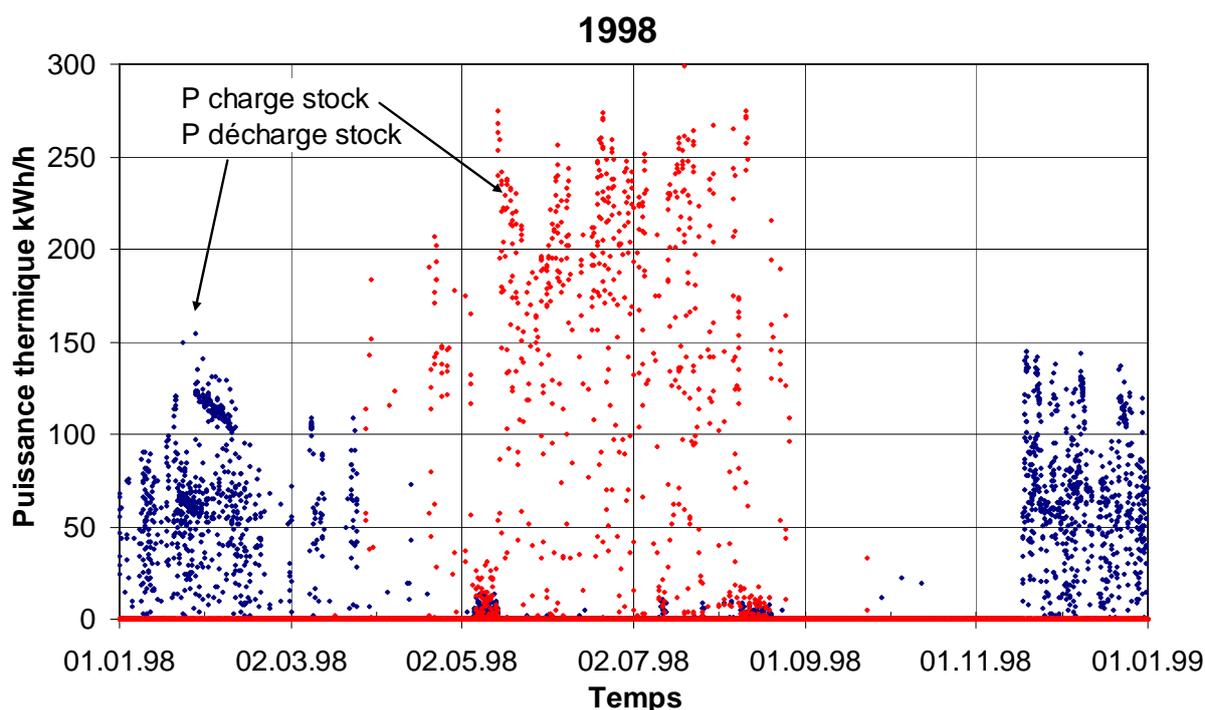


Figure A2.7 Valeurs horaires des mesures des puissances thermiques effectuées en 1998 relatives aux ponts pour l'installation Serso.

Mesures de 1999	Température moyenne du fluide en mode « captage » (°C)	Energie solaire stockée dans le stockage diffusif (kWh)	Température moyenne du fluide en mode « dégivrage » (°C)	Energie thermique déstockée pour dégivrer les ponts (kWh)
Janvier	-	-	6.5	30'570
Février	-	-	5.8	35'670
Mars	11.8	230	6.1	3'030
Avril	13.5	7'250	6.2	1'070
Mai	15.9	30'390	-	-
Juin	17.1	28'420	-	-
Juillet	18.5	30'820	-	-
Août	18.8	17'340	-	-
Septembre	16.8	970	-	-
Octobre	-	-	-	-
Novembre	-	-	7.2	20'920
Décembre	-	-	6.6	28'830
Année	17.2	115'420	6.4	120'090
Durée de marche annuelle		630 heures		1'320 heures

Table A2.5 Valeurs mensuelles des mesures effectuées en 1999 relatives aux ponts pour l'installation Serso.

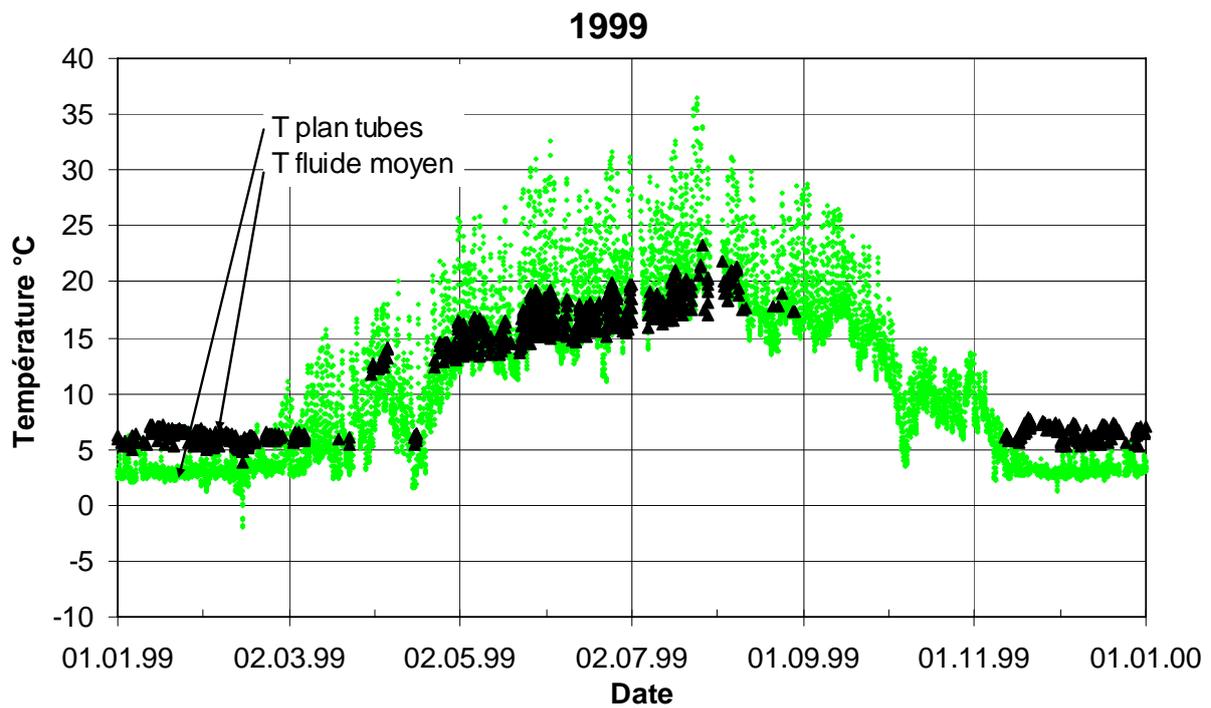


Figure A2.8 Valeurs horaires des mesures de température effectuées en 1999 relatives aux ponts pour l'installation Serso.

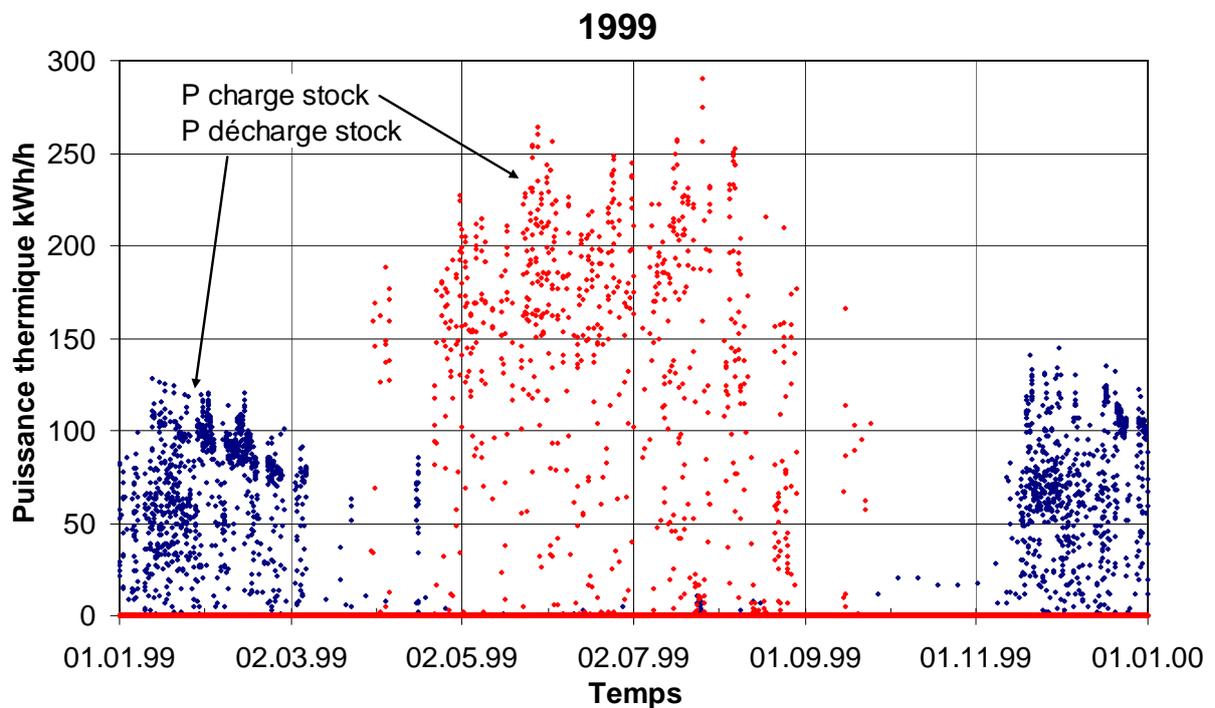


Figure A2.9 Valeurs horaires des mesures des puissances thermiques effectuées en 1999 relatives aux ponts pour l'installation Serso.

La procédure de calibration ne peut pas être effectuée sur le modèle de pont comme elle l'a été faite sur le modèle de stockage diffusif. Dans les mesures, il manque des variables météo comme la température radiative du ciel ou des mesures équivalentes. Il a été préféré de simuler le modèle complet du système en utilisant le modèle calibré du stockage diffusif, et en se basant sur une année météorologique typique générée avec Météonorm, qui permette de calculer de façon indépendante les pertes radiatives et les pertes convectives du pont.

A2.3.2 Sensibilité des performances du système aux principaux paramètres de simulation

Les paramètres du stockage ont déjà été calibrés et ne sont pas variés. Ce sont les principaux paramètres du pont et de la régulation du système qui sont variés dans des limites plausibles, de manière à ce qu'ils restent compatibles avec leur signification physique. Les paramètres calibrés sont :

- coefficient de transfert de chaleur convectif à la surface du pont $U_{\text{convection}}$ [W/(m²K)] (pour des raisons de simplification et de degré de calibration possible, une valeur constante est donnée au modèle) ;
- absorption de la chaussée au rayonnement solaire $\alpha_{\text{chaussée}}$ [-]
- conductivité thermique de la couche d'asphalte $\lambda_{\text{asphalte}}$ [W/(mK)]
- résistance thermique entre le fluide caloporteur et le pont dans le plan des tubes R [K/(W/m²)]
- différence de température pour l'enclenchement et le déclenchement du système dans le mode de fonctionnement « captage » (ON/OFF_{captage});

Les sensibilités aux paramètres calibrés de la quantité d'énergie annuelle stockée, de la quantité d'énergie annuelle déstockée et ainsi que des durées de fonctionnement correspondantes sont indiquées de façon qualitative dans la table A2.6. La sensibilité à la capacité thermique des circuits hydrauliques de l'installation est très faible.

Paramètre du système		Charge stockage diffusif		Durée de marche annuelle en charge	Décharge stockage diffusif		Durée de marche annuelle en décharge
		Energie annuelle	Puissance max.		Energie annuelle	Puissance max.	
$U_{\text{convection pont}}$	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↓
$\alpha_{\text{chaussée}}$	↑	↑	↑	↑	↓	→	↓
$\lambda_{\text{asphalte}}$	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
résistance R	↓	↑	↑	→	↑	↑	↓
ON/OFF _{captage}	↑	↓	↑	↓	→	→	→

Table A2.6 Sensibilité des énergies annuelles transférées et des durées de fonctionnement du système aux paramètres calibrés

A2.3.3 Paramètres de simulation calibrés et performances thermiques simulées

Pont :

Dimension (surfaces de captage/dégivrage, couches de matériaux et propriétés thermiques) : figure A2.2 (p. A2.5) et table A2.2 (p. A2.4)

Stock à eau :

volume	4.4 m ³
facteur de perte thermique	0.6 W/(m ² K)
surface enveloppe stock	15 m ²
température ambiante	15 °C (constant)

Stockage diffusif :

voire annexe 1

Contrôle du système

température de consigne pour le dégivrage : voir figure A2.4 (p. A2.6)
 contrôle de modes de fonctionnement du système : voir section A2.2.3 (p. A2.9)

Les performances simulées avec les paramètres calibrés sont montrées dans la table A2.7 et les figures A2.10 et A2.11.

Simulation faite avec météo générée par METEON	Température moyenne du fluide en mode « captage » (°C)	Energie solaire stockée dans le stockage diffusif (kWh)	Température moyenne du fluide en mode « dégivrage » (°C)	Energie thermique déstockée pour dégivrer les ponts (kWh)
Janvier	-	-	6.9	37'720
Février	-	-	6.6	30'040
Mars	-	-	6.8	9'180
Avril	15.3	540	-	-
Mai	17.2	11'950	-	-
Juin	17.9	27'770	-	-
Juillet	19.6	43'290	-	-
Août	20.0	24'100	-	-
Septembre	19.5	5'360	-	-
Octobre	-	-	-	-
Novembre	-	-	7.2	12'310
Décembre	-	-	6.6	32'800
Année	19.0	113'010	6.8	122'050
Durée de marche annuelle	640 heures		1'330 heures	

Table A2.7 Valeurs mensuelles obtenues avec le modèle du système calibré.

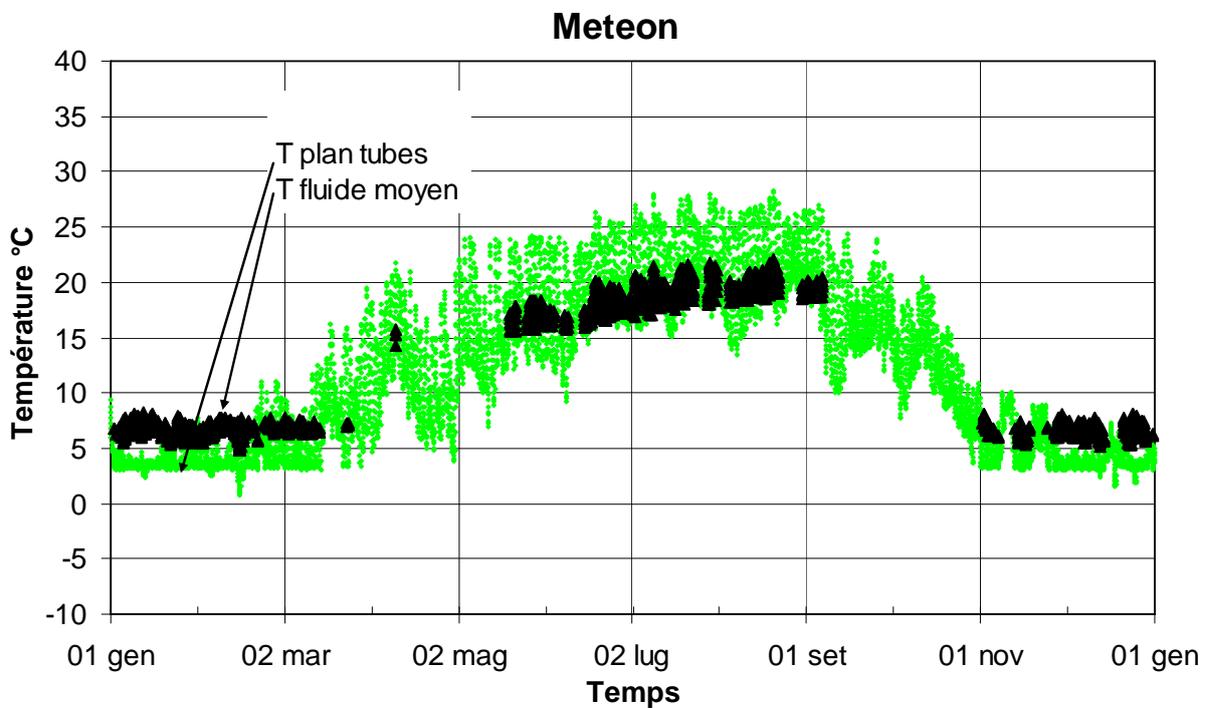


Figure A2.10 Valeurs horaires des températures simulées avec le modèle calibré du système Serso.

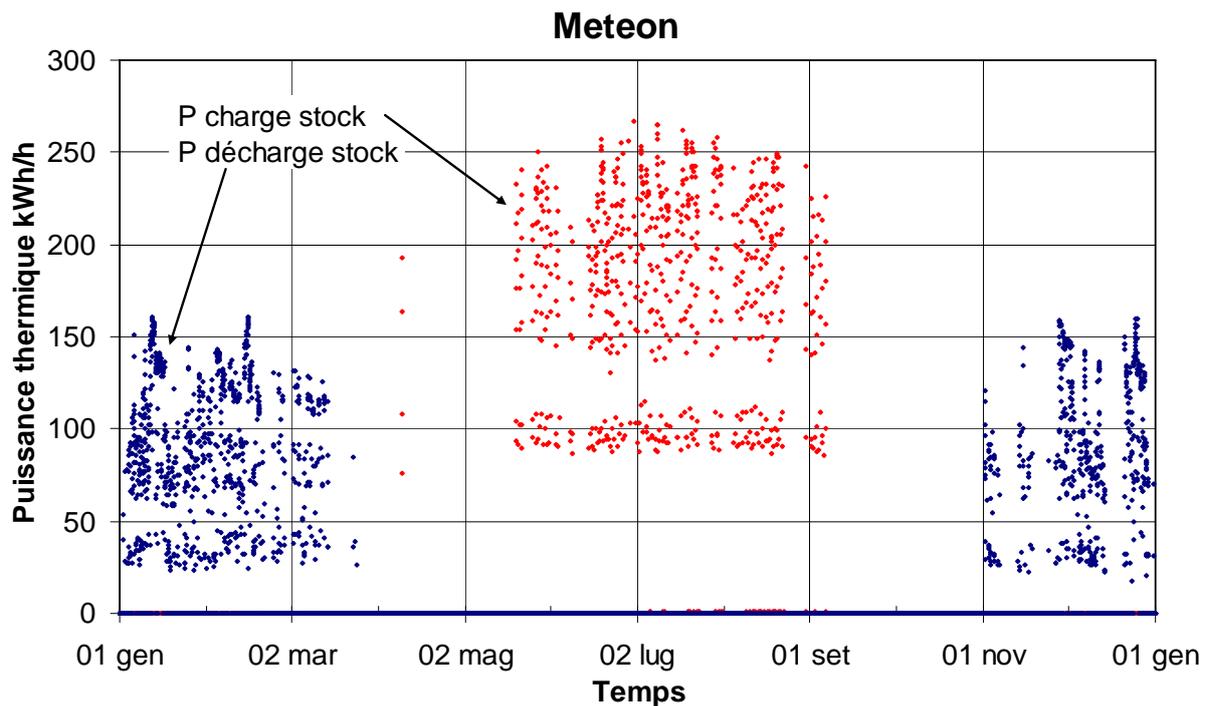


Figure A2.11 Valeurs horaires des puissances thermiques simulées avec le modèle calibré du système Serso.

A2.4 Conclusion

Bien que les processus d'échange thermique à la surface du pont dépendent de nombreux paramètres, le modèle de simulation tente de reproduire les principales caractéristiques thermiques de la façon la plus simple possible. Ainsi les précipitations ne sont pas prises en compte, de même que la fonte de la neige, ou encore l'effet du vent, du passage des voitures et de la convection naturelle sur le coefficient de transfert de chaleur convectif de la chaussée du pont. Toutefois les pertes thermiques de la chaussée par convection et radiation sont calculées de façon différente, la masse thermique du pont est prise en compte, de même que le transfert thermique entre le fluide et le pont par les serpentins. Le modèle du système complet permet ainsi de reproduire de façon satisfaisante aussi bien la dynamique à court terme que le bilan annuel du système.

Références

- Hopkirk R. J., Hess K., Eugster W. J. und Knobel P. (1994) Serso: Pilotprojekt zur Sonnenenergierückgewinnung aus Strassenoberflächen. Technischer Bericht, Bundesamt für Strassenbau und Tiefbauamt des Kantons Bern, Bern.
- Klein S. A. et al. (2005) TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Version 15.3 Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.
- Koschenz M. and Dorer V. (1996) Design of Air Systems with Concrete Slab Cooling. Roomvent'96, 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, Yokohama, Japan.
- Remund J. und Kunz S. (2003) METEON Version 5.0. www.meteonorm.com
- Sommer M. (1999) Serso, Sonnenenergierückgewinnung aus Strassenoberflächen, Messkampagne und Simulation des saisonalen Erdspeichers. Zwischenbericht, Bundesamt für Energie, Bern.

Annexe 3: BRIDGESIM, a simulation tool for the system design of bridge heating for ice prevention with solar heat stored in a seasonal ground duct store

Table des matières:

A3.	The simulation tool	p. A3.1
A3.1	BRIDGESIM system layout	p. A3.1
A3.2	BRIDGESIM system control	p. A3.1
A3.3	BRIDGESIM system simulation tool	p. A3.3
A3.4	Input data to BRIDGESIM	p. A3.3
A3.4.1	Simulation parameters	p. A3.4
A3.4.2	Weather parameters	p. A3.4
A3.4.3	Bridge parameters	p. A3.5
A3.4.4	Duct store parameters	p. A3.7
A3.4.5	Ground parameters	p. A3.8
A3.4.6	Water tank parameters	p. A3.10
A3.4.7	Circulation pump parameter	p. A3.11
A3.4.8	Heating curve parameters	p. A3.11
A3.4.9	Solar controller parameters	p. A3.11
A3.5	How to run BRIDGESIM	p. A3.12
A3.6	Output data from BRIDGESIM	p. A3.14
A3.6.1	The Listing File BRIDGESIM.LST	p. A3.15
A3.6.2	The File DST.DAT	p. A3.15
A3.6.3	The Output File BRIDGESIM.OUT	p. A3.15
A3.6.4	The Plot File BRIDGESIM.PLT	p. A3.19
A3.6.5	Heat Balance of the System	p. A3.19
A3.7	Output results with BRIDGESIM	p. A3.20
A3.8	Input parameters to PREBID	p. A3.24

A3. The simulation tool

A3.1 BRIDGESIM system layout

The simulated system layout is shown in figure A3.1. Thermal simulations have shown that it is equivalent to the actual system layout of the Serso system shown in figure A3.2 (short term water tank coupled in series).

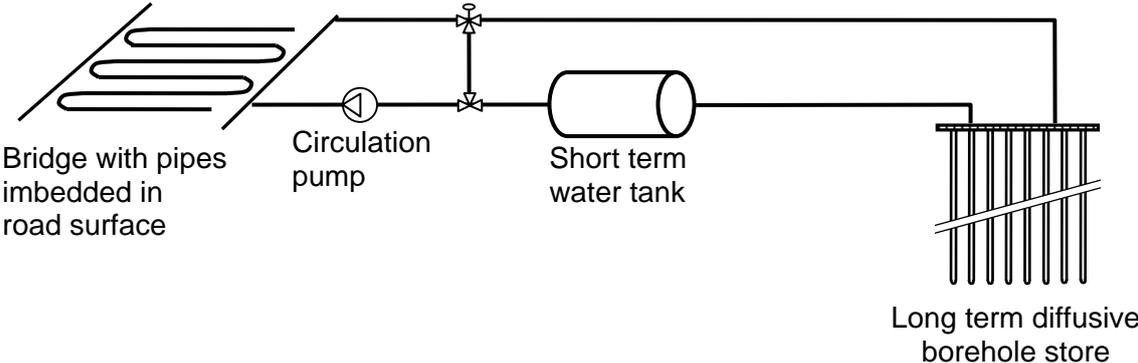


Figure A3.1 System layout simulated by the BRIDGESIM tool.

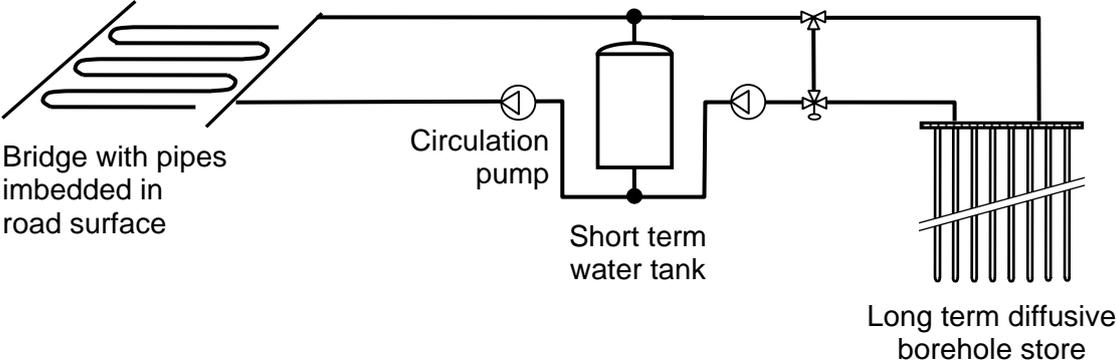


Figure A3.2 Simplified system layout of the Serso plant, equivalent to the one simulated by the BRIDGESIM tool.

A3.2 BRIDGESIM system control

The mixing valve is only used when the bridge is heated, in order to limit the forward fluid temperature in function of the outdoor air temperature, according to the diagram shown in figure A3.3.

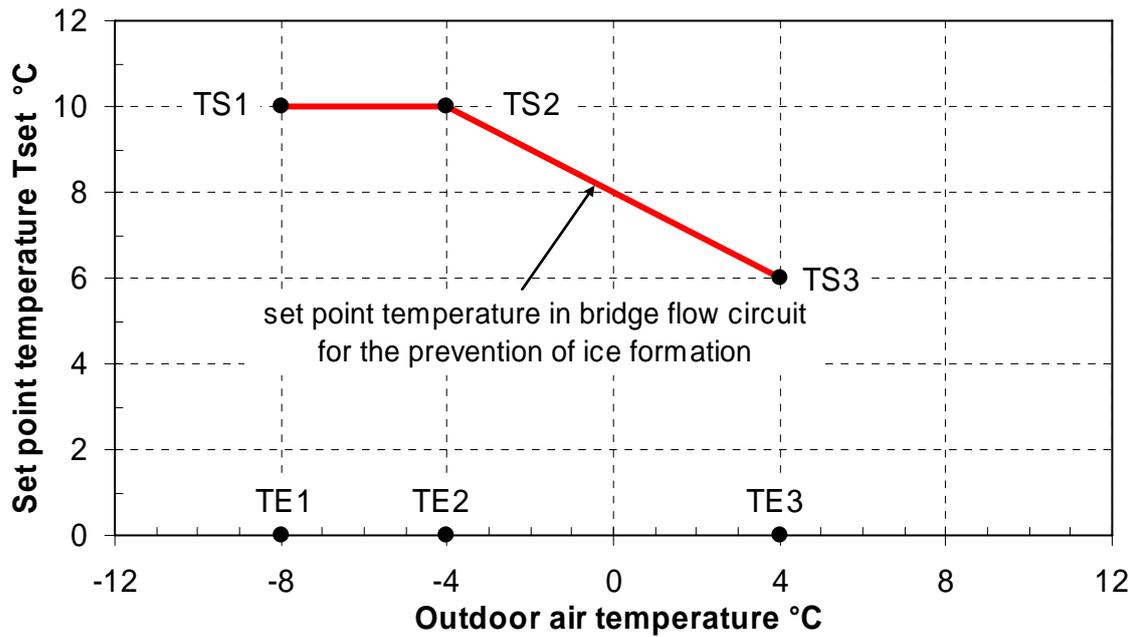


Figure A3.3 Control of the forward fluid temperature in the bridge in function of the outdoor air temperature when the system operates in the ice prevention mode (bridge heating).

Bridge heating can only be switched on when the outdoor air temperature drops below a given value, typically set to 4°C (parameter TE3).

The system operates in three different modes :

- mode « rest » : the system is stopped ;
- mode « solar collection » : the system is switched on to collect the bridge solar gains and store them in the duct ground heat storage ;
- mode « bridge unfreezing » : the system is switched on to prevent the bridge from freezing by extracting heat from the ground duct store.

Two ON/OFF controllers (TYPE2) are used to control the « solar collection » and « bridge unfreezing » modes.

Mode « solar collection » :

condition to switch on the system : $T_{air} > TE3$

- | | | |
|---|------|----------------------|
| if $(T_m - T_{return-fluid}) > DT1CST$ (for example 10 K) | then | pump is switched ON |
| if $(T_m - T_{return-fluid}) < DT0CST$ (for example 4 K) | then | pump is switched OFF |

Mode « bridge unfreezing » :

condition to switch on the system : $T_{air} > TE1$ and $T_{air} < TE3$

- | | | |
|----------------------------|------|----------------------|
| if $(T_{set1} - T_m) > 1K$ | then | pump is switched ON |
| if $(T_{set1} - T_m) < 0K$ | then | pump is switched OFF |

T_m : bridge temperature in the plane of the imbedded pipes [$^{\circ}\text{C}$] ;
 $T_{\text{return-fluid}}$: fluid temperature in the short term water tank, at the return pipe to the bridge [$^{\circ}\text{C}$] ;
 T_{air} : outdoor air temperature [$^{\circ}\text{C}$] ;
 T_{set} : set point temperature for the forward fluid temperature in the bridge (see figure 3.3) [$^{\circ}\text{C}$] ;
 T_{set1} : set point temperature for T_m (see below) .

The bridge temperature in the plane of the imbedded pipes, T_m , should lie between the outdoor air temperature T_{air} and the forward fluid temperature in the bridge T_{set} . As the thermal resistance to the fluid temperature is significantly smaller than that to the outdoor air temperature, T_{set1} should be close to T_{set} . On the basis of estimations and for commodity, T_{set1} is defined with the following relation:

$$T_{\text{set1}} = TS3 + 0.75 (T_{\text{set}} - TS3)$$

In the calibrated model (see annex 2), the temperature T_{set1} was fixed to 4°C .

A3.3 BRIDGESIM system simulation tool

The simulation models used in BRIDGESIM are described in annex 1 and 2. The use of BRIDGESIM requires to define first the set point temperature curve, as shown in figure A3.3, to heat the bridge. In other terms, the heat delivered using the heating curve, assuming that the set point temperature is always met, has to keep the bridge surface free from ice with the minimum amount of thermal energy necessary. To help determine the heating curve, the tool BRIDGEHEAT has been created, which is a simplified version of BRIDGESIM. The input data to BRIDGEHEAT are the same as those for BRIDGESIM, except for the non necessary components, such as the ground duct store. In the next section, the input data to BRIDGESIM are listed.

A3.4 Input data to BRIDGESIM

The input data to BRIDGESIM concern all the information that can be varied by the user. In particular, the input data define the size and characteristics of the different parts of the system and the driving conditions which will condition the operation of the system. In this chapter, each parameter required to BRIDGESIM is described and explained.

The input data are grouped in 9 blocks:

- simulation parameters
- weather parameters
- bridge parameters
- duct store parameters
- ground parameters

- water tank parameters
- circulation pump parameter
- heating curve parameters
- solar controller parameters

The BRIDGEHEAT tool, used to determine the heating curve, only requires the input data of the three blocks “weather parameters”, “bridge parameters” and “heating curve parameters”.

BRIDGESIM and BRIDGEHEAT are TRNSED applications. The input parameter values may either be given in the “primary units”, which correspond to the unit assumed by TRNSYS, or in the “secondary units”, which are more convenient units for the user. For example, the primary unit of thermal conductivity is normally [kJ/(h m K)], whereas the secondary unit is [W/(mK)]. All the units given in the following sections for the input parameters correspond to the “secondary units”. When BRIDGESIM or BRIDGEHEAT is used, it is highly recommended to set the units on “secondary”. This is done by selecting *Secondary Units* in the menu *TRNSYS* of the TRNSED application.

A3.4.1 Simulation parameters

The five entries related to these parameters are:

Month for simulation start: the simulation starts the first day of the chosen month.

Length of simulation: duration of the simulation period. The maximum duration is limited to 25 years if the simulation starts in January. If the simulation starts another month, the maximum duration is shorter, as the maximum of 25 years is counted from January of the first operational year.

Time interval for output results: quantities can be calculated on a monthly basis or a yearly basis. They are integrated heat rates or average values. See chapter A3.6 for a complete description of the output results.

Calculate temperature levels with inlet-outlet average: this parameter determines if the average temperature levels are calculated with the inlet-outlet means in bridge and store (yes) or not (no).

Print hourly values for last year: this parameter determines if the hourly values of some selected quantities are written (yes) or not (no) for the last operational year (see chapter A3.6 for more details).

A3.4.2 Weather parameters

The four entries are:

Latitude of the location: the latitude of the location where the project is evaluated [°].

Longitude difference of the location: longitude difference of the location where the project is evaluated. It is $Lst - Lloc$, where Lst is the standard meridian for the local time zone and

Lloc is the longitude of the location in question. For example Lst=-15° for Switzerland and Lloc=-8.33° for Zürich (East is negative).

Altitude of the location: the altitude of the location where the project is evaluated [m].

Weather data file (look in BridgeData directory): this file contains weather data on a hourly basis for the location where the project is evaluated. The weather data files are grouped in the BRIDGEDATA directory. The weather file to be chosen has the extension .PIL. This is a listing file containing the key word FILES on the first line, followed by the path name of the data file (with the extension .TXT), repeated 25 times on the next lines.

For example, weather data contained in the WEATHER.TXT file require the creation of a WEATHER.PIL file in the BRIDGEDATA directory. The WEATHER.PIL file is a text file that contains:

```
FILES
bridgedata\weather.txt
bridgedata\weather.txt
...
bridgedata\weather.txt
```

The weather data file, with the extension .TXT, contains hourly values of one year meteorological data. The first line must correspond to the first hour of the year. Each line must contain, in the order given below, the following quantities separated by a space or a tab character. It can be created with the programme METEONORM 5.1 (Remund und Kunz, 2004), using the “user defined” format:

- hour of the year [-];
- global horizontal radiation [W/m^2];
- diffuse horizontal radiation [W/m^2];
- global radiation in the tilted plane [W/m^2];
- diffuse radiation in the tilted plane [W/m^2];
- normal beam radiation [W/m^2];
- outdoor air temperature [$^{\circ}\text{C}$];
- relative humidity of the air [%];
- dew point temperature [$^{\circ}\text{C}$];
- cloud cover fraction [-].

The tilted plane is the horizontal plane (azimuth : 0° and inclination : 0°), but with the effect of the far horizon. In Switzerland, it can be calculated by METEONORM with the site coordinate (latitude, longitude and altitude).

A3.4.3 Bridge parameters

The 14 entries are:

Bridge area to unfreeze (SROAD): area of the bridge surface that is equipped with pipes for heating and solar gains collection [m^2].

Bridge area defined in PREBID input file: area of the bridge surface that is defined in PREBID, the TRNSYS programme editor for the building model TYPE 56 used to model the bridge. This area should be as close as possible as SROAD and must correspond to the area defined in PREBID output files for the bridge definition [m²].

PREBID file containing bridge description (for building TYPE 56) (*.BLD): PREBID output file *.BLD that contains the bridge description. This file should be stored in the BRIDGEDATA directory. See section A3.8 for a description of the input parameter used in PREBID.

Associated file containing the transfer function information (*.BLD): PREBID output file *.TRN associated to the *.BLD file that contains the transfer function information. This file should be stored in the BRIDGEDATA directory, together with the *.BLD file.

Spacing between the imbedded pipes in the bridge surface (BPIPE): average distance between two parallel pipes imbedded under the bridge surface [m].

Outer diameter of the imbedded pipes (DEXTPIPE): outer diameter of the pipes that are imbedded under the bridge surface [mm].

Inner diameter of the imbedded pipes (DINTPIPE): inner diameter of the pipes that are imbedded under the bridge surface [mm].

Thermal conductivity of the pipe material (LPIP): thermal conductivity of the material used for the pipes imbedded under the bridge surface [W/(mK)].

Thermal conductivity of the material in which the pipes are imbedded: thermal conductivity of the material layer in which the pipes are imbedded. It must correspond to the value used in BREPID for the bridge definition [W/(mK)].

Thermal conductivity of the heat carrier fluid: thermal conductivity of the fluid that circulates in the pipes [W/(mK)].

Nusselt number for the convective heat transfer from the fluid to the pipe wall (NUFLUID): a constant number is given for the convective heat transfer from the heat carrier fluid to the inner pipe wall and is defined here [-].

Fluid flow rate per square meter of heated bridge surface (FLOWSPEC): it is the total nominal flow rate flowing through the bridge divided by the heated bridge surface SROAD [litre/(h m²)].

Heat carrier fluid density: density of the heat carrier fluid that circulates in the imbedded pipes [kg/m³].

Heat carrier fluid heat capacity: specific heat capacity of the heat carrier fluid that circulates in the imbedded pipes [kJ/(kg K)].

A3.4.4 Duct store parameters

The 19 entries are:

Diameter of borehole heat exchanger (BHE) type 1 (DP1): diameter of the borehole for BHE type 1 [m].

Number of BHE type 1 (N1): number of borehole heat exchangers for BHE type 1 [-].

Average active length of BHE type 1 (H1): average length of the borehole heat exchangers type 1. The active length of a BHE is defined by the bore length for which a radial heat transfer with the surrounding ground may occur. In other terms, it is the length of the borehole that is equipped with pipes [m].

Thermal resistance of BHE type 1 (RB1): thermal resistance of BHE type 1. The thermal resistance of a BHE determines the temperature difference between the fluid and the ground in the immediate vicinity of the BHE under a given heat transfer rate. A typical value for a double U-pipe BHE is 0.1 K/(W/m). Such a value will induce a temperature difference of 5 K between the fluid temperature and the ground temperature at the borehole wall, when a heat transfer rate of 50 W/m takes place in steady flux conditions in the BHE [K/(W/m)].

Internal thermal resistance of BHE type 1 (RA1): internal thermal resistance of BHE type 1. A typical value for a double U-pipe BHE is 0.4 [K/(W/m)].

Diameter of BHE type 2: diameter of the borehole for the BHE type 2 [m].

Number of BHE type 2: number of borehole heat exchangers for BHE type 2 [-].

Average active length of BHE type 2: average length of the borehole heat exchangers type 2 [m].

Thermal resistance of BHE type 2: thermal resistance of BHE type 2 [K/(W/m)].

Internal thermal resistance of BHE type 2: internal thermal resistance of BHE type 2 [K/(W/m)].

Pipe configuration in BHE: The two possible pipe configurations in the BHE are:

U-pipe configuration: the pipe installation in the BHE is formed by one or more U-pipes placed close to the circumference of the borehole.

Coaxial pipe installation: the pipe installation in the BHE is formed by a coaxial pipe.

NB: the R_b and R_a values entered before must correspond to the correct pipe configuration.

Average spacing between the BHE (BBORE): average spacing of all the BHE in the two spatial directions of the ground area that contains the BHE [m].

Pipe number in a cross section of a BHE: number of pipes in a cross section of the BHE. For a double U-pipe BHE, the number of pipes is 4 [-].

Inner diameter of one pipe: average inner diameter of the pipes in the BHE [m].

Number of BHE coupled in series (NSERIE): number of BHE coupled in series. It defines the hydraulic coupling of the BHE, and thus the flow rate per BHE. The series of BHE are supposed to be coupled in the radial direction of the store, from the centre to the border [-].

Length of the horizontal pipes on top of the duct store (LCOEPF): the length of the horizontal pipes on ground is the effective pipe length that connects the BHE to the pipe collectors. This parameter is used for the determination of the heat transfer that occurs between the fluid in these pipes and the ground in the plane of the pipes. The pipes are supposed to lie below the insulation layer on top of the store if any [m].

Insulation thickness on top of the duct store (DISO): thickness of the insulation layer on top of the store if any [m]. A zero value means no insulation layer.

Thermal conductivity of the insulation material (LISO): thermal conductivity of the insulation material [W/(m K)].

Horizontal extension of the insulation layer given as a fraction of the store depth (FRISO): the insulation layer on top of the store may extend beyond the store boundary. FRISO give the radial extension of the insulation layer as a fraction of the store depth (the store vertical extension) [-].

Earth layer thickness covering the duct store (DHP): thickness of the earth layer that may cover the top of the store and the insulation layer if any [m]. A zero value means no top earth layer.

A3.4.5 Ground parameters

Up to 3 different horizontal ground layers can be specified. A ground layer is defined by its thickness, the thermal conductivity and volumetric heat capacity of the ground and the Darcy velocity of the water contained in the ground layer.

The 16 entries are:

Mean undisturbed ground temperature at the surface (TGRDIN): initial temperature of the ground before the construction of the borehole field. This temperature should be close to the annual average value of the ground near the surface. A rough estimation is to use the mean annual air temperature at the surface plus about 1 K [°C].

Mean temperature gradient in the undisturbed ground (DTGRND): geothermal temperature gradient, assumed to be constant. It defines the temperature increase of the ground with the depth [K/km].

Thermal conductivity of ground layer 1 (LG1): thermal conductivity of ground layer 1 [W/(mK)].

Volumetric heat capacity of ground layer 1 (CG1): volumetric heat capacity of ground layer 1 [MJ/(m³K)].

Thickness of ground layer 1 (HG11): thickness of ground layer 1. Ground layer 1 must be larger than 0.3m, the thickness of ground layer 0 that lies on top of ground layer 1. Ground layer 0 is a pre-defined ground layer in which lie the horizontal pipes that connect the BHE to the system [m].

Darcy velocity of ground water in layer 1 (DA1): Darcy velocity of ground water in ground layer 1. This parameter determines the forced convection in ground layer 1 due to a horizontal regional ground water flow. A zero value means no forced convection [m/day].

The Darcy velocity (in m/s) can be obtained by the product of the ground layer permeability (in m/s) times the local horizontal hydraulic gradient of ground water (in m/m).

NB: only a direct thermal interaction with the BHE is computed. In other terms, if the ground layer lies below the bottom of the BHE, the effect of a regional ground water flow will not be computed. If only the upper part of ground layer is crossed by the BHE, the effect will be computed in the upper part only. The thermal influence will be then propagated upwards and downwards by pure heat conduction.

NB: the full influence of a ground water flow is only calculated if the two last parameters from the ground parameter block are switched to “YES”.

Thermal conductivity of ground layer 2 (LG2): thermal conductivity of ground layer 2 [W/(mK)].

Volumetric heat capacity of ground layer 2 (CG2): volumetric heat capacity of ground layer 2 [MJ/(m³K)].

Thickness of ground layer 2 (HG2): thickness of ground layer 2 [m].

Darcy velocity of ground water in layer 2 (DA2): Darcy velocity of ground water in ground layer 2. This parameter determines the forced convection in ground layer 2 due to a horizontal regional ground water flow. A zero value means no forced convection [m/day].

Thermal conductivity of ground layer 3 (LG3): thermal conductivity of ground layer 3 [W/(mK)].

Volumetric heat capacity of ground layer 3 (CG3): volumetric heat capacity of ground layer 3 [MJ/(m³K)].

Thickness of ground layer 3 (HG3): thickness of ground layer 3. The thickness of ground layer 3, which is the lowest ground layer, is supposed to extend downward as far as necessary for the requirement of the thermal calculations [m].

Darcy velocity of ground water in layer 3 (DA3): Darcy velocity of ground water in ground layer 3. This parameter determines the forced convection in ground layer 3 due to a horizontal regional ground water flow. A zero value means no forced convection [m/day].

Simulate forced convection on global process: this parameter determines if the global effect of the forced convection is taken into account (see below).

YES: global effect of forced convection taken into account;

NO: global effect of forced convection not taken into account.

Simulate forced convection on local process: this parameter determines if the local effect of the forced convection is taken into account (see below).

YES: local effect of forced convection taken into account;

NO: local effect of forced convection not taken into account.

The effect of forced convection is treated as the superposition of two effects:

- **the global process:**

a heat balance of the heat transfer by forced convection is performed on the boundary of the ground volume that is ascribed to the BHE. The heat quantity transferred by forced convection to or from the ground volume is treated as a global temperature change of the ground temperature in the volume. The global process takes into account long term effects, which, in particular, determine the magnitude of a natural thermal recharge of the ground by a regional ground water flow.

- **the local process:**

for the case of pure heat conduction, a temperature gradient takes place around the BHE when they are used to transfer heat with the ground. As a result, the heat transfer is limited by the presence of a local temperature difference between the BHE and the mean ground temperature. If ground water flows across the BHE, the temperature field will be shifted. For a sufficiently large flow, the local temperature difference will be decreased and the heat transfer between the BHE and the ground improved. The local process takes into account the improvement of this heat transfer.

A3.4.6 Water tank parameters

The 4 entries are:

Water tank volume (VOLTANK): water volume of the short term water tank coupled between the bridge flow loop and the duct store flow loop [m³].

Water tank surface (STANK): area of the water tank through which heat losses with the ambient take place [m²].

Water tank heat loss coefficient (HTANK): average heat loss coefficient of the water tank [W/(m²K)].

Mean ambient temperature around the water tank (TAIRTANK): mean ambient air temperature in which stand the water tank. A mean constant value is assumed [°C].

A3.4.7 Circulation pump parameter

The only entry is:

Total nominal electric power of the circulation pumps (PELPUMP): total electric power absorbed by all the circulation pumps of the system. Simulations have shown that if the bridge circulation pump is operating, so is the duct store one and vice e versa. As a constant flow rate is simulated, the electric energy consumed by the circulation pumps is simply the product of the total electric power by the system operation time. The secondary unit of the nominal electric power is [kW].

A3.4.8 Heating curve parameters

The five entries correspond to TE1, TE2, TE3, TS2 and TS3 of figure A3.3. TS1 does not need to be entered as its value is set to TS2.

Outdoor air temperature below which the bridge surface is heated (TE3): outdoor air temperature below which the bridge is heated [°C].

Corresponding set point for the forward fluid temperature in the bridge (TS3): set value of the forward fluid temperature to the bridge, when the outdoor air temperature is equal to TE3 [°C].

Outdoor air temperature below which the forward fluid temperature is constant (TE2): outdoor air temperature below which the forward fluid temperature is constant [°C].

Corresponding set point for the forward fluid temperature in the bridge (TS2): set value of the forward fluid temperature to the bridge, when the outdoor air temperature is equal to TE2. When the air temperature is between TE2 and TE3, the forward fluid temperature is linearly interpolated between TS2 and TS3 in function of the air temperature [°C].

Outdoor air temperature limit below which bridge heating is stopped (TE1): outdoor air temperature below which bridge heating is stopped. Between TE1 and TE2, the forward fluid temperature is constant and set to TS2 [°C].

A3.4.9 Solar controller parameters

The 2 entries are:

Higher dead band temperature for the solar heat controller (DT1CST): higher dead band temperature for the solar heat controller. The temperature difference between the average bridge temperature in the imbedded pipe plane and the outlet fluid from the water tank has to be greater than DT1CST before the circulation pump can be switched on to collect solar gains [K].

Lower dead band temperature for the solar heat controller (DT0CST): lower dead band temperature for the solar heat controller. The temperature difference between the average bridge temperature in the imbedded pipe plane and the outlet fluid from the water tank has to be smaller than DT0CST before the circulation pump is switched off to stop collecting solar gains [K].

A3.5 How to run BRIDGESIM

Once the data are defined as desired, it is recommended to save the data before a simulation is started. The input data are saved in the file BRIDGESIM.TRD. It is done in the *File / Save* menu of the TRNSED programme. A simulation is started in the menu *TRNSYS / Calculate*. A series of simulations can also be defined and then simulated. The user is advised to read the help provided with the TRNSED programme. It is found in the menu *Help / TRNSED Help*, and then look for the topic *Parametrics Menu*.

When a series of simulations is performed, a *New Table* is created in the menu *Parametrics*. All the parameters that can be varied are listed. The user selects the desired parameter to be varied and defines the ranges of variations. The units of the parameters must correspond to the primary units. In table A3.1 are listed all the parameter that can be varied, together with their primary units and the conversion factor from secondary units.

Parameter	Short description	Primary unit	= sec. unit x factor
BBORE	Average spacing between the BHE (Borehole Heat Exchanger)	m	= m
BPIPE	Spacing between the imbedded pipes in the bridge	m	= m
CG1	Volumetric heat capacity of ground layer 1	kJ/(m ³ K)	= MJ/(m ³ K) x 1000
CG2	Volumetric heat capacity of ground layer 2	kJ/(m ³ K)	= MJ/(m ³ K) x 1000
CG3	Volumetric heat capacity of ground layer 3	kJ/(m ³ K)	= MJ/(m ³ K) x 1000
DA1	Darcy velocity of ground water in layer 1	m/s	= m/day x (1/86'400)
DA2	Darcy velocity of ground water in layer 2	m/s	= m/day x (1/86'400)
DA3	Darcy velocity of ground water in layer 3	m/s	= m/day x (1/86'400)
DEXTPIPE	Outer diameter of the imbedded pipes	m	= mm x (1/1'000)
DHP	Earth layer thickness covering the duct store	m	= m
DINTPIPE	Inner diameter of the imbedded pipes	m	= mm x (1/1'000)
DISO	Insulation thickness on top of the duct store	m	= m
DP1	Diameter of BHE type 1	m	= m

Table A3.1 List of the parameters that can be varied in a multiple simulation

Parameter	Short description	Primary unit	= sec. unit x factor
DT0CST	Lower dead band temperature for the solar controller	K	= K
DT1CST	Higher dead band temperature for the solar controller	K	= K
DTGRND	Mean temperature gradient in the undisturbed ground	K/m	= K/km x (1/1'000)
FLAWSPEC	Fluid flow rate per square meter of heated bridge surface	litre/(h m ²)	= litre/(h m ²)
FRISO	Horizontal extension of the insulation layer given as a fraction of store height	-	= -
H1	Average active length of BHE type 1	m	= m
HG11	Thickness of ground layer 1	m	= m
HG2	Thickness of ground layer 2	m	= m
HG3	Thickness of ground layer 3	m	= m
HTANK	Water tank heat loss coefficient	kJ/(h m ² K)	= W/(m ² K) x 3.6
LCOEPF	Length of the horizontal pipes on top of the duct store	m	= m
LG1	Thermal conductivity of ground layer 1	kJ/(h m K)	= W/(mK) x 3.6
LG2	Thermal conductivity of ground layer 2	kJ/(h m K)	= W/(mK) x 3.6
LG3	Thermal conductivity of ground layer 3	kJ/(h m K)	= W/(mK) x 3.6
LISO	Thermal conductivity of the insulation material	kJ/(h m K)	= W/(mK) x 3.6
LPIP	Thermal conductivity of the pipe material	W/(mK)	= W/(mK)
N1	Number of BHE type 1	-	= -
NSERIE	Number of BHE coupled in series	-	= -
NUFLUID	Nusselt number for the convective heat transfer from the fluid to the pipe wall	-	= -
PELPUMP	Total nominal electric power of the circulation pumps	kJ/h	= kW x 3'600
RA1	Internal thermal resistance of BHE type 1	K/(kJ/hm)	= K/(W/m) x (1/3.6)
RB1	Thermal resistance of BHE type 1	K/(kJ/hm)	= K/(W/m) x (1/3.6)
SROAD	Heated bridge area	m ²	= m ²

Table A3.1 List of the parameters that can be varied in a multiple simulation (continued)

Parameter	Short description	Primary unit	= sec. unit x factor
STANK	Water tank surface	m ²	= m ²
TAIRTANK	Mean ambient temperature around the water tank	°C	= °C
TE1	Outdoor air temperature limit below which bridge heating is stopped	°C	= °C
TE2	Outdoor air temperature below which the forward fluid temperature is constant	°C	= °C
TE3	Outdoor air temperature below which bridge heating is allowed	°C	= °C
TGRDIN	Mean undisturbed ground temperature at the surface	°C	= °C
TS2	Set point fluid temperature in bridge at TE2 (normally is the maximum value)	°C	= °C
TS3	Set point fluid temperature in bridge at TE3 (normally is the minimum value)	°C	= °C
VOLTANK	Water tank volume	m ³	= m ³

Table A3.1 List of the parameters that can be varied in a multiple simulation (continued)

If a parametric study is performed with the borehole parameters (RB1, RA1, N1, H1), it is best to define only one type of BHE.

A multiple simulation is started once a parameter table has been created, using the command *Run Table* in the menu *TRNSYS*.

A3.6 Output data from BRIDGESIM

The output data from BRIDGESIM are written in four different files. Two files contain the input information given to BRIDGESIM and possible error messages, and two files contains the calculated quantities by BRIDGESIM. Assuming that the file containing the input data is called BRIDGESIM.TRD, the following files are written:

- BRIDGESIM.LST (listing file)
- DST.DAT (input data related to TRNVDSTP)
- BRIDGESIM.OUT (output data, calculated parameters, integrated quantities)
- BRIDGESIM.PLT (output data, evolution of selected variables)

When a simulation is completed, the file BRIDGESIM.LST can be viewed in the *Windows* menu of the TRNSED programme, and the files BRIDGESIM.OUT in the *Windows / Output* menu. A plot can be made with the file BRIDGESIM.PLT and viewed in the *Plot* menu. The file DST.DAT can be viewed in the *File / Open* menu. The file name DST.DAT has to be entered in the *File name* field of the dialogue box which popped on the screen. (An error message will then appear, as DST.DAT is supposed to be a TRNSED file. However, it is still possible to view the file).

A3.6.1 The Listing File BRIDGESIM.LST

This is the listing file written by TRNSYS. All the information contained in BRIDGESIM.TRD is written in the listing file, together with some information related to the simulation itself (simulation duration, total number of call for each component, warning message if any, etc.). It should be noted that if an error makes a simulation to abort, the corresponding error message is written at the end of the listing file. It is recommended to read this file every time a simulation is terminated with an error.

A3.6.2 The File DST.DAT

This file is written by the TRNVDSTP component which simulates the borehole heat exchanger field. It contains all the parameters used by this component, together with information on the fields used for the simulation of the heat transport in the ground.

A3.6.3 The Output File BRIDGESIM.OUT

This file starts with some of the mean parameter values which are calculated and used for the simulation. They are:

NEPF	[-] : total number of borehole heat exchangers.
HEPF	[m] : average active length of all the borehole heat exchangers.
BBore	[m]: average spacing between the borehole heat exchangers.
FloEPF	[kg/h] : total mass flow rate through the bridge and the duct store flow circuits.
SRoad	[m ²] : total heated bridge area.
VolTank	[m ³]: short term water tank volume.
FLMEAN	[-]: parameter for average inlet – outlet (FLMEAN=1) or not (FLMEAN=0) when the mean temperature levels are computed.

Maximum or minimum values of some selected quantities are calculated on a regular time interval (month or year).

PMaxSolBri	[kW]: maximum hourly thermal power recovered from the bridge (solar thermal power).
PMaxLoaDST	[kW]: maximum hourly thermal power injected into the ground duct store.
PMinUnload	[kW]: as extracted heat is negative, the minimum corresponds to the maximum hourly thermal power extracted from the ground duct store.
PMinHeatBr	[kW]: as heating energy delivered to the bridge is negative, the minimum corresponds to the maximum hourly thermal power injected into the bridge.
TfMinStk	[degree C]: minimum inlet fluid temperature in the ground duct store during operation.
TfMaxStk	[degree C]: maximum inlet fluid temperature in the ground duct store during operation.

Integrated or average quantities of various quantities are calculated on a regular time interval (month or year). They are produced with the help of 6 simulation summary type components. The labels of each calculated quantity are explained below for each of the simulation summary.

First simulation summary:

Qsolar	[kWh]: incident solar radiation on bridge surface.
QSolBridge	[kWh]: collected solar heat from bridge.
QLoadStk	[kWh]: stored heat in ground duct store.
QLossStk	[kWh]: duct store heat losses.
QEDSTin	[kWh]: duct store stored energy (variation of its internal energy).
QUnloadStk	[kWh]: recovered heat from ground duct store.
QHeatBridg	[kWh]: heating energy injected into the bridge.
QLossTank	[kWh]: heat losses from the short term water tank.
QElecLoad	[kWh]: circulation pump electric energy for solar gain collection.
QElecUnloa	[kWh]: circulation pump electric energy for bridge heating.

A system heat balance can be performed with the following relation:

$$\mathbf{QSolBridge} = \mathbf{QLossTank} + \mathbf{QHeatBridg} + \mathbf{QLossStk} + \mathbf{QEDSTin}$$

Second simulation summary:

QSolBridge	[kWh]: collected solar heat from bridge (only positive values).
TSolBridge	[°C]: temperature level of the outlet fluid from the bridge when solar gains are collected (in the case FLMEAN = 0). If FLMEAN = 1, the temperature level is the average inlet – outlet.
QLoadStk+	[kWh]: stored heat in duct store (only positive values).
TLoadStk	[°C]: temperature level of the inlet fluid in the duct store when the duct store is loaded (in the case FLMEAN = 0). If FLMEAN = 1, the temperature level is the average inlet – outlet.
TmDST	[°C]: mean duct store temperature.
QUnloadStk	[kWh]: recovered heat from duct storage (only negative values).
TUnloadStk	[°C]: temperature level of the outlet fluid from the duct store when the duct store is unloaded (in the case FLMEAN = 0). If FLMEAN = 1, the temperature level is the average inlet – outlet.
QHeatBridg	[kWh]: heating in bridge (only negative values).
THeatBridg	[°C]: temperature level of the inlet fluid in the bridge when the bridge is heated (in the case FLMEAN = 0). If FLMEAN = 1, the temperature level is the average inlet – outlet.
TAirExtM	[°C]: mean outdoor air temperature.

Third simulation summary:

tload	[h]: duration of the system loading operation (solar collection duration).
tunload	[h]: duration of the system unloading operation (bridge heating duration).
HHorTot	[kWh/m ²]: total incident solar radiation on bridge surface per square meter.
SolEff	[%]: solar heat collection efficiency of the bridge (QSolBridge/QSolar).
DuctEff	[%]: duct store efficiency (-QUnloadStk/QLoadStk).
EffSys	[-]: system efficiency (-QHeatBridg/(QElecLoad+QElecUnloa)).
QLoadSpe	[kWh/m]: injected energy in duct store per meter borehole heat exchanger.
PLoadSpe	[W/m]: mean injected power in duct store per meter borehole heat exchanger.
QUnloadSpe	[kWh/m]: extracted energy from duct store per meter borehole heat exchanger.
PUnloadSpe	[W/m]: mean extracted power from duct store per meter borehole heat exchanger.

Fourth simulation summary:

TBSol	[°C]: temperature level of the inlet fluid in the bridge when the solar gains are collected (in the case FLMEAN = 0). If FLMEAN = 1, the temperature level is the average inlet – outlet.
QBSol	[kWh]: collected solar heat from bridge.
TBHeat	[°C]: temperature level of the outlet fluid from the bridge when the bridge is heated (in the case FLMEAN = 0). If FLMEAN = 1, the temperature level is the average inlet – outlet.
QBHeat	[kWh]: heating energy injected into the bridge.
QLosses	[kWh]: water tank thermal losses (>0 losses; <0 gains).
TSLoad	[°C]: temperature level of the outlet fluid from the ground duct store when the store is loaded (in the case FLMEAN = 0). If FLMEAN = 1, the temperature level is the average inlet – outlet.
QSLoad	[kWh]: stored heat in ground duct store.
TSUnload	[°C]: temperature level of the inlet fluid in the ground duct store when the store is unloaded (in the case FLMEAN = 0). If FLMEAN = 1, the temperature level is the average inlet – outlet.
QSUnload	[kWh]: recovered heat from ground duct store.

ErrSys [%]: error in percent of the system heat balance. The system heat balance is calculated with:

$$\mathbf{QBSol - QBHeat - QSLoad + QSUnload - QLosses - \delta Q = 0}$$

deltaQ is the variation of the internal energy of the water tank.

Fifth simulation summary:

TTop	[°C]: mean road surface temperature.
TBot	[°C]: mean "under" bridge surface temperature.
TSurfi	[°C]: mean surface temperature of inner surfaces of the fictive zone for the simulation of the pipes in the bridge. It corresponds to the mean bridge temperature in the plane of the imbedded pipes.
TAirZon	[°C]: mean air temperature of fictive zone for the simulation of the pipes in the bridge. Type56 parameters should be set so that TAirZon is quasi equal to TSurfi).
QRoad	[kWh]: thermal energy transferred through the road surface.
QUnder	[kWh]: thermal energy transferred through the "under" bridge surface.
QAbsO	[kWh]: solar energy absorbed in the road surface.
QStored	[kWh]: thermal energy stored in the bridge structure (+ stored; - unstored).
QExFl	[kWh]: thermal energy exchanged by pipes imbedded in the bridge.
Error	[%]: error in percent of the fictive zone heat balance. The fictive zone heat balance is calculated with:

$$Q_{siTop} + Q_{siBot} - Q_{exFl} = 0$$

Q_{siTop} is the thermal energy flowing from the pipe plane to the road surface;

Q_{siBot} is the thermal energy flowing from the pipe plane to the "under" bridge surface.

Sixth simulation summary:

QDstToGrd	[kWh]: energy transferred to the ground by the vertical borehole heat exchangers.
QPipToGrd	[kWh]: energy transferred to the ground by the horizontal pipe connections.
QLossOut	[kWh]: total heat losses from the duct store.
QEDSTIN	[kWh]: duct store stored energy (variation of its internal energy).
ERRDS%	[%]: error on the duct store heat balance calculation.
TmCenter	[°C]: mean borehole temperature in ground duct store centre.
TmBorder	[°C]: mean borehole temperature in ground duct store border.
QLossTout	[kWh]: heat losses through the ground duct store top side.
QLossSout	[kWh]: heat losses through the ground duct store vertical sides.
QLossBout	[kWh]: heat losses through the ground duct store bottom side.

A3.6.4 The Plot File BRIDGESIM.PLT

This file contains the time evolution of some temperatures and heat rates for the last year of the simulation period. Hourly values of these quantities are written in this file only if the input parameter “Print hourly values for last year” is set to “Yes”. Their labels are explained below. The 11 columns of the file are:

Time	[hour]: time in hours from the first hour of the year of the simulation start.
TairExt	[degree C]: outdoor air temperature.
HHGLO	[W/m ²]: incident solar radiation on bridge surface.
TsBridge	[degree C]: surface temperature of the road.
TinBridge	[degree C]: inlet fluid temperature in the bridge flow circuit.
ToutBridge	[degree C]: outlet fluid temperature from the bridge flow circuit.
TmDuct	[degree C]: average temperature of the ground duct store.
TinDuct	[degree C]: inlet fluid temperature in the duct store flow circuit.
ToutDuct	[degree C]: outlet fluid temperature from the duct store flow circuit.
PBridge	[kWh/h]: heat rate transferred by the flow circuit in the bridge.
PDuct	[kWh/h]: heat rate transferred by the flow circuit in the ground duct store.

A3.6.5 Heat Balance of the System

The quantities contained in the file BRIDGESIM.OUT allows the user to establish an overall heat balance of the system. A diagram of the energy fluxes is shown in Fig. A3.4.

Global system heat balance

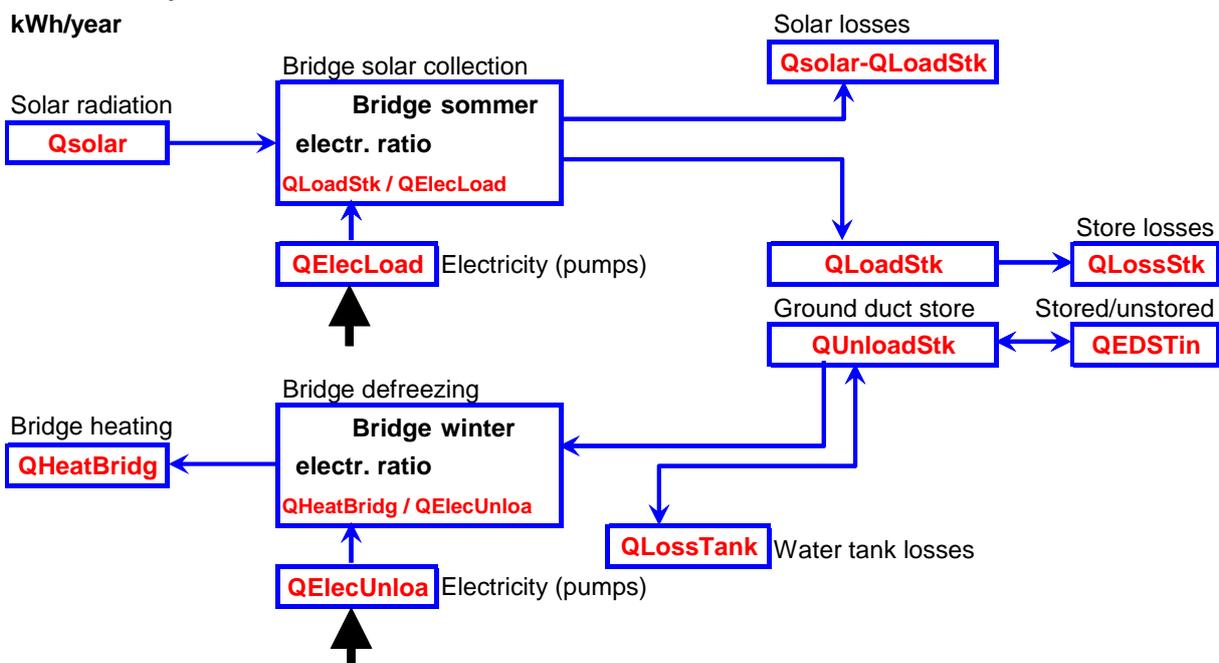


Figure A3.4 System heat balance of the system

The heat quantities are calculated by the first simulation summary:

Qsolar	[kWh]: incident solar radiation on bridge surface.
QLoadStk	[kWh]: stored heat in ground duct store.
QLossStk	[kWh]: duct store heat losses.
QEDSTin	[kWh]: duct store stored energy (variation of its internal energy).
QUnloadStk	[kWh]: recovered heat from ground duct store.
QHeatBridg	[kWh]: heating energy injected into the bridge.
QLossTank	[kWh]: heat losses from the short term water tank.
QElecLoad	[kWh]: circulation pump electric energy for solar gain collection.
QElecUnloa	[kWh]: circulation pump electric energy for bridge heating.

A3.7 Output results with BRIDGESIM

An excel file has been created with the name BRIDGESIM.XLS in order to produce graphical output results from the output files created by BRIDGESIM. It contains macros that automatically open the output files, copy the content into the BRIDGESIM.XLS file and close them. The global system heat balance is produced together with various design quantities and files. Figure A3.5 shows the various output results that can be produced.

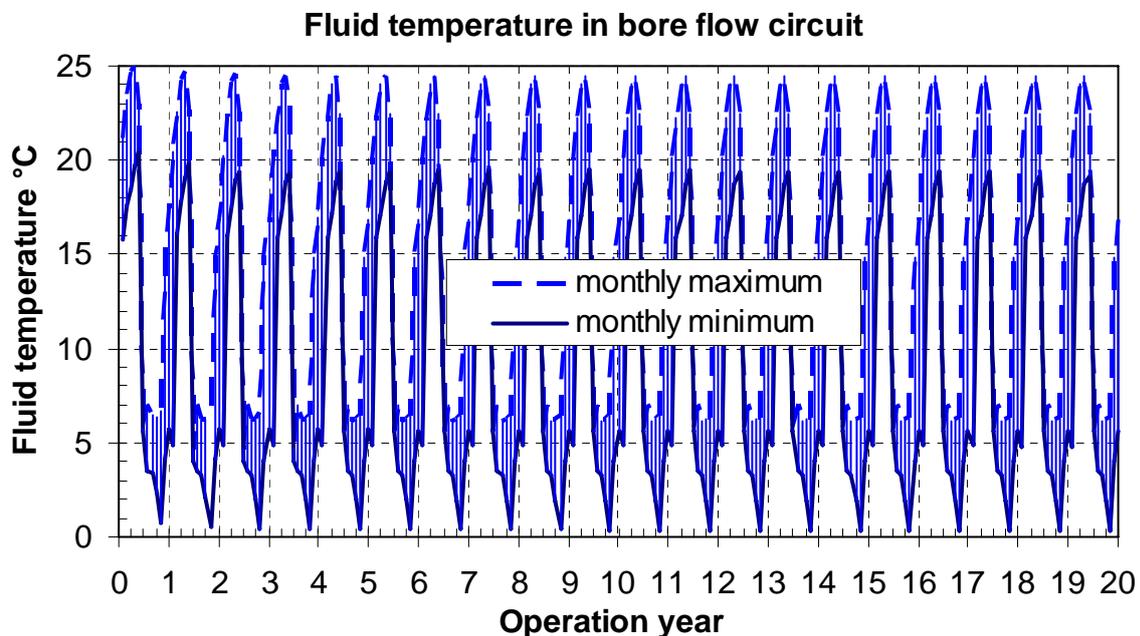
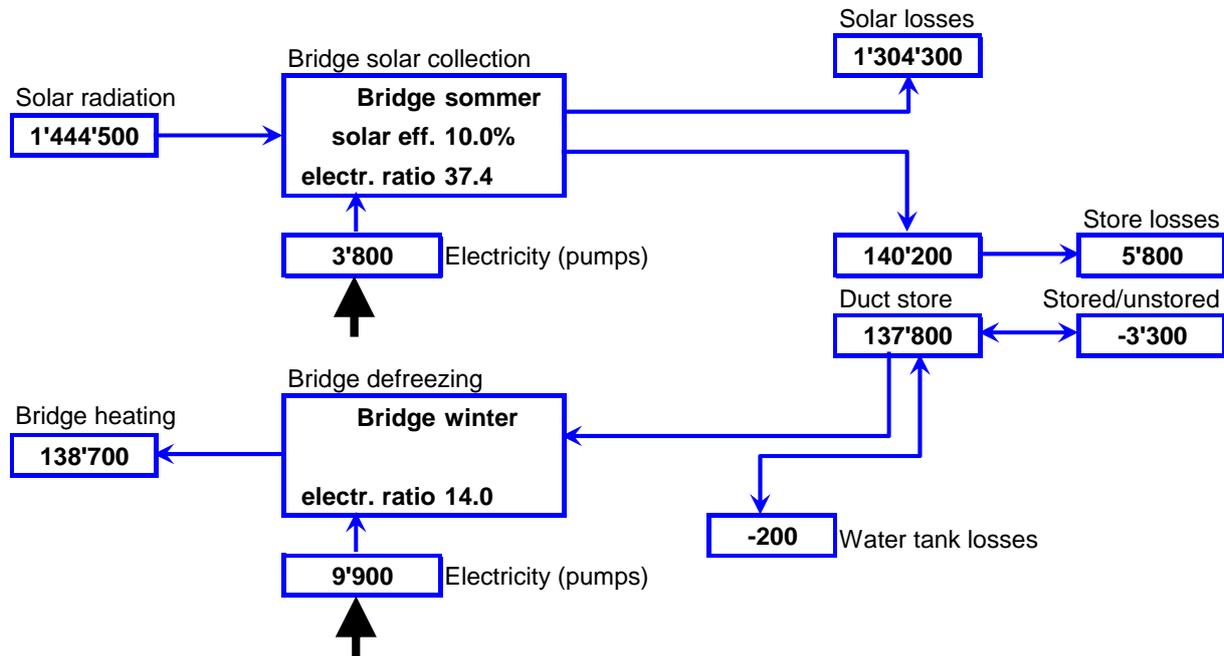


Figure A3.5 Example of output result produced with BRIDGESIM.XLS

Global system heat balance

kWh/year

mean operation year



Total electric energy for the pumps

13'600	kWh/y
10.1	-

Global system ratio

Duct store discharge

Heat extraction rate per meter borehole
Annual extracted energy per meter borehole

Max	Mean	
55	13	W/m
	23	kWh/m/y

Discharge duration
1'795 hours/y

Duct store charge

Heat injection rate per meter borehole
Annual injected energy per meter borehole

Max	Mean	
69	35	W/m
	24	kWh/m/y
	98	%

Charge duration
682 hours/y

Duct store efficiency

Road surface temperature Ts

Number of hours with temperature Ts below 0°C for the last simulated year
Number of hours with Ts < 0°C and Taria > -4°C for the last simulated year
Degree-hours NTs for Ts < 0°C and Taria > -4°C for the last simulated year

157	hours/y
27	hours/y
22	Kh/y

Figure A3.5 Example of output result produced with BRIDGESIM.XLS (continued)

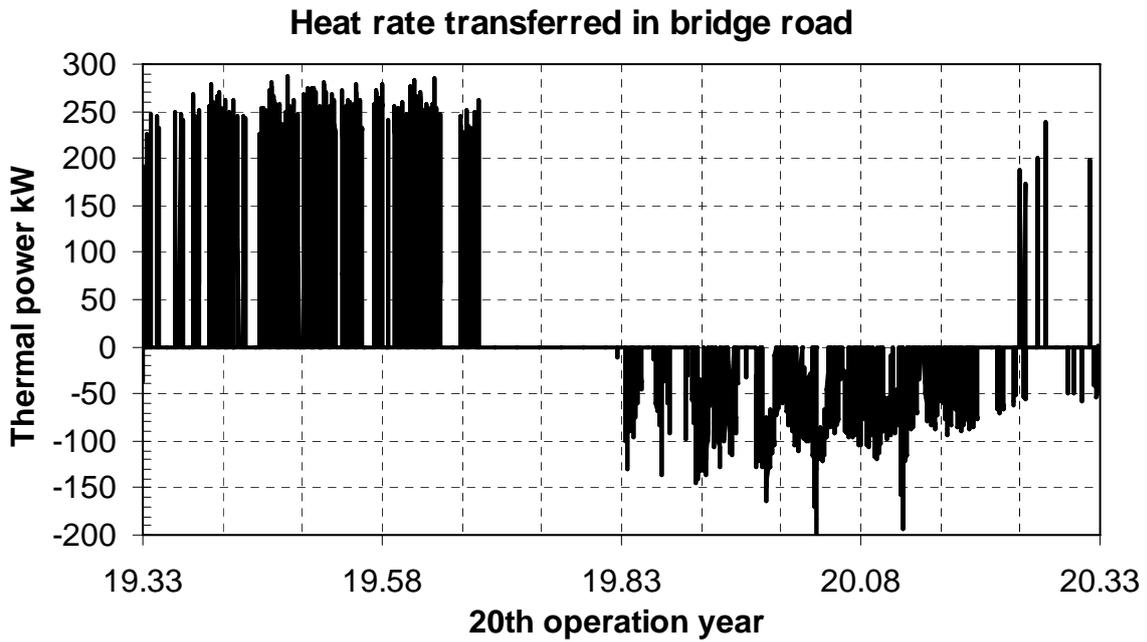
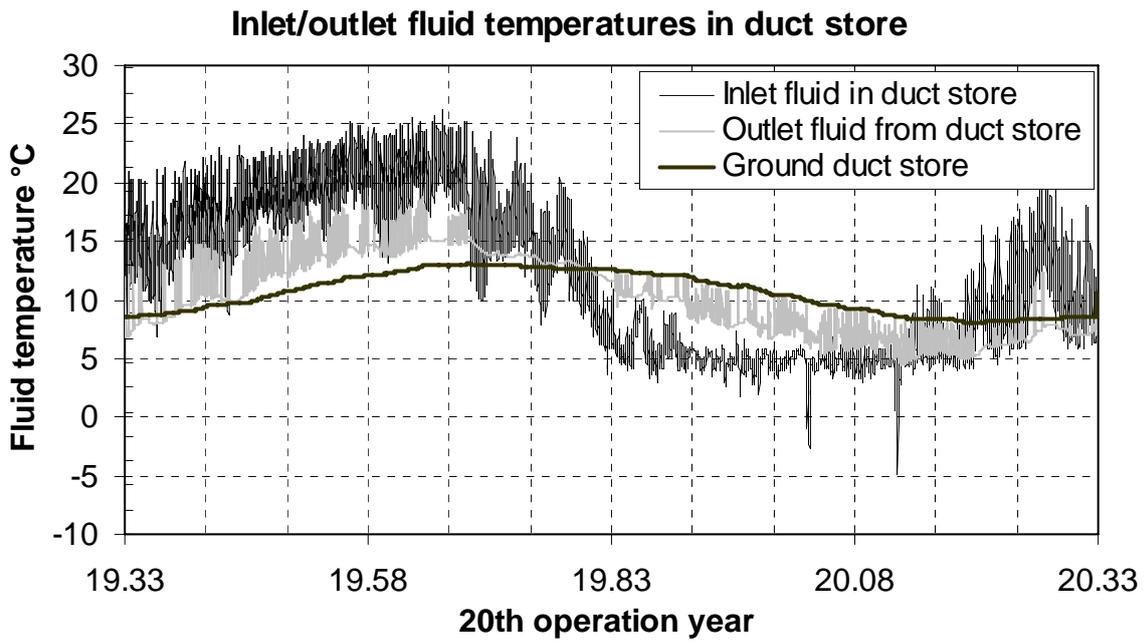


Figure A3.5 Example of output result produced with BRIDGESIM.XLS (continued)

Ground duct store monthly heat balance and temperature levels

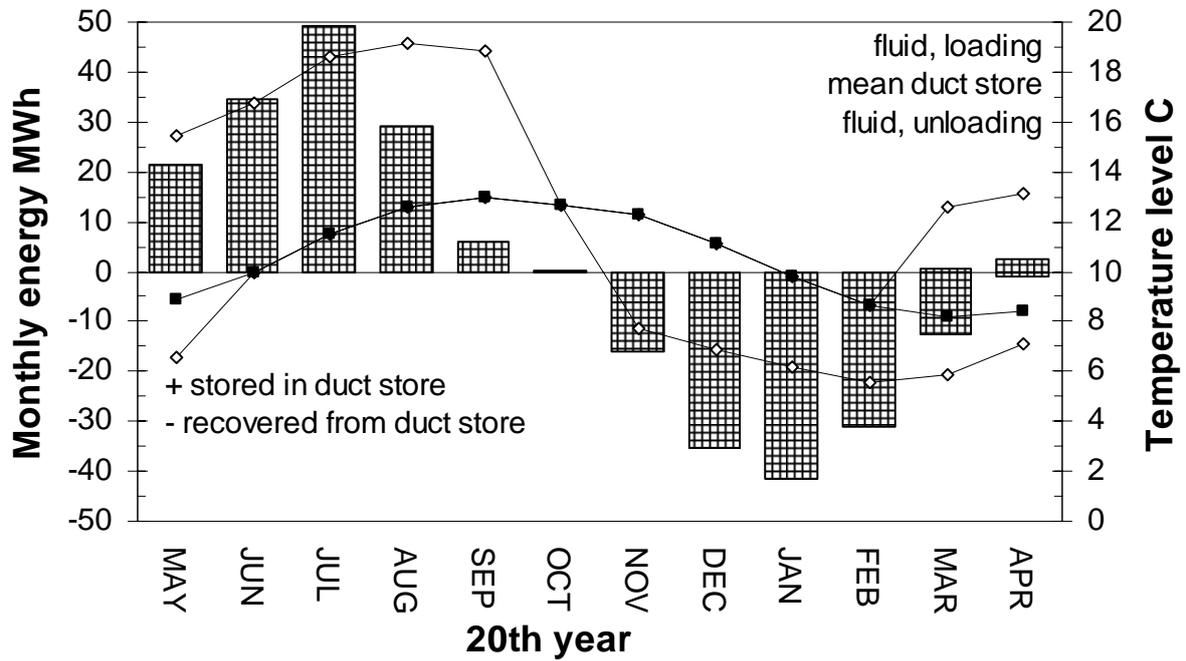


Figure A3.5 Example of output result produced with BRIDGESIM.XLS (continued)

Other macros in BRIDGESIM.XLS allow the user to visualise results of multiple simulations produced with the TRNSED application BRIDGESIM.

A3.8 Input parameters to PREBID

The PREBID programme from the TRNSYS package is used to define and calculate bridge thermal parameters. The PREBID version 5.0.8 was used and the bridge parameters are stored in text files that are then read as input data by BRIDGESIM. The input parameters used in this section correspond to the bridge defined for the Serso project. The bridge structure, composed of various material layers, is divided into two parts: the bridge section above the pipe plane and the bridge section below the pipe plane (see figure A3.6).

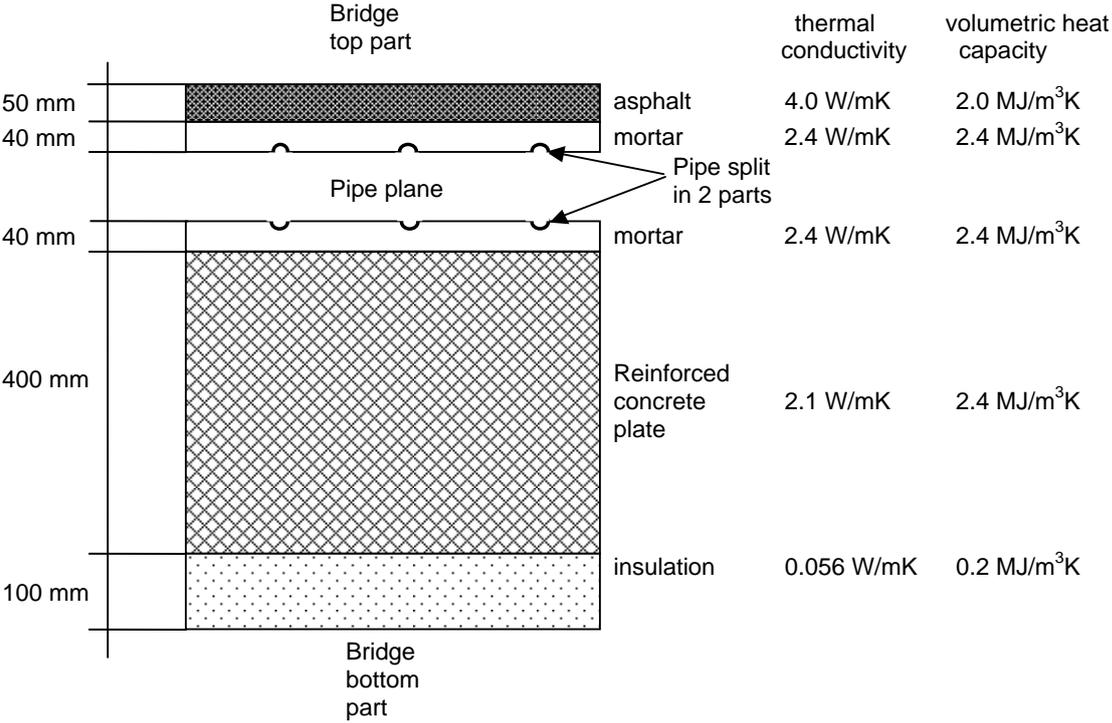


Figure A3.6 Section of the bridge in Serso subdivided into two parts: above and below the pipe plane

PREBID is used to define one zone whose temperature is the average bridge temperature in the pipe plane. The heat transfer from the zone (pipe plane) to the environment occurs by transmission only through the top part and the bottom part of the bridge, i. e. through two “horizontal” walls. The heat transfer from the fluid circulating in the pipes and the zone is calculated with a thermal resistance whose calculation is detailed in annex 2. This heat transfer is calculated in BRIDGESIM on the basis of the zone (pipe plane) temperature, inlet fluid temperature and flow rate, and given as input to the zone model as a convective heat gain. For this reason, the thermal conductivity of the material in which the pipes are imbedded (mortar) is an input parameter to BRIDGESIM and must correspond to the value given in PREBID. The bridge input parameters are shown in figures A3.7 to A3.11 with BREBID input parameter screen.

PREBID interface for the bridge definition.

Only one zone is defined. The zone is called PONT

Two orientations are defined for solar radiation:

HORIZONTAL
UNDER

(unlike the HORIZONTAL orientation, the UNDER orientation corresponds to the bottom face of the bridge and no solar radiation is received)

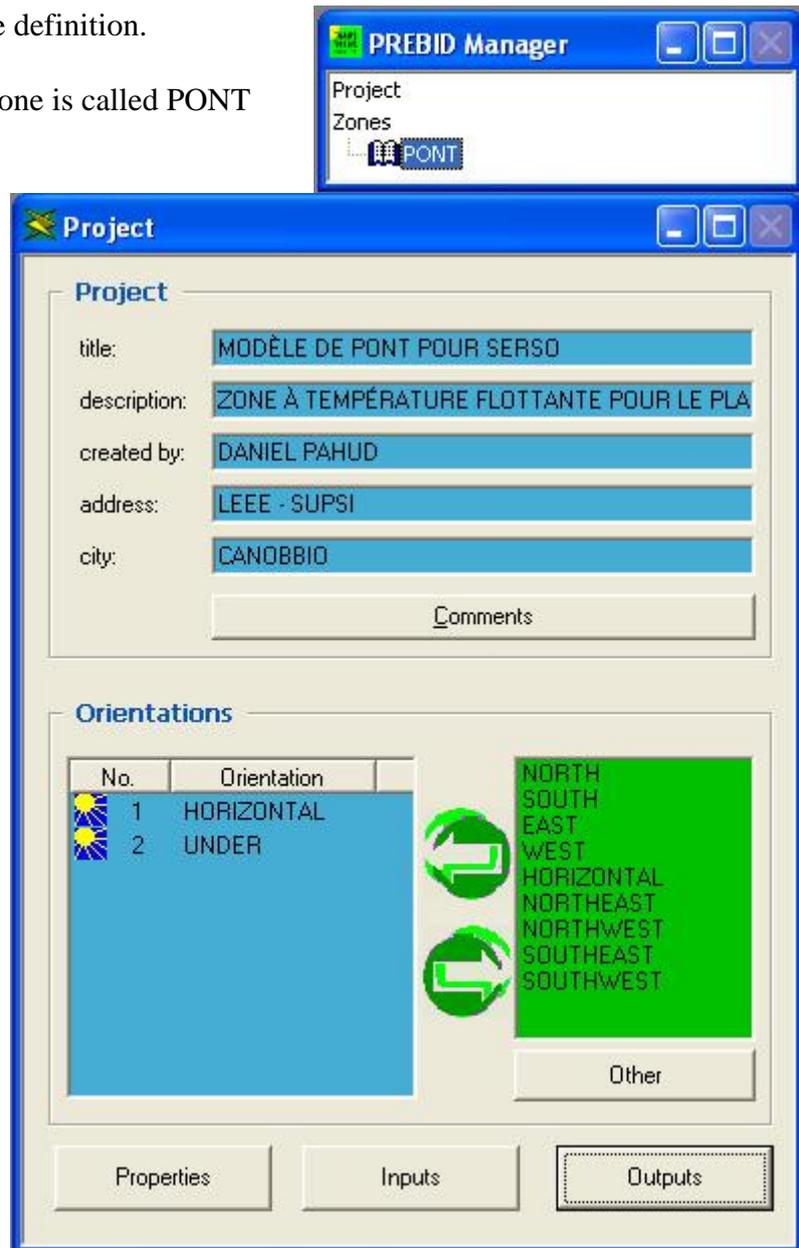


Figure A3.7 Input parameters in BREBID as entered in the various screen interface

The top part of the bridge and bottom part of the bridge are simulated with two wall which are respectively defined as SURFACE and SOTTO (see figure A3.8 and A3.9). It can be noticed that a bridge surface of 1'000 m² is defined in PREBID. In BRIDGESIM, this surface has to be entered together with the actual bridge surface SROAD, so that the thermal performances of the bridge can be scaled with the area ratio.



Figure A3.8 Input parameters in BREBID for the two walls SURFACE and SOTTO

Top part of the bridge, from the pipe plane to the road surface

Wall Type Manager

wall type: SURFACE

No.	Layer	Thickness
1	PIPELAYER	0.040
2	BITUMENDAC	0.050

total thickness: 0.090 m

u - value: 5.021 W/m² K

Solar Absorptance of Wall

front: 1

back: 0.7

Convective Heat Transfer Coefficient of Wall

front: 720 kJ/h m² K

back: 36 kJ/h m² K

OK Cancel

Bottom part of the bridge, from the pipe plane to the bottom face of the bridge

Wall Type Manager

wall type: SOTTO

No.	Layer	Thickness
1	PIPELAYER	0.040
2	NORMALBETO	0.400
3	SCHAUMGLAS	0.100

total thickness: 0.540 m

u - value: 0.459 W/m² K

Solar Absorptance of Wall

front: 1

back: 0.6

Convective Heat Transfer Coefficient of Wall

front: 720 kJ/h m² K

back: 36 kJ/h m² K

OK Cancel

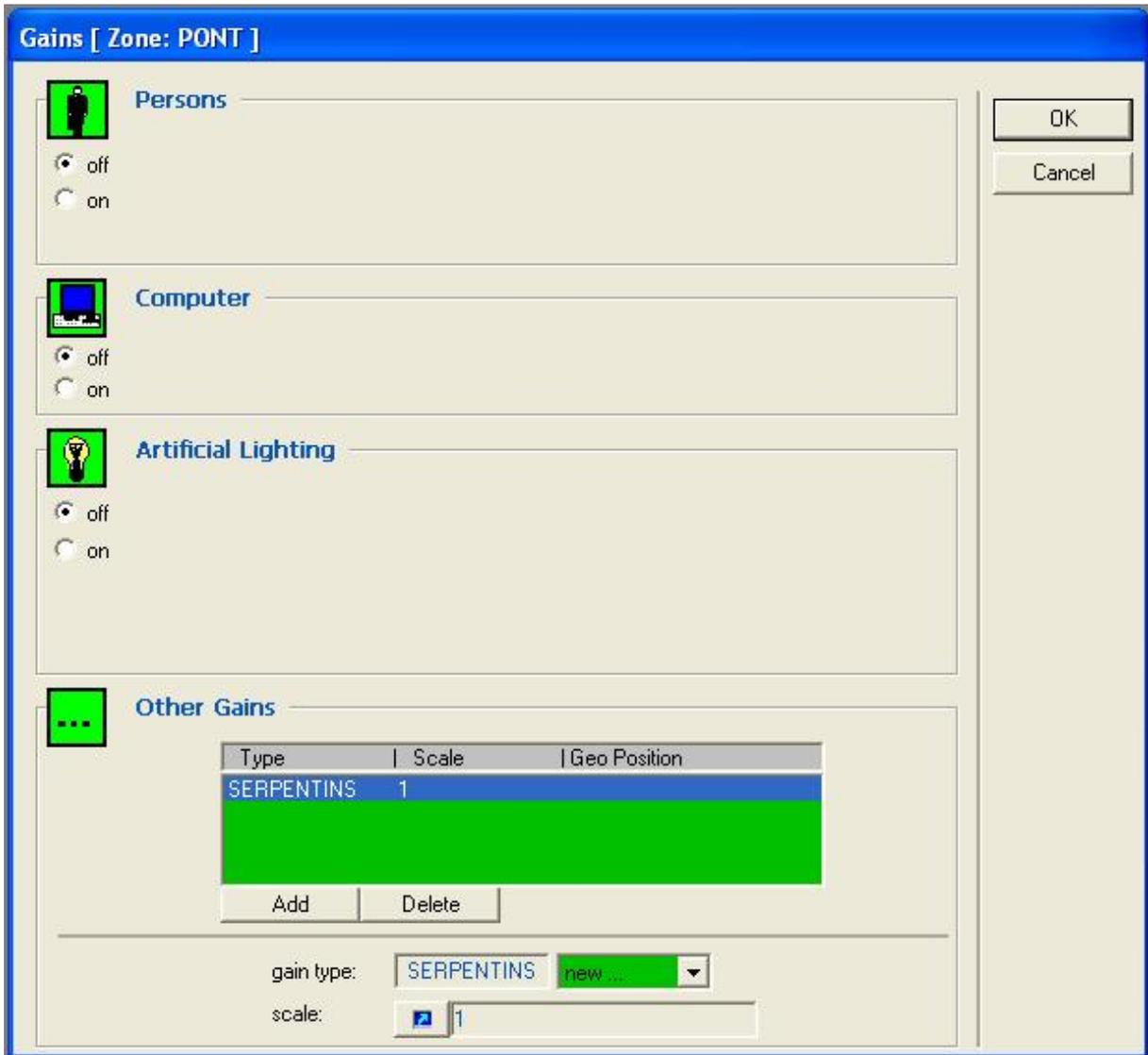
Note: the convective heat transfer coefficient is fixed to an arbitrary large value on the pipe plane face, so that the “surface wall temperature” is very close to the “zone air temperature”, as these two temperatures, according to the bridge simulation model, should be equal and have to correspond to the pipe plane temperature in the bridge.

Figure A3.9 Input parameters in BREBID for the structure of the two walls SURFACE and SOTTO



Figure A3.10 Input parameters in BREBID for the thermal characteristics of the various material layers

No window, no infiltration, no ventilation, no heating and no cooling is defined. Only a convective heat gain for the zone PONT (see figure A3.11).



A heat gain called SERPENTINS is defined in zone PONT. The heat gain SERPENTINS is purely convective and is an input variable called QSER



Figure A3.11 Input parameters in BREBID for the definition of the input convective heat gain in the zone PONT

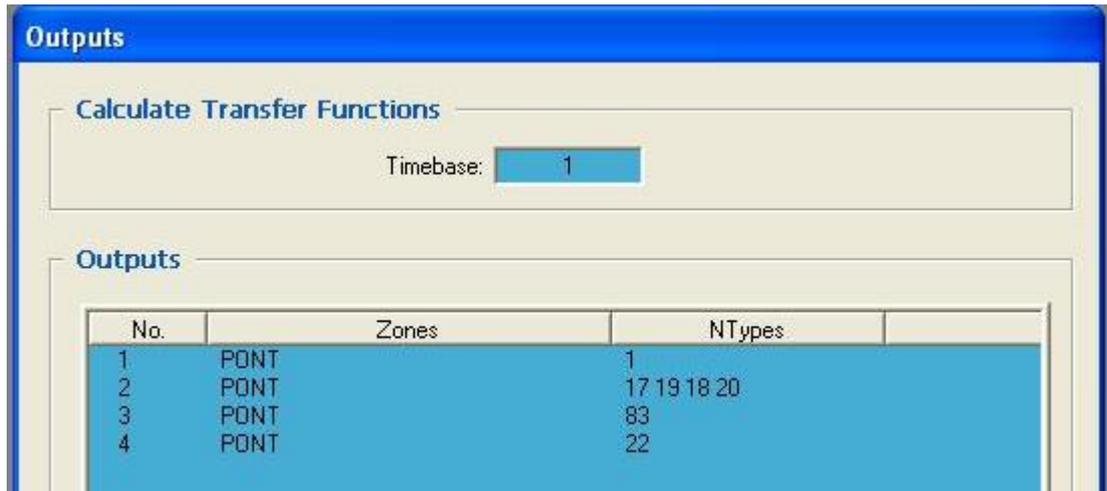
Finally, output variables have to be defined for the bridge model. The input – output variables that have to be defined in PREBID are shown in figure 6.7. The output variables have to be defined in the same order as indicated.

User defined input to the TYPE 56 used for the simulation of the bridge:

QSER: heat rate transferred from the fluid to the bridge



User defined outputs from TYPE 56. The outputs have to be defined in the order indicated below.



- output 1: air temperature of zone PONT or mean bridge temperature in the pipe plane – (NType 1)
- output 2: inside surface temperature of wall 1 (= wall SURFACE: top bridge part) – NType 17
- output 3: inside surface temperature of wall 2 (= wall SOTTO: bottom bridge part) – NType 17
- output 4: heat rate from inside surface temperature of wall 1 (including convection to air zone and long wave radiation to surface 2) – NType 19
- output 5: heat rate from inside surface temperature of wall 2 (including convection to air zone and long wave radiation to surface 1) – NType 19
- output 6: outside surface temperature of wall 1 – NType 18
- output 7: outside surface temperature of wall 2 – NType 18
- output 8: heat rate to outside surface temperature of wall 1 (including convection to outside air and long wave radiation to sky) – NType 20
- output 9: heat rate to outside surface temperature of wall 2 (including convection to outside air and long wave radiation to sky) – NType 20
- output 10: long wave radiation losses to sky of wall 1 outside surface – NType 83
- output 11: long wave radiation losses to sky of wall 2 outside surface – NType 83
- output 12: absorbed solar radiation on wall 1 outside surface – NType 22
- output 13: absorbed solar radiation on wall 2 outside surface – NType 22

Figure 6.7 Input and output variables defined in BREBID for the simulation of the bridge with the TRNSYS TYPE 56 model. The simulated heat rate transferred from the fluid to the bridge is the sum of output 4 and output 5 (QSER)