



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Utilisation des géostructures énergétiques pour la régulation thermique et l'optimisation énergétique des infrastructures routières et ouvrages d'art**

**Nutzung von energetischen Geostrukturen zur  
thermischen Regulation und energetischer Optimierung  
von Strasseninfrastrukturen und Kunstbauten**

**Use of energy geostructures for thermal regulation and  
energy optimisation of road network and structures**

**EPFL – Laboratoire de Mécanique des Sols  
Fabrice Dupray  
Chao Li  
Mélanie Baehler  
Clémentine Schurmann  
Lyesse Laloui**

**Projet de recherche VSS 2010/503 sur demande de l'Association  
suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



# **Utilisation des géostructures énergétiques pour la régulation thermique et l'optimisation énergétique des infrastructures routières et ouvrages d'art**

**Nutzung von energetischen Geostrukturen zur thermischen Regulation und energetischer Optimierung von Strasseninfrastrukturen und Kunstbauten**

**Use of energy geostructures for thermal regulation and energy optimisation of road network and structures**

**EPFL – Laboratoire de Mécanique des Sols**  
**Fabrice Dupray**  
**Chao Li**  
**Mélanie Baehler**  
**Clémentine Schurmann**  
**Lyesse Laloui**

**Projet de recherche VSS 2010/503 sur demande de l'Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)**

## Impressum

### **Service de recherche et équipe de projet**

#### **Direction du projet**

Lyesse Laloui

#### **Membres**

Fabrice Dupray

Chao Li

Mélanie Baehler

Clémentine Schurmann

### **Commission d'experts responsable**

Commission d'experts 5 : Construction et géotechnique

### **Commission de suivi**

#### **Président**

Walter Steiner

#### **Membres**

Yves Brechbühler

Stéphane Cuennet

Rémy Gubler

Gilbert Steinmann

### **Auteur de la demande**

Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

### **Source**

Le présent document est téléchargeable gratuitement sur <http://www.mobilityplatform.ch>.

# Table des matières

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>5</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>7</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>8</b>
<b>Summary</b> .....	<b>9</b>
<b>Rapport final</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Introduction</b> Section d'équation (suivante) .....	<b>10</b>
<b>2 Contexte technologique et réalisations existantes</b> .....	<b>11</b>
2.1 Énergies et infrastructures de transport .....	11
2.1.1 Situation actuelle .....	11
2.1.2 Vision d'avenir .....	11
2.1.3 Energie du sous-sol .....	12
2.1.4 Applications aux infrastructures de transport .....	13
2.2 Applications aux routes et ponts .....	14
2.2.1 Généralités .....	14
2.2.2 Sondes géothermiques .....	14
2.2.3 Pieux géothermiques .....	14
2.3 Principes de dimensionnement côté chaussée .....	15
2.3.1 Conditions climatiques .....	15
2.3.2 Caractéristiques du sous-sol .....	16
2.3.3 Echangeur de chaleur en chaussée .....	17
2.4 Réalisations et expériences existantes .....	18
2.4.1 Système de fonte de neige Gaia, Ninohe, Japon, 1995 .....	18
2.4.2 Expérimentation de resurfaçage géothermique, Corée du Sud, 2011 .....	20
2.4.3 Pont chauffant à Amarillo, Texas, 1996 .....	21
2.4.4 Prototype de pont chauffant à échelle réduite d'Oklahoma State University, 2000 .....	22
2.4.5 Pont chauffant de Shin-Kiyonaga, Fukui, Japon, 2006 .....	23
2.4.6 Pont géothermique Berkenthin, Allemagne, 2011 .....	25
2.4.7 Projet SERSO, Därligen, Suisse, 1994 .....	26
2.5 Conclusions sur l'état de l'art .....	28
<b>3 Comportement d'un pieu isolé</b> .....	<b>30</b>
3.1 Description du cas d'étude .....	30
3.2 Modèle éléments finis .....	30
3.2.1 Géométrie et maillage .....	30
3.2.2 Conditions aux limites .....	31
3.2.3 Conditions initiales .....	31
3.3 Formulation thermo-hydro-mécanique .....	32
3.3.1 Modèle diffusif .....	32
3.3.2 Modèle mécanique .....	33
3.3.3 Couplages multi-physiques .....	33
3.3.4 Caractéristiques des matériaux .....	34
3.4 Scénarios d'exploitation .....	34
3.5 Résultats .....	35
3.5.1 Cas 1 : Faible écoulement souterrain et recharge solaire .....	35
3.5.2 Cas 2 : Faible écoulement et recharge naturelle .....	37
3.5.3 Cas 3 : Absence d'écoulement et recharge solaire .....	39
3.5.4 Cas 4 : Fort écoulement et recharge naturelle .....	39
3.6 Conclusions .....	42
<b>4 Comportement d'une fondation de pile de pont</b> .....	<b>43</b>
4.1 Contexte détaillé .....	43
4.1.1 Contexte hydro-géologique et géotechnique .....	43

4.1.2	Contexte météorologique.....	44
4.2	Variante étudiée.....	45
4.2.1	Modifications de conception.....	45
4.2.2	Représentation géologique.....	48
4.3	Modèle éléments finis.....	48
4.3.1	Géométrie et maillage.....	48
4.3.2	Conditions aux limites.....	49
4.3.3	Conditions initiales.....	50
4.3.4	Caractéristiques des matériaux.....	50
4.3.5	Chemin de chargement.....	51
4.4	Résultats.....	51
4.4.1	Cas 1 : Ecoulement souterrain et recharge géothermique.....	51
4.4.2	Cas 2 : Pas d'écoulement et recharge solaire.....	55
4.5	Conclusions.....	58
<b>5</b>	<b>Conclusions générales.....</b>	<b>60</b>
	<b>Annexes.....</b>	<b>62</b>
	<b>Abréviations.....</b>	<b>65</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>67</b>
	<b>Clôture du projet.....</b>	<b>69</b>
	<b>Index des rapports de recherche en matière de route.....</b>	<b>72</b>

## Résumé

La régulation thermique des infrastructures routières est une solution technologique visant à régler les problèmes de formation de verglas et d'accumulation de neige en des points stratégiques du réseau routier (fort trafic, dangerosité). Cette solution, qui présente comme principaux avantages un fonctionnement en continu et l'élimination locale de l'usage de sels de déneigement, est pourtant très peu répandue dans le monde en raison d'un coût élevé. Seul le Japon l'utilise à une échelle industrielle, et a donc exploré diverses méthodes et sources d'énergie permettant la régulation thermique. La solution la plus satisfaisante d'un point de vue environnemental est la géothermie faible profondeur, qui demande peu d'électricité et ne modifie que les températures du sous-sol. Le coût élevé de cette solution étant constitué en grande partie des coûts de construction initiaux, une solution est explorée pour réduire ceux-ci. L'usage de géostructures énergétiques permet une forte réduction des coûts initiaux liés à la partie échange de chaleur en comparaison avec des sondes géothermiques.

La présente étude a pour but d'évaluer la faisabilité, la conception et les principes de dimensionnement des géostructures énergétiques lorsqu'elles sont associées à des infrastructures routières. Pour cela, on aborde dans une première partie une revue internationale des infrastructures routières régulées thermiquement selon un principe proche : routes ou ponts, avec différentes sources de chaleur. Ces projets étant presque tous des projets pilotes, on recense les informations techniques et financières publiées. Un ouvrage similaire à l'objectif de l'étude est identifié au Japon. Son fonctionnement est fondé sur le stockage saisonnier de chaleur par un groupe de pieux très rapprochés, alors que tous les autres projets recensés utilisent la recharge thermique naturelle du sous-sol (par conduction ou convection). On constate que si le fonctionnement et le dimensionnement thermique du système semblent bien connus, aucune étude ne porte sur les effets thermo-mécaniques induits sur le pont par les variations de température au niveau des pieux de fondation. Il en ressort que ce dernier point est l'objectif de la suite du rapport.

On envisage donc dans un premier temps d'évaluer les effets consécutifs à l'utilisation d'un pieu de fondation comme échangeur de chaleur. Les deux situations (recharge par le sous-sol ou recharge par captage d'énergie solaire) sont envisagées car elles modifient largement l'évolution temporelle des températures et donc la réponse mécanique du pieu. Un pieu isolé est simulé par un modèle éléments finis thermo-hydro-mécanique couplé. On simule un milieu sans ou avec écoulement souterrain naturel. On observe que la gamme de déplacements est acceptable pour un pont dans une grande majorité des situations. L'efficacité énergétique est par contre dépendante des conditions locales.

Dans la troisième partie, on s'intéresse à un cas plus proche de la réalité en étudiant une variante de construction d'un ouvrage récemment réalisé et sélectionné pour son implantation dans une zone favorable du point de vue hydro-géologique. On montre que des données météorologiques standard suffisent à établir les besoins en chaleur du tablier. Une étude de l'hydro-géologie locale permet d'évaluer les caractéristiques du milieu ainsi que la nature de l'écoulement naturel. On réalise enfin une simulation éléments finis de la fondation d'une des piles, comprenant plusieurs pieux. Les résultats tant au niveau énergétique que mécanique sont relativement différents de ceux observés sur un pieu isolé, avec un risque accru de mise en tension de la partie basse des pieux. Mais les déplacements de la fondation induits par l'échange de chaleur sont toujours limités.

Cette étude recense l'ensemble des technologies et de leurs évolutions récentes liées à la régulation thermique des ponts. Le point le moins étudié, le comportement thermo-mécanique des géostructures énergétiques est mis en avant, et étudié dans le contexte spécifique des ponts. Les résultats sont positifs, avec de faibles déplacements et une efficacité du système permettant de ne pas surdimensionner la longueur totale de pieux pour l'échange de chaleur. Celui-ci permet à environ 1 m de pieu de réguler 1 m<sup>2</sup> de tablier.

## Zusammenfassung

Eine Temperaturregulation ist eine technische Lösung um bei Strasseninfrastrukturen Problemen mit Glatteis oder Schneeansammlungen an strategisch wichtigen Punkten (Knotenpunkte, Gefahrenstellen) vorzubeugen. Diese Lösung hat den Vorteil einer kontinuierlichen Funktionalität und führt lokal zu Einsparungen von Streusalz. Dennoch sind solche Systeme aufgrund ihrer hohen Kosten wenig verbreitet. Einzig Japan betreibt der-artige Systeme auf industrieller Ebene und hat daher verschiedene Methoden und die Nutzung verschiedener Temperaturquellen untersucht. Aus Umweltechnischer Sicht erweist sich die Nutzung oberflächennaher Geothermie als die beste Lösung. Sie benötigt wenig Elektrizität und verändert lediglich die Temperatur im Untergrund. Ein grosser Teil der Kosten umfasst die Baukosten. Lösungen mit reduzierten Baukosten sind in Entwicklung. Die Nutzung energetischer Geostrukturen erlaubt eine merkliche Reduktion der Baukosten, bedingt durch den vereinfachten Wärmeaustausch im Vergleich zu geothermischen Sonden.

Die vorliegende Studie hat zum Ziel, die Machbarkeit, Konzeption sowie Prinzipien zur Dimensionierung energetischer Geostrukturen, die mit Strasseninfrastrukturen verbunden sind. Dafür wurden zuerst bestehende Strasseninfrastrukturen untersucht, die durch vergleichbare Prinzipien thermisch reguliert werden. Bei diesen Projekten handelt es sich mehrheitlich um Pilotprojekte, bei denen technische und finanzielle Informationen erfasst werden. Ein mit dem Versuchsziel vergleichbares Bauwerk wurde in Japan gefunden. Es speichert saisonale Wärme mit Hilfe einer eng gebauten Pfahlgruppe. Alle anderen untersuchten Projekte nutzen die natürliche Bodenwärme (durch Wärmeleitung oder Konvektion) im Boden. Man kann feststellen, dass der thermische Teil (Funktionalität und Dimensionierung) gut erforscht ist. Demgegenüber fehlen Untersuchungen der thermomechanischen Auswirkungen auf die Brücke, infolge der Temperaturänderungen in den Fundationspfählen. Daher wird dieser Aspekt im Bericht vertieft betrachtet.

Zunächst wurden die Auswirkungen als Folge der Nutzung eines Fundationspfahls als Wärmetauscher evaluiert. Beide Varianten (natürliche Bodenwärme oder Solarenergie) wurden untersucht, da sich die zeitliche Entwicklung der Temperatur und daher die mechanischen Auswirkungen auf den Pfahl unterscheiden. Ein isolierter Pfahl wird mit einem finiten Element Modell simuliert, das thermo-hydro-mechanisch gekoppelt ist. Der Boden wird mit oder ohne Grundwasserfluss modelliert. Es kann festgestellt werden, dass die Verschiebungen bei den meisten Brücken im akzeptablen Bereich liegen. Die Energieeffizienz hängt hingegen stark von den lokalen Bedingungen ab.

Im dritten Teil wird ein wesentlich realitätsnäherer Fall betrachtet. Es wird eine Bauvariante eines kürzlich in einer hydrogeologisch vorteilhaften Zone erstellten Bauwerks untersucht. Standardisierte Meteorodaten sind dabei ausreichend, um den Wärmebedarf für die Brückenplatte zu dimensionieren. Eine Untersuchung der lokalen Hydrogeologie erlaubt die Bodencharakteristik sowie die Grundwasserverhältnisse zu eruieren. Schliesslich wird mit einem finiten Element Modell das Fundament eines Brückenpfeilers mit mehreren Pfählen simuliert. Die Resultate bezüglich Energetik und Mechanik unterscheiden sich von denjenigen für einen isolierten Pfahl. Das Risiko für Zugspannungen im unteren Teil der Pfähle ist erhöht. Dennoch sind die Verschiebungen der Foundation infolge des Wärmeaustauschs limitiert.

Diese Studie umfasst die Gesamtheit der Technologien zur thermischen Regulation von Brücken und ihre aktuellen Entwicklungen. Dem bis anhin am wenigsten untersuchten Aspekt des thermomechanischen Verhaltens energetischer Geostrukturen kommt dabei besondere Aufmerksamkeit zu, speziell im Zusammenhang mit Brücken. Die Resultate sind positiv für kleine Verschiebungen. Zudem erlaubt die Effizienz des Systems, dass die Pfähle nicht mit einer statisch unnötigen Überlänge gebaut werden müssen. Das System ist fähig die Temperatur auf  $1 \text{ m}^2$  der Brückenplatte mit ungefähr 1 m Pfahlänge zu regulieren.

## Summary

Thermal regulation of road infrastructures is a technologic solution aiming at solving the problems of ice formation and snow accumulation on strategic locations of the network (with high traffic or high danger). Despite its advantages such as continuous operation and the local suppression of salt use, this solution is not widespread because of high costs. Only Japan is using it on an industrial scale, and has therefore explored the various methods and energy sources able to regulate road temperature. The environmentally most satisfying solution is surface geothermal energy. This requires low levels of electricity use and only modifies underground temperatures. The cost of this solution being mainly related to high initial construction costs, a solution is explored to reduce those. Energy geostructures allow a strong decrease in initial costs linked with the heat exchange part of the solution in comparison with traditional borehole heat exchangers.

The present study aims at evaluating feasibility, conception and design principles for energy geostructures linked with road infrastructures. In a first part, a global review of existing thermally regulated road infrastructures using related technologies is performed. Those being mostly pilot-projects, technical and financial published data is gathered. A bridge applying the principles studied here is found in Japan. It uses seasonal heat storage through a group of closely-spaced heat-exchanger piles, while all others projects found use natural thermal reload (by conduction or convection). It is observed that while the thermal part of the problem (operation, design) is well-known, no study considers the thermo-mechanical effects induced on the bridge by temperature variations in the pile. We set this aspect as the main objective of the rest of the report.

Firstly, the effects provoked by the use of a pile as heat exchanger are evaluated. Both situations (natural ground recharge or solar energy recharge) are studied as they modify largely the time evolution of temperatures, and therefore the mechanical response of the pile. An isolated pile is simulated with finite element method using a thermo-hydro-mechanical coupled model. The ground is modelled both with and without natural groundwater flow. The results show that the displacements remain acceptable for the vast majority of bridges. Energy efficiency is very dependent on local conditions.

In the third part, a case much closer to a real one is considered. A variant of a recently-built bridge that was built in a hydro-geologically favourable area is studied. Standard meteorological data is found to be sufficient for dimensioning heat needs for the bridge deck. The study of local hydro-geology provides an evaluation of the characteristics of the ground as well as those of the natural groundwater flow. A finite element model of the foundation of one of the piers is built, with several piles. Both energy-related and mechanical results differ from those found on an isolated pile, including a higher risk of tensile stresses towards the bottom of the piles. But foundation displacements caused by heat exchange remain limited.

The present study gathers information about the technologies related to bridge thermal regulation and their recent evolution. The least-studied aspect, namely thermo-mechanical behaviour of energy geostructures, is put forward and studied in the specific context of bridges. Results are positive, with small displacements. The efficiency of the system can allow using the same total length of pile as a normal foundation. The system is able to regulate the deck temperature with about 1 m of pile for 1 m<sup>2</sup> of deck.

# Rapport final

## 1 Introduction

La méthode traditionnelle pour régler le problème de la présence de neige ou de glace sur les infrastructures routières fait appel à deux éléments, le chasse-neige et le sel de déverglaçage. En ce qui concerne l'accumulation de neige, les seules alternatives existantes sont l'aspersion par eau chaude (d'origine géothermale) ou le chauffage de chaussée. Ces deux alternatives ne peuvent être que locales alors que l'accumulation de neige est un problème généralisé. Pour la glace, la situation diffère car sa formation est elle-même souvent à caractère local et non généralisé. Les alternatives à fonctionnement local prennent alors tout leur sens. Un élément du réseau routier très fréquemment frappé par la formation de verglas est constitué par l'ensemble des ponts et autres ouvrages de franchissement. Le chauffage de chaussée constitue la seule solution présentant une flexibilité suffisante pour le réseau suisse, les sources géothermales étant très rares en Suisse. Cette solution est étudiée depuis environ 50 ans, les premiers travaux utilisant l'énergie électrique pour le chauffage. Le début des années 1990 voit la création de nombreux projets de ponts chauffants aux États-Unis, utilisant une large variété de solutions technologiques, électricité, chaudière ou énergie géothermique très basse énergie (ou énergie géothermique de surface). Cette dernière solution utilise des échangeurs de chaleur enterrés ou plongés dans de l'eau de surface.

Des problèmes environnementaux sont posés par l'usage des sels de déneigement, en particulier au niveau des ponts franchissant un cours d'eau avec la pollution souvent induite à proximité. L'usage de sel est la cause majeure de dégradations sur les ouvrages d'art, en entraînant une corrosion perforante pouvant amener à de graves problèmes structureaux. Cela se traduit par un surcoût en entretien, mais aussi par une réduction de la durée de vie des ouvrages, qu'ils soient métalliques ou en béton. Alors que le chauffage de tablier semble apporter une réponse pertinente à ces problèmes, en supprimant l'épandage de sel sur l'ouvrage, l'important surcoût initial induit par la mise en place des systèmes de chauffage constitue encore aujourd'hui un frein important à une utilisation à grande échelle, y-compris malgré le poids plus important donné aux questions environnementales.

Une importante solution en mesure de réduire les coûts initiaux est la réutilisation de structures souterraines existantes, et c'est cette solution qui est étudiée dans ce rapport. Le principe des géostructures énergétiques est d'utiliser une structure existante, le pieu de fondation, pour s'en servir comme échangeur de chaleur, en lieu et place de sondes géothermiques qui représentent un important surcoût. Ces structures peuvent servir aussi bien à utiliser la géothermie de surface qu'à stocker de l'énergie solaire récupérée via la chaussée. Les fondations de ponts présentent cependant des caractéristiques, en particulier géométriques, très différentes de celles des fondations de bâtiment, qui sont plus largement étudiées.

On passe dans un premier temps en revue les différentes réalisations historiques ou récentes qui présentent un intérêt vis-à-vis de la présente étude. On traite en particulier les aspects technologiques. A partir de cette étude bibliographique, on met en place un cadre d'étude pour la simulation numérique du comportement d'une fondation énergétique utilisée pour la régulation thermique d'une chaussée. Le cadre choisi est celui d'une variante d'un ouvrage récemment réalisé sur le canton de Vaud. Dans un premier temps, on étudie le comportement d'un pieu isolé, tant d'un point de vue thermique que mécanique. On étudie ensuite le comportement d'une fondation de pile de pont constituée de 8 pieux énergétiques. Différentes solutions d'exploitation sont analysées, ainsi que la réponse de la fondation en termes de déplacements. La conclusion porte sur la faisabilité technique de la méthode, les stratégies possibles d'exploitation et les principes de dimensionnement.

## 2 Contexte technologique et réalisations existantes

### 2.1 Énergies et infrastructures de transport

#### 2.1.1 Situation actuelle

L'entretien des infrastructures liées au transport, quelles qu'elles soient, demande un investissement permanent. Au quotidien tout d'abord, pour adapter la qualité des infrastructures et garantir la sécurité en tout moment. A l'échelle de la saison, compte tenu du fait que les conditions climatiques sont très différentes d'une saison et d'une région à l'autre. L'entretien des routes demande du personnel et du matériel différent en hiver et en été, en plaine ou en montagne. Et finalement sur le long terme, les infrastructures devant être adaptées à la demande de l'utilisateur ainsi qu'aux normes de sécurité. C'est donc un investissement permanent sur le long terme qui est nécessaire à l'utilisation des infrastructures.

En hiver, les moyens actuels de sécurisation des routes sont le salage et le déblaiement. Ces deux manières demandent une intervention rapide et efficace avant et lors de chutes de neige et impliquent la mise en œuvre de moyens considérables :

- Machines performantes (chasse neige, camion de salage, machines de chantier pour réfection des routes)
- Personnel performant et disponible à la demande
- Stock de matériel important (sel, matériel de réfection des routes)

Le salage, comme le déblaiement de la neige sont des travaux ponctuels mais répétés chaque année. Ils demandent un investissement en temps, argent et personnel, avec un caractère imprévisible et inégal d'année en année, lié aux précipitations. A cela s'ajoute le coût des dommages causés aux ouvrages d'art par le sel et la corrosion induite. Ce coût se répartit entre un besoin en entretien accru (changement des joints de dilatation, traitement ponctuel de la corrosion), et une réduction de la durée de vie totale.

Ces techniques comportent aussi des conséquences néfastes au niveau de l'environnement (rejet d'eau salée dans l'environnement, importantes émissions de polluants par les véhicules de déneigement) et un investissement économique récurrent (stock de sel, de carburant, entretien des machines, main d'œuvre).

La tendance est de développer des solutions moins onéreuses et incluant le paramètre environnemental. Consommer moins, polluer moins et utiliser plus longtemps. Dans ce cadre, l'attention est portée sur des solutions qui ne demanderaient pas un investissement récurrent (dans le cas présent, annuel), mais plutôt sur le développement de techniques qui résoudraient les problèmes de coût et d'énergie sur le long terme, c'est-à-dire trouver une manière de maintenir la température des routes dans une gamme de sécurité en utilisant un type d'énergie renouvelable.

#### 2.1.2 Vision d'avenir

Les dangers posés par la présence de neige ou de verglas en certains endroits identifiés, en particulier les ponts, ont été identifiés comme sujet de travail dans de nombreuses régions du monde. Les États-Unis et le Japon sont certainement les premiers à avoir développé des solutions pragmatiques à ce problème, avec le chauffage direct des chaussées par des systèmes électriques, hydroniques, voire par aspersion. Ces solutions développées dans les années 1980 faisaient souvent appel à de l'énergie fossile, plus rarement à la géothermie très basse énergie, si l'on excepte les cas utilisant des sources chaudes naturelles. Ces solutions s'avérant coûteuses et/ou environnementalement peu satisfaisantes ne se sont pas développées commercialement, et ont été laissées de côté d'un point de vue recherche, jusqu'au récent développement des technologies vertes.

Dans le contexte actuel, l'utilisation de l'énergie du sous-sol est une solution très prometteuse. Utilisée correctement, cette énergie est disponible partout, de manière permanente et ne dégrade pas l'environnement. Plusieurs projets pilotes ont déjà montré la validité technique de la solution, sans résoudre complètement la problématique écono-

mique, qui se traduit par un lourd investissement initial en l'état actuel des techniques, ce qui constitue un frein face à d'autres solutions avancées plus coûteuses en énergie [1]. Un résumé de ces projets est présenté dans les paragraphes suivants.

### 2.1.3 Energie du sous-sol

Il existe plusieurs manières d'extraire de l'énergie du sous-sol et de l'utiliser. La source la plus utilisée reste la géothermie à basse et moyenne énergie (respectivement entre 30 et 100 °C et entre 100 et 150 °C) qui fait appel à un simple pompage d'eau dans un aquifère chaud. On trouve aussi des systèmes stimulés par fracturation dans ces profondeurs (Enhanced Geothermal System) ou encore plus profond pour la production d'électricité. Dans les cas qui nous intéressent, il sera question de géothermie de faible profondeur, dite à très basse énergie, car les fondations, pieux et ancrages liés aux infrastructures ne dépassent généralement pas les quelques dizaines de mètres, et sont donc au moins partiellement dans la zone d'hétérothermie. Contrairement à la géothermie basse énergie, il n'y a pas de pompage mais un échange de chaleur. Dans cette zone, la température du sol peut dépendre des variations climatiques (quotidiennes et saisonnières), mais conserve une température stable à partir de quelques mètres de profondeur (Figure 2-1).

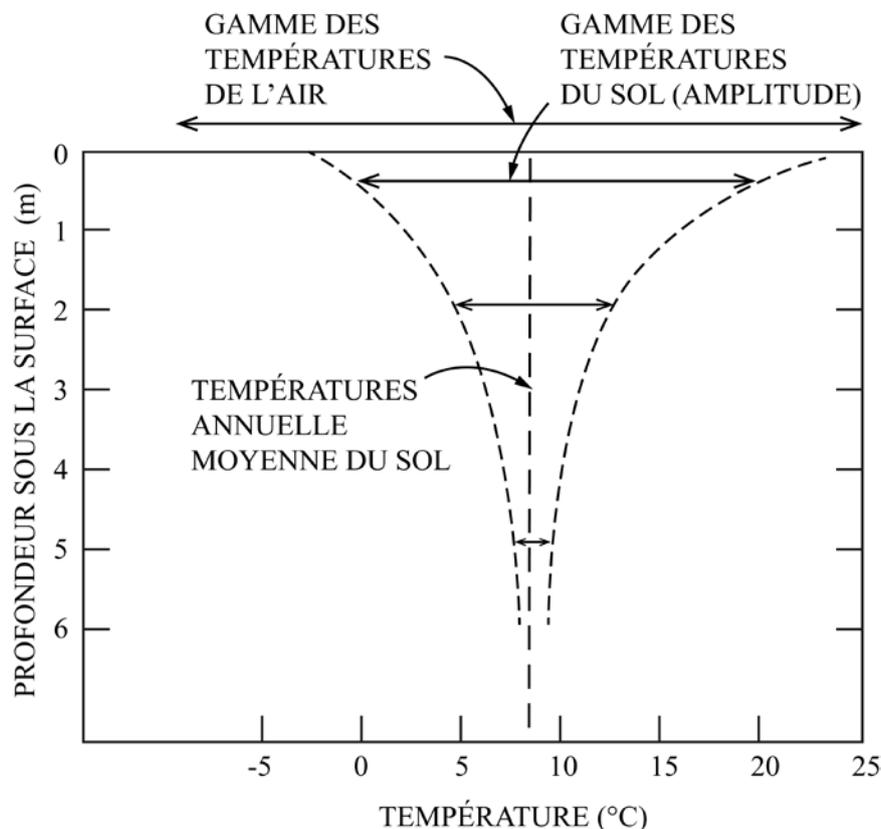


Figure 2-1 Variations schématiques de la température du sol dans la zone d'hétérothermie (d'après [2]).

L'utilisation habituelle de ce type d'énergie est le chauffage des bâtiments, et parfois de leur réseau d'eau chaude sanitaire. Les systèmes les plus courants pour extraire la chaleur du sol sont les sondes géothermiques, verticales ou horizontales, et les pieux énergétiques. Ils sont généralement basés sur deux circuits de tubes, l'un pénétrant dans le sol, l'autre dans l'infrastructure à chauffer. Ces deux boucles sont liées par une pompe et un échangeur de chaleur. Il est important de noter que la température de la source de chaleur et la présence en général d'une pompe à chaleur permet de l'utiliser aussi bien comme source chaude que comme source froide, et donc des applications de refroidissement sont possibles.

L'utilisation des principes géothermiques dans le but de réguler la température des infrastructures de transport n'est pas nouvelle. Au même titre que la chaleur du sous-sol peut

chauffer un bâtiment, elle peut chauffer une route. Le fonctionnement d'un système énergétique basé sur la géothermie est donc similaire. Plusieurs projets en Europe, aux Etats-Unis et au Japon sont en fonction depuis plusieurs années et ont montré des résultats très encourageants.

Il existe aussi d'autres manières d'utiliser la chaleur du sous-sol à des fins de maintien de la température des routes (non présentées ici). Ces projets, moins courants sont basés sur les systèmes suivants :

- Utilisation directe d'eau thermale par pompage, en la faisant circuler dans un système de tubes inclus dans le revêtement avant réinjection dans le milieu (doublet géothermique),
- Utilisation directe d'eau thermale par épanchement sur les routes,
- Utilisation de systèmes à vapeur.

Il est envisageable de stocker de l'énergie à proximité des infrastructures et de la restituer en période de froid. Par extension, il est possible de réaliser ce même genre d'ouvrage non seulement pour les routes, mais aussi pour des ponts, trottoirs, infrastructures souterraines, ainsi que pour les chemins de fer.

#### 2.1.4 Applications aux infrastructures de transport

Par infrastructures liées au transport, il est entendu ici les routes et toutes autres constructions liées aux routes : tunnels, ponts, parkings, les infrastructures pour les piétons (trottoirs et passerelles), les aéroports ainsi que les chemins de fer (y compris gares, quais...). Certaines de ces infrastructures ont besoin d'énergie en permanence (gares, tunnels) alors que d'autres n'ont besoin que d'apport énergétique ponctuel (déblaiement des routes en hiver seulement).

Il est nécessaire de prévoir le développement et la réalisation en fonction de la finalité de chaque ouvrage. Dans cette optique, l'utilisation de l'énergie du sous-sol peut être une solution très intéressante, vu que cette énergie est disponible, peut être extraite, et peut aussi être stockée. Un système de pompe à chaleur peut aussi être enclenché sur demande et ne demande pas de fonctionner en permanence.

Les coûts liés à des projets incluant un élément structurel échangeur de chaleur sont pour l'instant importants en raison du développement encore limité de la technologie, qui induit des investissements initiaux dans la partie recherche et développement. Les projets réalisés récemment (Lainzer Tunnel en Autriche par exemple) ont montré qu'il est possible d'inclure du matériel absorbant dans une structure telle que des cuvelages de tunnel à des frais initiaux raisonnables. Plus récemment, les Services Industriels de Genève ont validé un projet de géostructures énergétiques (parois moulées et radiers échangeurs de chaleur) pour le projet ferroviaire CEVA. Cela démontre que l'équation financière est de plus en plus compétitive.

On différenciera aussi les cas où l'infrastructure de transport ne sert que d'échangeur et pas de consommateur d'énergie, de ceux où l'infrastructure de transport est aussi le consommateur. Dans le premier cas, le système n'est qu'une source de chaleur parmi d'autres possibles et doit donc justifier sa pertinence face aux solutions concurrentes. A l'inverse, dans le second cas, les économies financières comme énergétiques sont très intéressantes par rapport aux solutions utilisant l'électricité ou une chaudière (-83 % d'énergie utilisée pour le déneigement d'une route, ce qui correspond à plus de 50 % d'économie d'énergie – Projet Gaia, Japon). Mais la décision de réguler thermiquement une portion de route reste en soit très coûteuse initialement. Elle doit être mise en balance avec la réduction des coûts d'entretien liés à la suppression de l'usage de sel, et avec une estimation du bénéfice de sécurité apporté aux usagers.

Il est alors nécessaire de définir quels sont les endroits où de tels systèmes peuvent être indiqués. Il y a alors plusieurs cas de figures. Pour les routes, les portions les plus dangereuses sont celles très utilisées tout d'abord (carrefours par exemple), mais de plus celles inclinées. Il a été mis en avant que les pentes de plus de 8 % comprenaient un risque accru d'accidents. Le même raisonnement s'applique aux piétons (parkings, trottoirs). Dans

les deux cas, les portions de routes ou chemins non situés directement sur le sol sont les plus enclins à geler. Les passerelles et ponts sont les endroits les plus dangereux. Le cas des tunnels est différent dans le sens où il ne présente pas de danger particulier lié à la glace ou à la neige. Il est plutôt à voir comme un réservoir potentiel d'énergie du sous-sol.

## 2.2 Applications aux routes et ponts

### 2.2.1 Généralités

Il existe plusieurs façons de mettre à profit l'énergie du sous-sol dans le but de réchauffer des infrastructures de transport en surface (routes, ponts, trottoirs...). Elles peuvent faire partie des fondations nécessaires aux constructions, ou alors faire l'objet de construction ou aménagements particuliers. Le principe est généralement le suivant : introduire dans le revêtement de la route un système de tubes caloporteurs qui est couplé à un système d'extraction de l'énergie du sous-sol. Dans certains cas, une pompe à chaleur est nécessaire pour extraire la chaleur du réseau en sous-sol. Ces systèmes peuvent généralement fonctionner dans les deux sens : en production de chaleur ou en puits à chaleur. Les deux cas les plus courants applicables aux routes et aux ponts sont présentés ci-dessous.

On note aussi l'existence de deux autres systèmes, l'un électrique, et le second utilisant un fluide à changement de phase scellé dans des tubes eux-mêmes noyés dans la chaussée.

### 2.2.2 Sondes géothermiques

Un système de tubes caloporteurs est positionné dans le sol. Il est constitué d'une ou plusieurs boucles verticales ou horizontales. Ces tubes contiennent un liquide pouvant échanger la chaleur avec leur environnement. Ce premier circuit est soit directement en contact avec le réseau de tubes inclus dans la route, soit en contact avec une pompe à chaleur. Dans ce deuxième cas, la chaleur est extraite du premier circuit par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. Un deuxième circuit se charge de transmettre la chaleur récupérée à la route. Dans le cas des routes et ponts, ce deuxième circuit est constitué par un réseau de tubes positionnés dans le revêtement, de façon à couvrir une surface maximale. En chauffage ou en refroidissement ces tubes permettent de tempérer la route.

### 2.2.3 Pieux géothermiques

Cette technique vise à équiper les pieux de fondation avec un système pouvant échanger de la chaleur. Il existe actuellement beaucoup de bâtiments équipés avec de tels pieux (cf. [3]), et la technique est applicable aux infrastructures du transport, vu que les pieux et autres ancrages sont souvent nécessaires à la construction. Le système de tubes fonctionne de la même manière que celui d'une sonde géothermique. Ces tubes sont incorporés au béton lors de la construction des pieux et servent à l'échange de chaleur, comme on peut le voir sur la Figure 2-2.

Pour le cas des sondes, comme pour les pieux, l'ordre de grandeur de l'énergie extraite, respectivement injectée, étant relativement faible (géothermie basse énergie), il est généralement nécessaire de coupler le réseau de tubes caloporteurs avec une pompe à chaleur qui peut extraire cette énergie et la rendre utilisable dans la gamme de températures souhaitée.

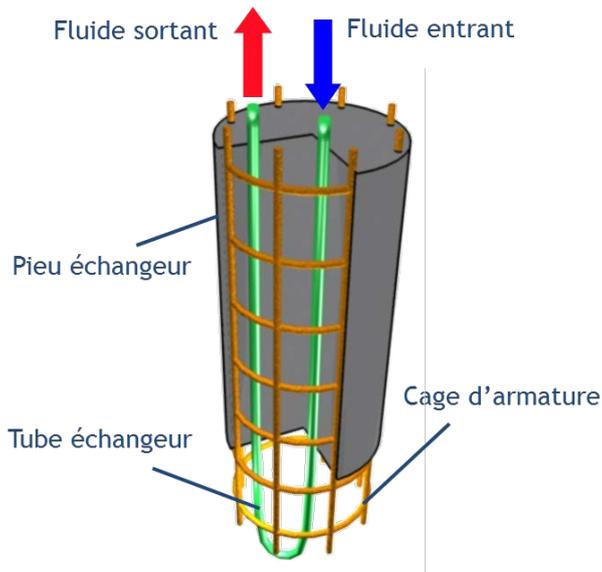


Figure 2-2 Vue schématique d'un pieu échangeur foré en béton armé.

## 2.3 Principes de dimensionnement côté chaussée

Deux paramètres sont essentiels au développement d'un système capable de chauffer une route en hiver. Il est tout d'abord nécessaire de connaître les conditions météorologiques et climatiques locales ainsi que les capacités calorifiques du sous-sol. Le type de matériel capable d'échanger de la chaleur (tubes, fluide caloporteur) ainsi que les données liées aux infrastructures (revêtement, matériel de fondations) doivent être adaptés aux conditions locales (météorologique et sous-sol).

### 2.3.1 Conditions climatiques

Pour que le système soit efficace, il faut tout d'abord que la neige (ou la glace) puisse être amenée à une température de 0 °C, puis à une température supérieure pour qu'elle fonde (>0 °C). Pour ceci, il faut prendre en compte les facteurs suivants :

- Le type et la cadence des précipitations,
- Les conditions atmosphériques (humidité, vitesse du vent, température de l'air),
- Le taux d'évaporation de l'eau de fonte,
- Les capacités réfractaires du revêtement (facteur indirect),
- Le coefficient de transfert thermique ainsi que de la différence de température entre la surface et l'air.

Les influences respectives de ces paramètres sont estimées dans le Manuel de l'ASHRAE [4]. D'après Chapman et Katunich [5], la quantité énergétique nécessaire à faire fonctionner un système faisant fondre de la neige dans un revêtement de route est la suivante (en  $W/m^2$ ) :

$$q_0 = q_s + q_m + A_r (q_e + q_h) \quad (3.1)$$

où  $q_0$  est la puissance totale à fournir par unité de surface,  $q_s$  la puissance thermique transmise à la neige,  $q_m$  la puissance dépensée pour la fusion,  $A_r$  le ratio de surface libre de neige par rapport à la surface totale,  $q_e$  les pertes dues à l'évaporation, et  $q_h$  les pertes dues à la convection et à la radiation. Chacun de ces termes peut être analysé plus en détail :

$$q_s = \rho_w s (c_{p,i} (T_m - T_a) + c_{p,l} (T_f - T_m)) \quad (3.2)$$

où  $\rho_w$  est la masse volumique de l'eau,  $s$  la cadence des précipitations, exprimées en épaisseur d'eau liquide par unité de temps,  $c_{p,i}$  la capacité thermique massique de la glace,  $c_{p,l}$  celle de l'eau liquide,  $T_m$  la température de fusion,  $T_a$  celle de l'air et  $T_f$  celle du film d'eau liquide, prise généralement égale à 0,5 °C.

$$q_m = \rho_w s L_m \quad (3.3)$$

où  $L_m$  est la chaleur latente de fusion de l'eau.

$$q_e = \rho_{da} h_m (W_f - W_a) L_g \quad (3.4)$$

où  $\rho_{da}$  est la masse volumique de l'air sec,  $h_m$  le taux d'évaporation exprimé en épaisseur d'eau liquide par unité de temps, lié aux conditions atmosphériques,  $W_f$  l'humidité relative de l'air saturé à la température du film,  $W_a$  l'humidité relative de l'air ambiant,  $L_g$  la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

$$q_h = h_c (T_f - T_a) + \sigma \varepsilon_s (T_f^4 - T_{MR}^4) \quad (3.5)$$

où  $h_c$  est le coefficient de transfert par convection,  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann,  $\varepsilon_s$  l'émissivité du ciel,  $T_{MR}$  la température moyenne de radiation de l'atmosphère. Les températures sont en Kelvin dans cette relation.

Ces deux dernières équations peuvent utilement être évaluées numériquement vis-à-vis de grandeurs météorologiques mesurables.

$$q_e = L_g (0,005 \cdot V + 0,022) \cdot (0,625 - p_v) \quad (3.6)$$

où  $V$  est la vitesse du vent exprimée en km/h et  $p_v$  la pression de vapeur atmosphérique en kPa,  $q_e$  est alors exprimé en  $W/m^2$ .

$$q_h = 64,74 \cdot (0,0125 \cdot V + 0,055) (T_f - T_a) \quad (3.7)$$

où les températures sont exprimées en K ou °C et la vitesse du vent en km/h.

Une analyse temporelle du climat local prenant en compte seulement quatre paramètres permet une estimation précise de la quantité globale d'énergie nécessaire sur un hiver, tout en montrant le pic de puissance nécessaire. Ces paramètres sont :

- La cadence des précipitations neigeuses
- La température de l'air
- L'humidité relative
- La vitesse du vent

Ces formules seront utilisées dans la partie 4.1.2 du projet. Cette étude ancienne qui reste un outil fondamental a été affinée ultérieurement, en particulier par Kilkis [6], car elle tend à surestimer la chaleur nécessaire à la fonte.

### 2.3.2 Caractéristiques du sous-sol

Les fluctuations thermiques du sous-sol ont un impact réel sur les propriétés mécaniques des routes et des autres voies de communication en surface (chemins de fers, infrastructures pour piétons...). Dans l'optique de développement de systèmes fonctionnant avec de l'énergie issue du sous-sol, il est important de connaître quels sont les paramètres principaux que comporte le sous-sol.

Le sous-sol se caractérise en termes de température, de conductivité thermique et de capacité thermique. La température du sous-sol est dépendante des paramètres suivants :

- Profondeur (voir Figure 2-1),
- Gradient géothermique local,
- Variations de températures saisonnières,
- Facteurs de site (enneigement orientation des pentes, couverture végétale, vent...).

L'aptitude du milieu à transmettre de la chaleur est décrite par le coefficient de conductivité thermique  $\lambda$  ( $W/(m.K)$ ). La conductivité thermique des grains a une valeur variant entre 1 et 3  $W/(m.K)$ , celle de l'eau est de 0,585  $W/(m.K)$  et celle de l'air 0,025  $W/(m.K)$ .

Le degré de saturation et la porosité jouent un rôle important pour la transmission de chaleur. La conductivité thermique des sols saturés varie de 1 à 4 W/(m.K) tandis que celle des sols secs se situe entre 0,2 et 0,4 W/(m.K) [7, 8].

La capacité thermique  $c$ , exprimée en J/(kg.K) ou en J/(m<sup>3</sup>.K) selon que l'on considère la capacité thermique massique ou volumique, caractérise la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur. Elle caractérise donc le facteur temporel dans le transfert de chaleur. La capacité thermique massique des sols saturés varie entre 800 et 1000 J/(kg.K), ce qui équivaut à 2000 à 2400 J/(m<sup>3</sup>.K), tandis que celles des sols secs varient entre 300 et 1600 J/(m<sup>3</sup>.K). La conductivité thermique et la capacité thermique de quelques matériaux sont résumées dans le Tableau 2-1.

Tableau 2-1 Quelques caractéristiques thermiques de géomatériaux (d'après [9]).

Matériau	Conductivité thermique $\lambda$ (W/(m.K))	Capacité thermique massique (J/(kg.K))
Eau	0,6	4186
Quartz	8,4	733
Minéraux de sols usuels	2,5 – 3	733
Matières organiques de sols	0,25	1900
Sable Sec	0,15 - 0,25	400 – 700
Sable Humide	0,25 - 2	900 – 1600
Argile Sèche	0,15 - 1,8	600 – 700
Argile Humide	1,2 - 1,7	1200 – 1600
Béton	1,6 - 2,1	1100

### 2.3.3 Echangeur de chaleur en chaussée

Il existe deux types de tubes pouvant être utilisés dans la réalisation d'un système de chauffage à l'intérieur d'une route : métallique ou plastique. Des tubes en acier, en fer et en cuivre sont communément utilisés. Les tubes en fer et en acier ont l'inconvénient de se corroder rapidement s'ils ne sont pas équipés d'un enrobage protecteur ou bien d'une protection cathodique. La présence résiduelle de sel sur la route, bien que cela doive être évité par le système, et les températures élevées ont aussi pour conséquence d'accélérer ce processus de corrosion.

Les tubes plastiques sont généralement en polyéthylène PEX qui résiste à une température de l'eau supérieure à 80 °C pour une pression de 6,89 bar et à 93 °C pour une pression de 5,52 bar, soit des performances largement supérieures à celles qui seront utilisées [10]. Ces tubes sont généralement légers et faciles à manipuler. Ils peuvent être déployés sur de grandes surfaces et peuvent être pliés selon convenance. Ils n'ont pas le désavantage de la corrosion, mais doivent par contre être relié à un tube principal en métal, qui lui doit être protégé. Leur durabilité est considérée comme inférieure car ils sont plus sensibles à la présence d'impuretés dans le circuit, et leur vieillissement (durcissement) induit une baisse de la résistance à la fatigue causée par la circulation. Elle se chiffre cependant en dizaines d'années, et des améliorations, du côté matériau comme du côté connaissances à long terme, sont à attendre.

Une solution antigel (éthylène ou propylène glycol) est utilisée à l'intérieur du tube. Ce li-

quide circule en circuit fermé, soit directement relié à l'échangeur de chaleur enterré, soit via une pompe à chaleur. Etant donné la faible amplitude des variations thermiques du fluide enterré, une alternative à l'antigel est l'eau pure, à condition de disposer de pompes de secours. Ceci permet de diminuer la viscosité du fluide et est un avantage environnemental. Le côté tablier est trop exposé aux éléments pour éliminer l'antigel.

Le choix du type de tube est gouverné par deux facteurs contradictoires : on souhaite que le fluide circule au plus près de la surface, mais aussi qu'il ne soit pas affecté par le cisaillement cyclique causé par la circulation. A cela s'ajoute la problématique de la phase de construction, qui pour des chaussées en asphalte voit des températures de l'ordre de 150 °C, incompatibles avec les tubes en PEX. On distinguera donc 2 options principales, qui sont celles qui ont été testées dans les différents ouvrages étudiés à la section 2.4. La première est l'utilisation de tubes métalliques noyés dans la chaussée asphaltée au moins 2 cm sous la surface. La seconde est l'utilisation de tubes plastiques dans une chaussée en béton hydraulique, ces derniers étant reliés à la cage d'armature. Les développements récents d'enrobés à basse température, mis en œuvre jusqu'à 70 °C signifient qu'il est désormais envisageable d'utiliser des tubes PEX avec des chaussées asphaltées, ce qui est la solution idéale pour limiter le surcoût.

Le dernier point concernant cette partie est l'efficacité énergétique du système. En fonction des conditions d'usage et d'isolation en face inférieure, les pertes ont été estimées à 30 à 50 % par Chapman et Katunich [5], avec une amélioration en cas d'utilisation continue pouvant permettre de diminuer ce chiffre.

Des études ont été consacrées à la conception et à la performance des échangeurs de chaleur en chaussée, principalement aux États-Unis [11-16]. Le présent rapport étant centré sur l'autre partie, enterrée, de l'échangeur de chaleur, et ces études ne remettant pas en cause le bien-fondé de l'étude initiale de Chapman, c'est celle-ci qui sert de base dans l'analyse des résultats de ce rapport.

## **2.4 Réalisations et expériences existantes**

### **2.4.1 Système de fonte de neige Gaia, Ninohe, Japon, 1995**

Le système de fonte de neige Gaia a été installé pour la première fois en 1995 à Ninohe, au Japon [17]. Il a été inséré dans une portion de route ayant une pente de 9 % et donc particulièrement dangereuse en hiver. Le fonctionnement de ce système est double : il utilise l'énergie solaire emmagasinée durant l'été ainsi que l'énergie géothermique pour déneiger des parcelles de route en hiver. Le sol a donc deux fonctions : il sert tout d'abord de réservoir où l'énergie solaire est stockée, mais il est aussi source d'énergie en tant que telle. Une représentation de l'installation est présentée à la Figure 2-4.



Figure 2-3 Système Gaia en fonctionnement, 1996 [17].

La formation rocheuse sous-jacente est constituée de tuf sableux du Tertiaire. La conductivité thermique de cette formation a été estimée numériquement à  $1,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  et la température au bas des pieux a été mesurée à  $22,5 \text{ }^\circ\text{C}$  avant la mise en marche du système.

Le système de stockage d'énergie est composé de 3 sondes verticales (Downhole Coaxial Heat Exchanger DCHE) situées côte à côte, chacune de  $150,2 \text{ m}$  de profondeur. Le liquide circulant à l'intérieur des DCHEs est le même que celui circulant dans le réseau de tubes en surface (antigel). Ces tubes ont un diamètre intérieur de  $16 \text{ mm}$  et sont en polybutène. Ils ont été inclus à  $10 \text{ cm}$  au-dessous de la surface de la route, et sont distants de  $20 \text{ cm}$  les uns des autres. La superficie totale couverte par le système chauffant est de  $266 \text{ m}^2$ .

En termes de quantité d'énergie nécessaire au déneigement de la route, la source principale d'énergie est celle du sol. L'énergie solaire emmagasinée peut être du même ordre de grandeur que celle utilisée en hiver, mais l'évolution des températures de la sonde indique que celle-ci sert surtout à modifier le profil des températures de la sonde (recharge thermique) sans pour autant augmenter l'énergie disponible en début d'hiver. On notera que la puissance de pic est de  $50 \text{ kW}$ , soit  $190 \text{ W}/\text{m}^2$ , pour une puissance électrique de  $15 \text{ kW}$ . Ces valeurs sont atteintes avec une température moyenne de fluide côté route de  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Côté sol, on atteint environ un échange de chaleur de  $80 \text{ W}/\text{m}$  de sonde, avec une température moyenne de fluide de  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Le coefficient de performance (COP) global du système s'établit à environ  $3,5$  [17].

En termes économiques, le système s'avère très économique à l'usage en comparaison avec les systèmes électriques concurrents, avec  $80 \%$  de réduction du coût d'usage. Mais les coûts initiaux ne sont pas précisés dans les documents en notre possession.

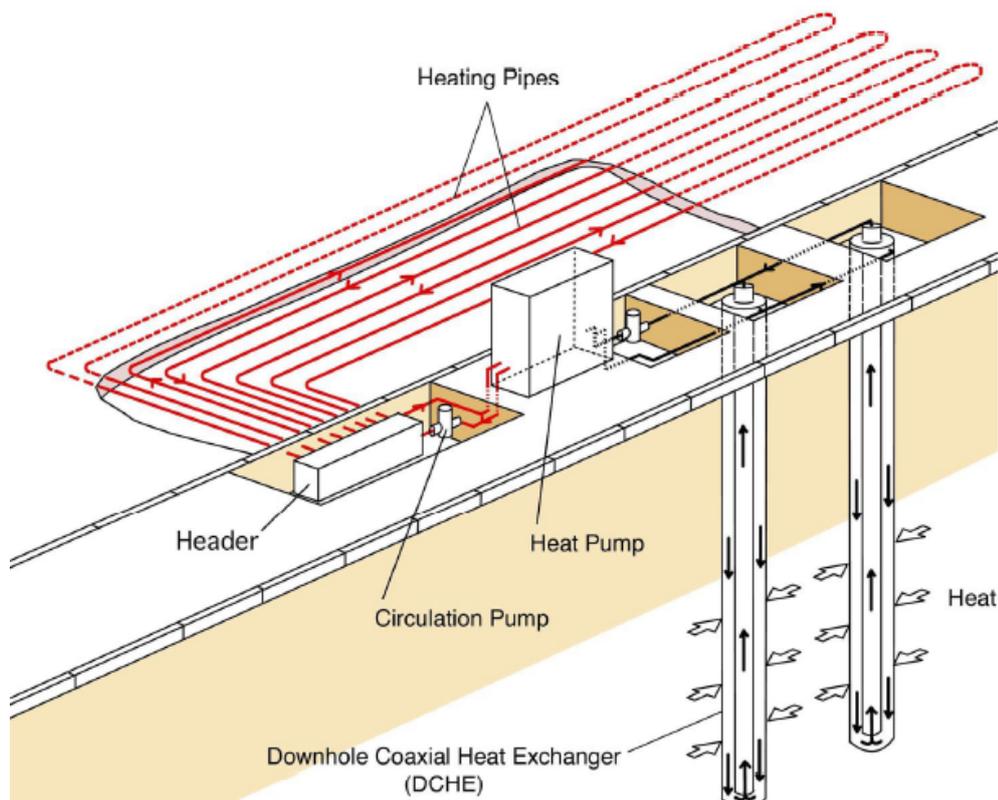


Figure 2-4 Schéma de principe de l'installation Gaia [17].

#### 2.4.2 Expérimentation de resurfaçage géothermique, Corée du Sud, 2011

Ce projet est le plus innovant, et un des plus récents, parmi ceux présentés dans ce rapport. Il consiste à tester un système de chauffage de chaussée qui puisse être utilisé lors d'un simple resurfaçage et non seulement lors de la construction de la route ou de l'ouvrage [18]. Seo *et al.* ont donc mis au point un système le plus fin possible (5 cm au total) respectant les conditions citées au paragraphe 2.3.3. Leur choix s'est porté sur un béton hydraulique innovant, un béton renforcé de fibres d'acier. Les tubes sont eux en cuivre, un matériau au coût élevé, d'un diamètre de 6,35 mm. L'espacement idéal a été étudié et déterminé à 250 mm, et c'est ce qui a été choisi pour le test à grandeur réelle, tel que visible sur les Figures 2-5 et 2-6. Un avantage de cette méthode est la maîtrise de la durée de vie, et donc une connaissance précise des coûts permettant une bonne prise de décision. La résistance des tuyaux aux cycles de chargements liés à la circulation n'a par contre pas été évaluée dans l'étude.



Figure 2-5 Tuyaux en cuivre dans l'épaisseur de la chaussée [18].



Figure 2-6 Mise en place du béton renforcé de fibres d'acier [18].

### 2.4.3 Pont chauffant à Amarillo, Texas, 1996

Le but de ce projet est de sécuriser en hiver deux ponts (un pour chaque sens de circulation) sur l'autoroute US 287 à Amarillo, Texas, USA. Il s'agit d'une réalisation parmi plusieurs du projet *Heated Bridge Technology* (Technologie des ponts chauffants), du Département des Transports américain [19]. Chacun des ponts a été équipé pour l'utilisation de la géothermie peu profonde pour le déverglaçage du tablier, et non pour d'éventuelles chutes de neige. Mais les deux ouvrages diffèrent technologiquement car l'un est équipé d'une pompe à chaleur, et l'autre pas. Deux types d'échangeurs sont utilisés côté sol, avec des sondes verticales de 53 m de profondeur ainsi que des échangeurs en tranchée, à 1,2 et 1,8 m de profondeur. Les deux circuits (horizontal et vertical) sont reliés dans un collecteur attaché à une pile, qui redistribue vers le tablier, comme on peut le voir Figure 2-7.

Côté tablier, des tubes plastiques sont utilisés coulés dans une chaussée en béton, le centre des tubes se trouvant environ 8 cm sous la chaussée, attachés sous l'armature supérieure. Une photo avant coulage est reprise en Figure 2-8.

Le principal enseignement tiré de cette expérience, outre son bon fonctionnement, concerne l'utilité de la pompe à chaleur pour les conditions rencontrées au Texas. Pour une valeur de dimensionnement de 129 W/m<sup>2</sup>, les résultats démontrent que la pompe à chaleur est inutile. La température de la source froide pour les sondes n'est pas précisée mais est certainement supérieure à ce qui est rencontré en Suisse. Cela est compensé par l'utilisation des échangeurs en tranchée, dont la température est au contraire inférieure à celle rencontrée pour des sondes verticales.

La puissance totale pour chaque tablier s'établit à environ 100 kW. Sur le tablier équipé d'une pompe à chaleur, on trouve 10 sondes verticales représentant 1072 m de tubes, ainsi que deux tranchées d'un total de 1140 m représentant 4564 m de tubes. On obtient une valeur moyenne de 17,7 W/m de tube. Sur le tablier sans pompe à chaleur, les tranchées sont allongées pour atteindre 8576 m de tubes en tranchée. La puissance moyenne échangée atteint alors 10,3 W/m de tube. Ces valeurs très basses correspondent bien à une faible utilisation de la ressource géothermale, qu'il est logique de réaliser sans pompe à chaleur. On note enfin qu'une procédure de maintenance a été développée, présentée en détails dans le rapport [19].



Figure 2-7 Vue du collecteur latéral de distribution vers le circuit du tablier [19].



Figure 2-8 Vue de l'échangeur de chaleur en tablier avant coulage de la chaussée en béton [19].

#### 2.4.4 Prototypage de pont chauffant à échelle réduite d'Oklahoma State University, 2000

A la fin des années 90, l'Oklahoma State University (OSU) a présenté un projet pour l'étude plus avancée des stratégies de contrôle d'un pont chauffant ainsi que pour l'étude du cycle de vie d'un tel ouvrage. Dans le cadre du *Transportation Equity Act for the 21st Century* (TEA-21), ce projet a mené à la réalisation d'un petit pont expérimental à une échelle légèrement inférieure à l'échelle réelle sur le campus de l'OSU, visible aux figures 2-9 et 2-10. Un tel ouvrage présente l'intérêt de pouvoir être largement équipé en capteurs, en particulier thermiques, l'objectif de l'étude étant focalisé sur cet aspect. Cependant, n'ayant pas été dimensionné pour une utilisation réelle, certains aspects comme la distance entre l'échangeur de tablier et la surface de la chaussée peuvent ne pas être transposables à un ouvrage opérationnel, qui comprendrait plus d'armatures métalliques. Le tablier fait usage de tubes en polyéthylène réticulé (PEX), tandis que deux sources de chaleur sont utilisées, l'une étant le sol via des sondes géothermiques, la seconde étant une mare via un échangeur de chaleur eau/eau. Ce projet a mené à la publication de plusieurs articles concernant le dimensionnement et l'opération d'un pont chauffé par énergie géothermique [12-15, 20].



Figure 2-9 Vue du pont expérimental de l'OSU en phase de construction [21].



Figure 2-10 Vue du pont expérimental de l'OSU en phase opérationnelle [21].

#### 2.4.5 Pont chauffant de Shin-Kiyonaga, Fukui, Japon, 2006

Cet ouvrage correspond le plus directement à la solution qui est étudiée dans ce rapport. Il s'agit d'un pont dont le tablier est équipé d'un système d'échange de chaleur comparable à celui du pont d'Amarillo. Mais il est alimenté en chaleur par des pieux énergétiques servant de fondation aux culées du pont, en complément de sondes géothermiques verticales situées le long de la rivière Asuwa. Ce projet est l'aboutissement de plusieurs programmes de recherche guidés par la préfecture de Fukui, avec l'université de Fukui et le Centre de recherche sur la gestion de la neige et les technologies de construction de la préfecture de Fukui. Le schéma de fonctionnement final est repris en Figure 2-11.

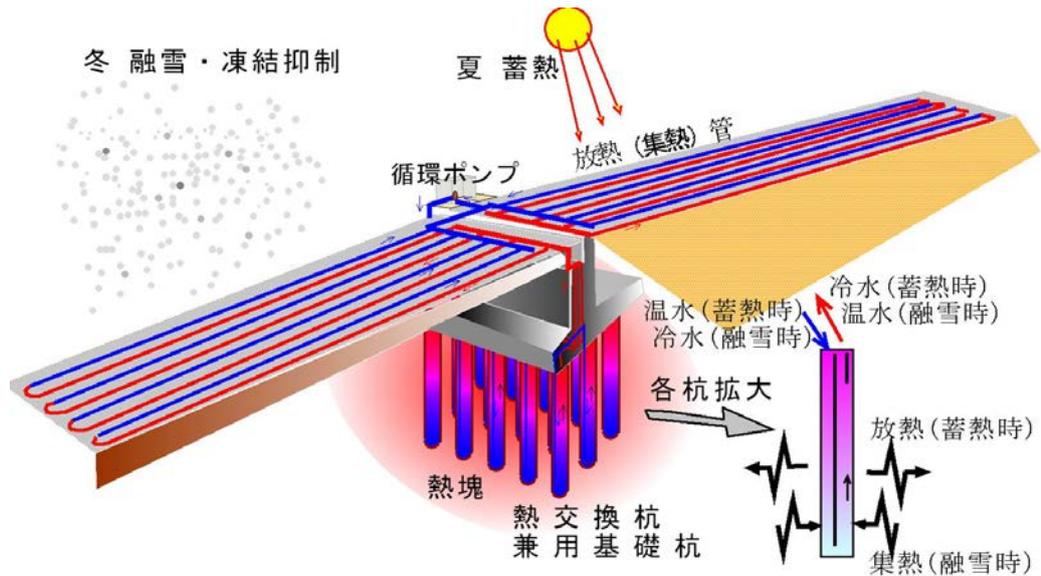


Figure 2-11 Principe de la fondation énergétique du pont de Shin-Kiyonaga, Fukui, Japon [22].

Les premiers travaux liant déneigement et pieux énergétiques se basaient sur l'utilisation des pieux de bâtiments neufs pour le déneigement de trottoirs, parking ou portions de route adjacentes à la nouvelle construction [23]. Le développement concerna en particulier la technologie à privilégier en chaussée. Le choix optimal selon cette étude est d'utiliser des tubes en acier intégrés à très faible distance de la chaussée (3 cm), rapprochés (10 cm) et à basse température (8 °C), coulés dans un béton à forte conductivité thermique (granulats de silice), ceci permettant d'atteindre une puissance échangée d'environ 200 W/m<sup>2</sup>, suffisante dans une grande majorité des cas. La disposition est montrée à la Figure 2-12. Le tablier n'est pas le seul concerné par le dispositif chauffant, la rampe d'accès étant aussi équipée. Cela permet d'augmenter la zone non salée autour du pont et donc de s'assurer qu'un minimum de sel arrive sur les zones sensibles du pont (joints, culées).



Figure 2-12 Vue du dispositif de chauffage sur la rampe d'accès au pont de Shin-Kiyonaga, Fukui, Japon [22].



Figure 2-13 Pieux énergétiques en culée de pont, pont de Shin-Kiyonaga, Fukui, Japon [23].

Les études de la préfecture de Fukui servent aussi à évaluer le potentiel d'économie présenté par les pieux énergétiques vis-à-vis des sondes géothermiques sur le plan de la construction initiale. Le coût des pieux énergétiques a été évalué à environ un tiers du coût de sondes géothermiques équivalentes [23]. La construction de la portion de route a débuté en 2002 pour s'achever en 2006.

Concernant l'échangeur en sous-sol, c'est le seul cas connu d'utilisation de pieux énergétiques pour les infrastructures routières. Il s'agit de 36 pieux chemisés fortement armés, d'une longueur de 38 m, pour un diamètre moyen de 0,55 m, et très rapprochés, ainsi qu'on peut le voir à la Figure 2-13. Etant donné la densité importante de ce type de structure, il n'était pas envisagé de faire fonctionner cette fondation comme une sonde géothermique traditionnelle, mais pour utiliser le sol en tant que stockage de chaleur [24]. Un tablier de pont et les rampes d'accès, représentant un total de 1800 m<sup>2</sup>, équipé pour l'échange de chaleur constitue un bon moyen de récupérer de l'énergie solaire. Le dimensionnement est prévu pour n'utiliser qu'une pompe de circulation et pas de pompe à chaleur, la gamme de températures utiles en hiver (8 °C) ou récupérées en été (35 °C) au niveau du tablier oscillant bien autour de la température naturelle du sol.

Aucune considération géotechnique n'a été prise en compte dans ce projet, tant au niveau de la conception (large surdimensionnement) qu'au niveau de capteurs lors de la réalisation. En revanche il s'agit du seul projet pour lequel quelques informations financières existent : le coût du système côté tablier est évalué à 20 000 ¥/m<sup>2</sup> (environ 200 CHF/m<sup>2</sup>), celui de la partie souterraine revient à 25 000 ¥/m<sup>2</sup> (environ 250 CHF/m<sup>2</sup>) et le surcoût total, y-compris asphalté spécial et pompes est de 90 000 ¥/m<sup>2</sup> (environ 900 CHF/m<sup>2</sup>), à comparer aux 160 000 ¥/m<sup>2</sup> (environ 1600 CHF/m<sup>2</sup>) d'une solution utilisant des sondes géothermiques traditionnelles [22]. Les émissions de CO<sub>2</sub> sont quant à elles réduites à 1/25<sup>ème</sup> de celles d'une solution électrique.

#### 2.4.6 Pont géothermique Berkenthin, Allemagne, 2011

Il s'agit d'un des plus récents ponts géothermiques à être réalisés, et un des premiers en Europe. Il est construit sur le canal Elbe-Lübeck, au nord de l'Allemagne [25]. Il ne fait pas appel à des techniques particulièrement innovantes. Il utilise des sondes verticales sur environ 6000 m, jusqu'à 100 m de profondeur. La puissance de pic de dimensionnement est de 171 W/m<sup>2</sup>. Il se distingue côté tablier, avec l'utilisation de tubes en polymère spécialement développé pour supporter d'être recouvert d'asphalte chaud [26]. On constate donc que tant du côté béton/asphalte que du côté des tuyaux, des développements industriels de nouveaux matériaux permettront à très court terme la résolution des problèmes de mise en œuvre qui ont ralenti le développement de la solution géothermique depuis les années 1980.

#### 2.4.7 Projet SERSO, Därligen, Suisse, 1994

Le projet-pilote SERSO signifie *Solar Energy Recovery from Road Surfaces*. L'objectif du projet est de capter et de stocker l'énergie solaire estivale reçue par un tablier de pont autoroutier dans un système de sondes géothermiques [27]. Cette énergie est restituée en hiver et utilisée pour dégivrer ce pont, situé sur l'autoroute A7 près de Därligen (Canton de Berne) (voir Figure 2-14).



Figure 2-14 Le viaduc du projet SERSO en fonctionnement lors d'une chute de neige [28].

Le fonctionnement du système énergétique, aussi visible sur la Figure 2-15, est donc le suivant :

- Récupération de l'énergie solaire sur le pont par circulation d'eau glycolée dans un réseau de serpentins inclus dans le revêtement ;
- Stockage de l'énergie dans le massif rocheux (grès) à proximité du pont, toujours par circulation d'eau, cette fois dans des sondes verticales ;
- Restitution de l'énergie en hiver par le réseau de serpentins du tablier.

Les caractéristiques techniques de l'installation sont les suivantes :

- La partie équipée du tablier couvre plus de 1000 m<sup>2</sup> avec 160 tubes en acier inoxydable installés 7 cm sous la surface de la chaussée. Le choix d'équiper le seul tablier et pas les rampes induit l'effet visible à la Figure 2-14, qui signifie que du sel doit être utilisé au droit des culées, partie sensible à celui-ci.
- Le réservoir thermique est constitué de 91 pieux échangeurs de 65 m de longueur, ce qui avec un espacement de 3 m constitue un volume total de plus de 46 000 m<sup>3</sup> (diamètre approximatif de la zone : 30 m). Les pieux échangeurs sont groupés par quatre, chaque groupe étant indépendamment relié au local technique.
- Le système hydraulique est composé des tubes inclus dans le revêtement, des tubes connectant le pont avec le réservoir, de valves et du local technique. Les tubes caloporteurs sont remplis d'un fluide consistant d'eau et de glycol.

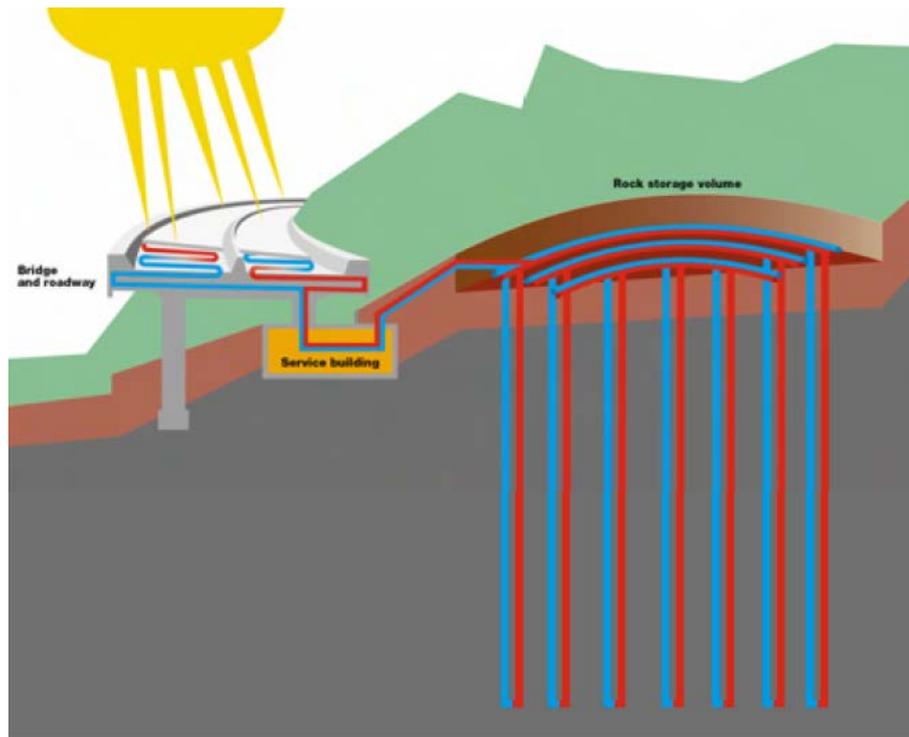


Figure 2-15 Schéma de principe du projet SERSO [29].

Le dimensionnement du système de tubes et du réservoir thermique a été réalisé avec un modèle dédié dans un logiciel commercial (TRNSYS). Pour la réalisation de ce projet, un module spécifique au chauffage de chaussée de pont, nommé BRIDGESIM, a été développé dans le cadre offert par le code TRNSYS [30]. La quantité d'énergie nécessaire au chauffage du pont est calculée avec le module BRIDGEHEAT, qui prend en compte la courbe de chauffage désirée, les paramètres liés au pont et les paramètres météorologiques. Les estimations, qui sont fonction de la météo, des critères de déclenchement et de la technologie mise en œuvre pour le tablier (isolé en sous-face ou non) donnent une gamme de variation de 100 à 130 kWh/m<sup>2</sup>/an.

Le nombre, la longueur et l'espacement des sondes géothermiques sont d'abord évalués en fonction de l'énergie nécessaire et de l'énergie disponible, puis en fonction de la capacité d'échange de chaleur entre le terrain et les sondes. Cette dernière étape a montré que la longueur des sondes dépend fortement de la conductivité thermique du terrain (ici des grès molassiques).

En ce qui concerne la sensibilité du système aux paramètres thermiques du terrain, il a été montré que la conductivité thermique est le facteur le plus important (dans ce cas 4,4 W/(m K)). Viennent après dans un ordre d'influence décroissant : la température initiale moyenne du terrain, la vitesse d'écoulement de Darcy et la capacité thermique volumique. Des variations de la température initiale entre 10,9 et 12,9 °C, et pour la capacité thermique volumique entre 1,7 et 2,7 MJ/(m<sup>3</sup> K), ont été envisagées. Les vitesses d'écoulement retenues au final sont nulles [27], mais leur influence a été étudiée jusqu'à 100 m/j et est considérée comme cruciale.

Pendant la période estivale, environ 1/5 de l'énergie solaire radiant sur la surface de la route peut être récoltée par le système de tubes. Ceci correspond à environ 155 MWh. De cette quantité, l'estimation des pertes est de 35 %. Les 65 % restants, soit 100 MWh suffisent à garder le pont libre de neige et glace durant l'hiver. La seule énergie nécessaire au fonctionnement du système est l'électricité utilisée pour l'activité des pompes. Les températures normales de fonctionnement du stockage sont extrêmement proches des températures naturelles, puisque comprises entre 9 et 14 °C. Une analyse sur une année permet de vérifier la capacité du stockage, qui est ici de 102 GJ/K pour un volume de 46 100 m<sup>3</sup> [27].

Ce système est en opération depuis 1994 et a depuis prouvé son efficacité. L'objectif minimal était d'atteindre une température égale entre la surface du pont et les portions de routes adjacentes. Cet objectif est atteint et dépassé, vu que plus d'énergie est stockée dans le réservoir que celle nécessaire à réchauffer le pont. La Figure 2-16 montre quelle est l'efficacité du système sur la température du revêtement de la route. La température de consigne est maintenue sans interruption. La mise en œuvre dans les premières années a aussi révélé que l'estimation de 100 MWh était un maximum et que le système parvenait à conserver en fin d'hiver une quantité de chaleur de l'ordre de 30 à 50 MWh [28]. On peut estimer que l'apport hivernal en énergie solaire, négligé dans les calculs, explique cette légère surestimation des besoins (par exemple pic de fin décembre 1995 sur Figure 2-16).

Ce projet a aussi permis une étude des coûts de construction, d'opération et de maintenance d'un pont chauffé utilisant le sol comme source de chaleur. Le coût initial, incluant le développement d'outils de dimensionnement, la résolution des problèmes initiaux de conception, la construction et la campagne de mesures s'élève à environ 5 millions de CHF, dont environ 2,2 millions liés au fait qu'il s'agisse d'un prototype [28].

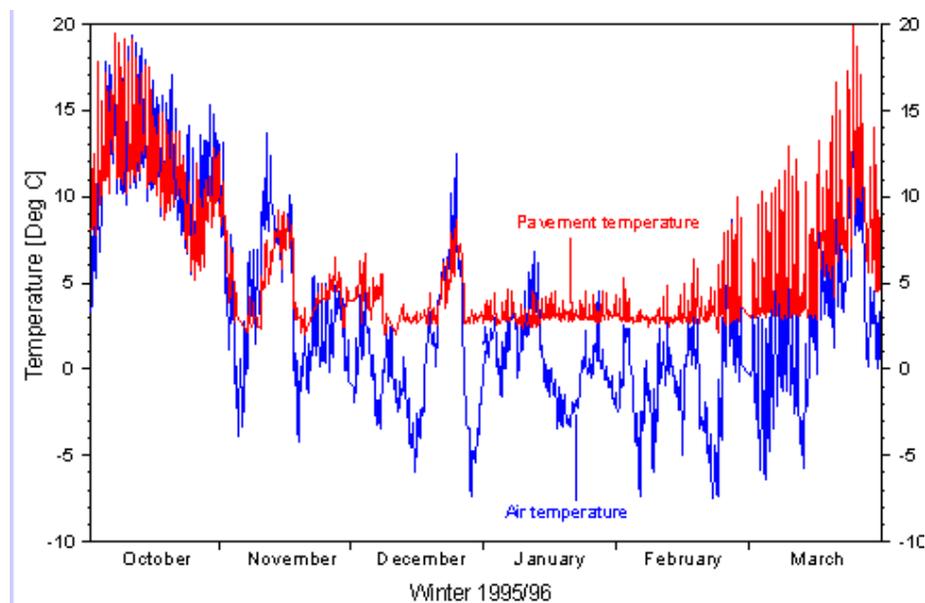


Figure 2-16 Variation des températures de l'air (bleu) et de la chaussée (rouge) au cours de l'hiver 1995-1996 [28].

## 2.5 Conclusions sur l'état de l'art

Les connaissances acquises par les institutions suisses responsables des ponts tant au niveau fédéral que du canton de Berne peuvent être considérées comme les plus avancées au monde avec celles des États-Unis et du Japon, en ce qui concerne le dimensionnement et la réalisation de l'installation. Deux domaines subsistent donc qui suscitent encore des interrogations : le premier est lié au cycle de vie de telles installations, tandis que le second concerne spécifiquement la solution proposée dans ce rapport, celle de fondations énergétiques.

En ce qui concerne le premier point, les expériences les plus anciennes de chauffage hydronique de tablier (États-Unis, SERSO) ont permis de déterminer différentes conclusions. Tout d'abord, toutes les tentatives de mise en œuvre aux États-Unis n'ont pas été couronnées de succès. Si le pont d'Amarillo au Texas est un succès complet, d'autres essais en Oregon et en Nouvelle-Angleterre ont rencontré des difficultés plus ou moins importantes [31]. La phase de construction apparaît comme la phase critique, avec un risque relativement élevé de créations de fuites si des précautions ne sont pas prises, particulièrement au niveau du tablier. Les différentes expériences peuvent permettre la mise en œuvre d'un protocole sécurisé.

En termes de durée de vie, un moteur majeur du développement de ces projets est de programmer une augmentation de la durée de vie du tablier, et de la chaussée pour les chaussées en béton hydraulique, liée à la diminution ou la suppression de l'usage de sel de déverglaçage. Il faudrait pour cela que la durée de vie des systèmes noyés (tant l'échangeur en chaussée que celui enterré) soit égale ou supérieure à celle de la structure. Ce point ne bénéficie pas d'un important retour d'expérience. La durée de vie des sondes géothermiques verticales enterrées est estimée entre 50 ans (selon énergiesuisse) et 100 ans (selon certains fabricants). L'expérience du côté des pieux énergétiques et de l'échangeur en tablier est plus faible, environ 30 ans pour les réalisations les plus anciennes. L'échangeur en tablier peut être conçu pour être réparable en cas d'avarie, ce qui n'est pas le cas des pieux échangeurs, supposés avoir une durée de vie de 100 ans. Ceux-ci sont cependant moins sollicités cycliquement. Il faut cependant noter qu'une avarie sur le côté sol, comme cela s'est produit en 2009 sur l'installation SERSO, nécessite de construire un nouvel échangeur de chaleur ou l'abandon de l'opération. La durée de vie des équipements situés entre les échangeurs (pompe, régulation ou pompe à chaleur) est de l'ordre de 25 ans.

En ce qui concerne la solution des fondations énergétiques appliquées au déverglaçage de ponts, les connaissances sont plus rares et pour une part importante en langue japonaise. Certains aspects de cette solution sont partagés avec les sondes géothermiques verticales, par exemple les facteurs influençant le comportement thermique de la zone du sol sollicitée. L'importance de l'écoulement souterrain soulignée par l'étude du projet SERSO doit être étudiée dans le contexte des fondations énergétiques. C'est le sens de ce rapport que de développer les outils et les connaissances nécessaires à la future réalisation d'un tel ouvrage. Les aspects technologiques et constructifs ayant été traités dans cette première section, on s'intéresse maintenant au dimensionnement et aux performances d'un ouvrage. Pour ce faire, l'approche choisie est la simulation numérique de la fondation énergétique, avec comme conditions celles rencontrées dans les fondations de ponts, qui diffèrent largement de celles rencontrées pour les bâtiments fondés sur pieux énergétiques. Deux cas sont étudiés, le premier étant le cas d'un pieu isolé, dont le comportement est étudié avec ou sans écoulement souterrain et avec différentes stratégies thermiques. Le second consiste à étudier une variante d'un ouvrage de franchissement récemment réalisé et pour lequel une étude géotechnique a été effectuée, qui donne une base réelle pour la simulation d'une fondation complète.

### 3 Comportement d'un pieu isolé

Dans cette section, on étudie le comportement thermo-hydro-mécanique d'un pieu énergétique isolé. Le pieu isolé est beaucoup plus représentatif du comportement d'un pieu dans une petite fondation comme celle d'une pile de pont que du comportement d'une fondation de bâtiment. Il représente donc dans ce cas une bonne première approche. Différentes possibilités en termes de chemin de chargement thermique sont explorées : géothermie très basse énergie avec recharge naturelle, avec ou sans écoulement d'eau, ou avec utilisation d'énergie solaire. La géométrie du pieu est fixée, ainsi que les caractéristiques mécaniques du sol. On fait varier les puissances extraites du sol, en ayant comme critère de dimensionnement une limite de température à ne pas franchir, en l'occurrence 2°C.

#### 3.1 Description du cas d'étude

Pour l'étude de cette situation, il est nécessaire de fixer des paramètres représentatifs de ce que l'on peut rencontrer dans des fondations de ponts sur pieux. On se fie pour cette section au seul ouvrage de ce type réalisé dans le monde, afin d'étudier son applicabilité aux conditions rencontrées dans le sous-sol suisse. On se base donc sur le pont de Saiwai, préfecture de Fukui, Japon, décrit à la section 2.4.5. La longueur moyenne des pieux est de 23 m, longueur reprise pour la simulation, et le diamètre est modifié pour une valeur plus habituelle de 1 m. Ne disposant pas d'étude géotechnique de ce site, on envisage une gamme de possibilités en termes d'écoulement souterrains, eux-mêmes pouvant être influencés par la conductivité hydraulique du sol ou par les conditions hydrogéologiques. On étudie aussi les deux approches de stockage de chaleur d'origine solaire (stratégie d'exploitation réelle du pont de Shin-Kinogawa) ou d'exploitation de la ressource géothermique très peu profonde.

#### 3.2 Modèle éléments finis

##### 3.2.1 Géométrie et maillage

On utilise un modèle tridimensionnel pour représenter le pieu circulaire dans le sol. Ce modèle est représenté à la Figure 3-1. Les dimensions du modèle prennent en compte les éléments déjà connus liés au comportement des pieux énergétiques. En outre, la volonté de réaliser une simulation thermo-hydro-mécanique avec simulation de l'écoulement souterrain impose de considérer avec attention les conditions aux limites à l'endroit où l'eau sort du modèle. Celle-ci doit arriver à la température naturelle du sol. Les raisons de la grande dimension du modèle dans la direction de l'écoulement sont détaillées au paragraphe suivant. Le pieu fait 1 m de diamètre, la largeur du modèle est de 10 m, tout comme la distance côté amont du pieu, tandis que la distance aval est de 500 m afin de permettre de tester une large gamme de valeurs d'écoulement souterrain sur plusieurs cycles annuels.

On utilise un maillage structuré dans la direction verticale, ainsi que dans les directions horizontales, loin du pieu. Dans la zone du pieu, le maillage est non-structuré dans les directions horizontales, afin de permettre la représentation d'une forme approchant le cylindre, ici un hexagone. On fait usage des propriétés de symétrie dans la représentation du problème. Les éléments de type hexaèdre linéaire à 8 points d'intégration sont au nombre de 6340, pour 8022 nœuds. On utilise le code de calcul aux éléments finis *Lagamine* [32], code qui gère les problèmes multi-physiques par couplage fort.

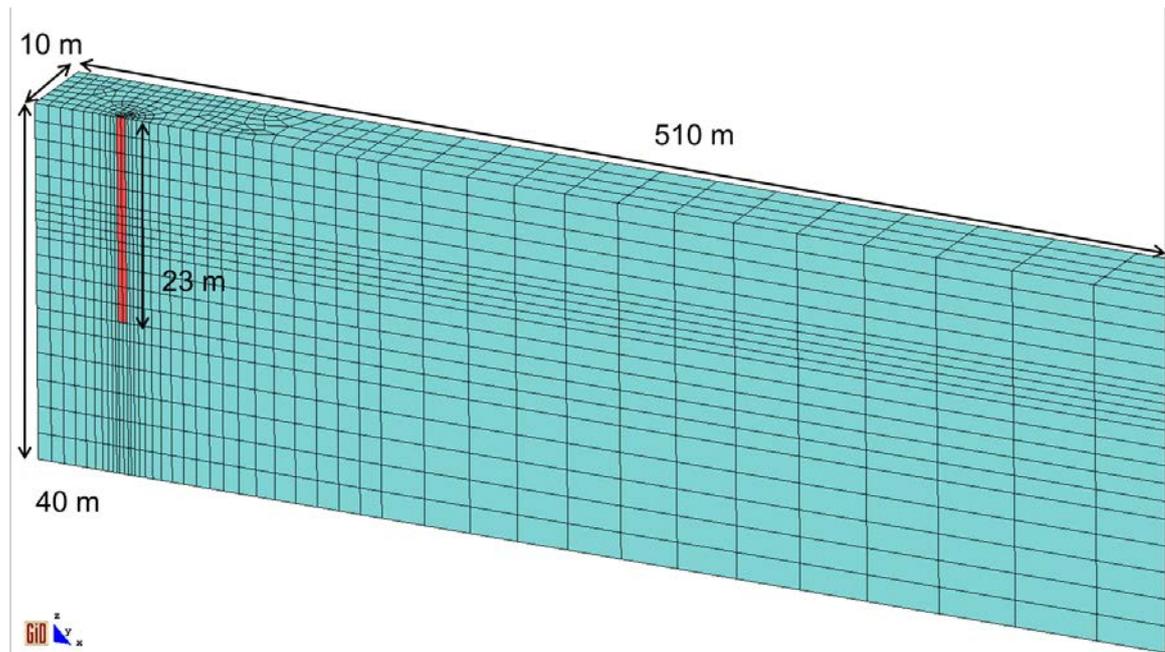


Figure 3-1 Vue du modèle éléments finis, avec zoom sur la zone du pieu et dimensions générales.

### 3.2.2 Conditions aux limites

On considère des conditions de température constantes sur les faces inférieure, amont, aval et latérale arrière, et des conditions adiabatiques sur la face supérieure, ainsi que par symétrie sur la face latérale avant. Sur le plan mécanique, les faces latérales sont bloquées dans la direction  $y$ , la face inférieure l'est dans la direction  $z$ , et les faces amont et aval dans la direction  $x$ . La face supérieure est libre. Du point de vue hydraulique, on applique des conditions aux limites d'étanchéité sur les faces latérales, inférieure et supérieure. Afin de représenter l'écoulement souterrain, on impose un gradient de pression entre les faces amont et aval, qui vient s'ajouter à la pression hydrostatique et donc entraîner un écoulement de vitesse constante à travers le modèle (sauf autour du pieu).

Il est important de considérer maintenant les interactions qui existent entre ces conditions aux limites et l'hypothèse habituelle d'égale température entre l'eau et le squelette du sol, qui est valide  $y$ -compris dans les gammes de vitesses d'écoulement considérées ici. La combinaison d'une condition aux limites de température constante avec un écoulement, qui est lui-même porteur de chaleur, entraîne une impossibilité physique si la température de l'écoulement (et donc du sol) n'est pas égale à la température imposée. C'est la raison pour laquelle la dimension du modèle est élevée à l'aval du pieu, permettant au modèle de simuler sans risque au moins 4 ans de fonctionnement avec un écoulement souterrain de 0,3 m/s.

### 3.2.3 Conditions initiales

On considère initialement un massif de sol chargé par gravité, avec un coefficient des terres au repos de 1. Lors d'une première étape de calcul, on applique un rabattement de nappe à l'aval du modèle afin de créer un écoulement déterminé en fonction de la perméabilité du sol considéré. On laisse un régime permanent s'établir. Cet écoulement se fait donc dans la grande direction du modèle. Les valeurs choisies pour les essais sont 0,015 m/j et 0,3 m/j. La dernière valeur correspond avec le sol considéré à un écoulement à surface libre dans une pente de 1 %, soit la pente topographique dans la plaine du Rhône.

On applique aussi dans cette étape une charge mécanique en tête de pieu. La valeur de celle-ci a été déterminée conformément à la norme suisse, sur le site considéré. Elle s'élève à 2750 kN, ce qui correspond à une contrainte de 3,9 MPa. Les déplacements à l'issue de cette initialisation sont par la suite pris comme référence zéro.

D'un point de vue thermique, on prend comme température initiale une valeur de 12 °C typique de celle observée en Suisse.

### 3.3 Formulation thermo-hydro-mécanique

#### 3.3.1 Modèle diffusif

Le modèle diffusif (thermique, hydraulique) utilisé pour cette simulation a été écrit et implémenté dans le logiciel de simulation aux éléments finis *Lagamine* par Collin [33]. Une description rapide des équations diffusives importantes pour le problème est présentée ici. Ces équations concernent un milieu saturé en eau, comme c'est le cas, et sont utilisées aussi bien pour le pieu en béton que pour le sol. Les équations d'équilibre et de conservation sont exprimées dans une configuration déformée, en utilisant une formulation Lagrangienne actualisée [32]. Cela signifie que la formulation n'est ni eulérienne (maillage fixe), ni lagrangienne (maillage attaché au fluide) mais un cas simple de formulation arbitraire lagrangienne-eulérienne, le mouvement du maillage étant attaché au solide déformable [33].

La conservation locale de la masse d'eau s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l n) + \text{div}(\rho_l \mathbf{f}_l) - Q_l = 0 \quad (4.1)$$

où  $\rho_l$  est la masse volumique de l'eau,  $\mathbf{f}_l$  est la vitesse macroscopique de l'eau,  $Q_l$  est le terme source de masse d'eau, et  $n$  est la porosité du milieu.

Il est nécessaire de ramener les équations d'équilibre et de conservation à des fonctions des variables primaires, qui sont la pression d'eau interstitielle  $p_l$  et la température du milieu  $T$ . Pour cela, on relie la masse volumique de l'eau à ces grandeurs de la manière suivante :

$$\rho_l = \rho_{l0} \left( 1 + \frac{p_l - p_{l0}}{\chi_l} - \beta_l^T (T - T_0) \right) \quad (4.2)$$

où  $\rho_{l0}$ ,  $p_{l0}$  et  $T_0$  sont les valeurs initiales de la masse volumique de l'eau, de la pression interstitielle et de la température, respectivement, et  $\chi_l$  est la compressibilité de l'eau liquide,  $\beta_l^T$  le coefficient volumique d'expansion thermique de l'eau liquide.

Le mouvement de la phase liquide est gouverné par la loi de Darcy :

$$\mathbf{f}_l = -\frac{k}{\mu_l} \mathbf{grad}(p_l) \quad (4.3)$$

où  $k$  la perméabilité intrinsèque, isotrope, et  $\mu_l$  la viscosité dynamique de l'eau, qui dépend de la température. La conductivité hydraulique est donc elle-même dépendante de la température.

Collin [33] a déterminé la variation de masse d'eau lorsque l'on prend en compte en outre la déformation volumique locale. En intégrant cette relation et la loi de Darcy dans l'équation (4.1), on obtient l'équation de conservation de la masse exprimée en fonction des variables primaires, ou facilement dérivées d'elles (cas de  $\dot{\varepsilon}_v$ ) :

$$n\rho_{w0} \left( \frac{\dot{p}_l}{\chi_l} - \beta_l^T \dot{T} \right) + \rho_l \dot{\varepsilon}_v + \text{div} \left( -\frac{\rho_l k_l}{\mu_l} \mathbf{grad}(p_l) \right) - Q_l = 0 \quad (4.4)$$

avec  $\dot{G}$  la dérivée par rapport au temps de la grandeur  $G$ , et  $\varepsilon_v$  la déformation volumique du squelette.

En ce qui concerne la conservation de l'énergie, elle s'écrit à la base de la manière suivante :

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho C_p(T - T_0))}{\partial t}}_{\text{Heat storage}} + \underbrace{\text{div}(\mathbf{f}_T)}_{\text{Heat transfer}} - Q_T = 0 \quad (4.5)$$

où  $\mathbf{f}_T$  est le flux thermique,  $Q_T$  est le terme source, et  $\rho$  et  $C_p$  sont respectivement la masse volumique et la capacité thermique (massique) du sol saturé constitué d'une matrice solide dont les vides sont remplis par l'eau liquide. Ces paramètres sont fonction des propriétés de chaque phase selon la relation suivante :

$$\rho C_p = n\rho_w c_{p,w} + (1-n)\rho_s c_{p,s} \quad (4.6)$$

où  $\rho_s$  est la masse volumique des grains et  $c_{p,l}$  et  $c_{p,s}$  sont les capacités thermiques massiques de l'eau et des grains, respectivement.

Le transport de chaleur est lui régi par la conduction, mais aussi par la convection, ce qui permet d'écrire cette relation :

$$\mathbf{f}_T = -\lambda \text{grad}(T) + c_{p,l} \rho_l \mathbf{f}_l (T - T_0) \quad (4.7)$$

dans laquelle  $\lambda$  est la conductivité thermique du milieu, elle-même fonction de celle des différentes phases :

$$\lambda = \lambda_s (1 - n) + \lambda_w n \quad (4.8)$$

où  $\lambda_s$  et  $\lambda_l$  sont les conductivités thermiques des phases solide (grains) et liquide (eau) respectivement.

### 3.3.2 Modèle mécanique

L'écriture de l'équation d'équilibre mécanique se fait en utilisant le concept de contraintes effectives. L'équation d'équilibre est donc :

$$\text{div}(\boldsymbol{\sigma}') + \text{div}(\rho \mathbf{l}) + \rho \mathbf{g} = 0 \quad (4.9)$$

avec  $\boldsymbol{\sigma}'$  le tenseur des contraintes effectives,  $\rho = n \rho_l + (1-n) \rho_s$  la masse volumique du milieu et  $\mathbf{l}$  la matrice identité.

La relation contraintes-déformations est donnée par une loi thermo-élastique, dont on rappelle la formulation ci-dessous :

$$\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{E} \left( \boldsymbol{\varepsilon} - \frac{\beta}{3} \Delta T \mathbf{1} \right) \quad (4.10)$$

où  $\mathbf{E}$  est le tenseur d'ordre 4 de rigidité élastique linéaire isotrope,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  le tenseur des déformations,  $\beta$  le coefficient volumique d'expansion thermique, et  $\Delta T$  l'écart de température avec la valeur initiale.

### 3.3.3 Couplages multi-physiques

Les deux paragraphes précédents ont mis en évidence les différents aspects qui couplent les problèmes hydrauliques, thermiques et mécaniques. On relève donc l'effet de la température sur la relation contrainte-déformation (4.10), l'effet de la pression d'eau sur l'équilibre mécanique (4.9), l'effet des mouvements d'eau (liés au champ de pressions d'eau) sur le transport de chaleur (4.7), l'effet de la température sur les mouvements d'eau (4.3), et les effets combinés de la température et des déformations sur la conservation de la masse d'eau (4.4).

La stratégie de résolution de ce problème se base sur plusieurs choix, détaillés par Collin [33]. Le premier choix est de conserver un couplage fort, ou monolithique, par opposition à une résolution séquentielle du problème. Cela est possible en considérant d'un côté les variables primaires nodales  $X=(x, y, z, p, T)$  et de l'autre leurs conjuguées  $F=(F_x, F_y, F_z, Q_l \text{ et } Q_T)$ , les  $F_i$  représentant les forces et  $Q_j$  les débits. On recherche ensuite à chaque pas l'équilibre des forces (et débits) intérieures et extérieures au modèle. La méthode de résolution de ce problème fortement non-linéaire consiste à linéariser le problème de mi-

nimisation des forces hors équilibre à chaque itération au sein d'un pas de calcul, permettant ainsi de déterminer l'évolution des variables nodales :

$$\mathbf{K}\Delta\mathbf{X} = \mathbf{F}^{\text{HE}} \quad (4.11)$$

avec  $\Delta\mathbf{X}$  l'incrément du vecteur des variables nodales,  $\mathbf{F}^{\text{HE}}$  le vecteur des forces hors-équilibre et  $\mathbf{K}$  la matrice tangente d'itération (ou matrice tangente de rigidité, par analogie avec le problème mécanique), qui exprime l'effet de chacune des variables nodales sur les forces au sein d'un élément. Ces termes s'expriment donc ainsi :

$$K_{Lj,Mk} = \frac{\partial F_{jL}}{\partial X_{kM}} \quad (4.12)$$

avec les indices  $j$  et  $k$  variant ici de 1 à 5 pour les 5 variables et leurs conjuguées, et les indices  $L$  et  $M$  représentant la discrétisation nodale du problème. On voit bien dans cette forme que les couplages ( $j \neq k$ ) sont pris en compte de façon identique à la partie non-couplée du problème ( $j = k$ ). A chaque itération, on ajoute la correction des valeurs nodales et on recalcule les forces hors-équilibre, jusqu'à ce que celles-ci soient suffisamment faibles.

### 3.3.4 Caractéristiques des matériaux

Deux matériaux sont considérés ici, le sol et le béton. Dans cette première partie du travail, on considère un sol générique de perméabilité élevée, de type sable limoneux ou sable fin. Les paramètres mécaniques, thermiques et hydrauliques des deux matériaux sont présentés au Tableau 3-1.

Tableau 3-1 Paramètres matériaux.

Paramètre	sol	béton
Porosité [-]	0,34	0,12
Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	2122	2408
Conductivité hydraulique à 20°C [m/s]	3,5×10 <sup>-4</sup>	9×10 <sup>-9</sup>
Conductivité thermique [W/(m.K)]	1,59	1,56
Capacité thermique [J/(kg.K)]	1426	1045
Coefficient volumique de dilatation thermique [K <sup>-1</sup> ]	3×10 <sup>-5</sup>	3,6×10 <sup>-5</sup>
Module d'Young [MPa]	20	3500
Coefficient de Poisson [-]	0,3	0,2

## 3.4 Scénarios d'exploitation

Il existe deux stratégies d'exploitation thermique des pieux énergétiques. La recharge thermique, qui est nécessaire au bon fonctionnement de l'échangeur, peut être soit naturelle, soit aidée par une source extérieure. La recharge thermique est nécessaire au fonctionnement à long terme, sous peine d'épuisement de la source de chaleur (gel possible du sol). La source extérieure de chaleur, dans le cas d'une chaussée, peut facilement être l'énergie solaire, comme cela a été vu dans la section 2.4.7. On envisage donc ces 2 solutions, combinées avec 3 situations d'écoulement souterrain : pas d'écoulement souterrain, faible écoulement souterrain de 0,015 m/s et écoulement fort de 0,3 m/s. Étant attendu que la recharge solaire soit inutile dans le cas d'un fort écoulement, et que la recharge naturelle soit faible dans le cas sans écoulement, on ne considère que les quatre scénarios suivants :

- Cas 1 : Faible écoulement souterrain et recharge solaire

- Cas 2 : Faible écoulement et recharge naturelle
- Cas 3 : Absence d'écoulement et recharge solaire
- Cas 4 : Fort écoulement et recharge naturelle

Le chargement thermique, qu'il soit pour l'extraction de chaleur (sol en tant que source) ou pour l'injection (recharge solaire, sol en tant que puits) est effectuée en imposant le flux thermique entrant ou sortant au niveau du pieu, de manière volumique. Etant donné l'impossibilité de simuler de manière couplée l'échange de chaleur ayant lieu entre le fluide échangeur, le tube noyé dans le pieu et le béton lui-même, la stratégie de chargement ne tient pas compte des variations quotidiennes de l'échange de chaleur, dont l'influence est surtout mesurable dans le pieu. On établit donc deux profils annuels d'échange de chaleur, qui sont représentés à la Figure 3-2 pour le cas de l'écoulement souterrain faible. La première phase, la saison chaude, est une période où aucun échange de chaleur n'est imposé dans le cas géothermique tandis que pour le cas avec recharge solaire, on commence par une rampe linéaire au mois de mai, suivie par 3 mois d'injection de chaleur à taux constant, et terminée par une rampe au mois de septembre. S'ensuit un mois de repos, avant l'hiver qui est géré de la même manière dans les deux cas. Pendant le mois de novembre, l'extraction de chaleur augmente linéairement, suivie par 3 mois d'extraction constante, et au mois de mars l'extraction diminue avant un mois de repos, avril. Le point de départ de la simulation (temps zéro) est le 1<sup>er</sup> mai de l'année 1.

Un des objectifs de l'étude consistant à évaluer les capacités énergétiques de chaque situation technique, la valeur atteinte lors des phases constantes n'est pas définie à l'avance. Elle est établie par simulations successives afin de respecter un critère de température au niveau du pieu, à savoir que celui-ci ne descende pas sous 2 °C. Le deuxième critère est la stabilité des températures à long terme, donc l'énergie extraite doit être égale à celle disponible par recharge, qu'elle soit naturelle ou solaire. Dans le cas de la recharge solaire, on injecte une quantité d'énergie du même ordre de grandeur que celle extraite, mais adaptée de manière à conserver une température en fin d'extraction égale d'année en année, qui assure le fonctionnement à long terme du système.

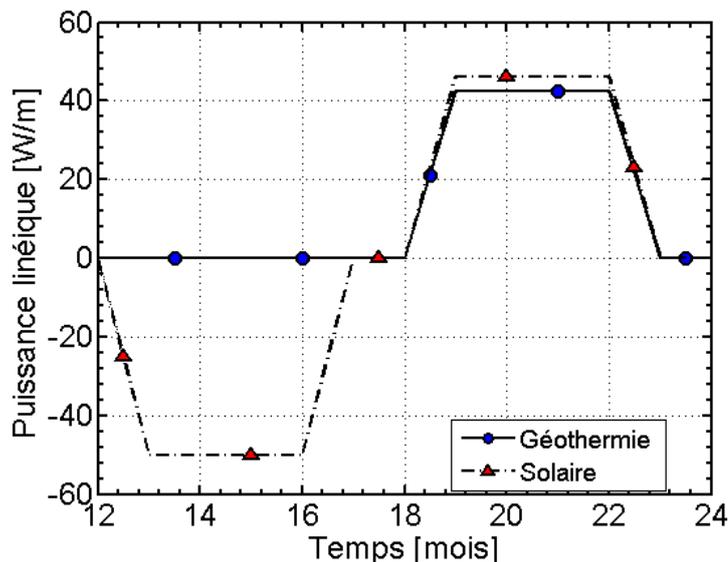


Figure 3-2 Description des échanges de chaleur imposés par le modèle au niveau du pieu, exprimés par mètre de pieu.

### 3.5 Résultats

#### 3.5.1 Cas 1 : Faible écoulement souterrain et recharge solaire

Pour ce cas, l'écoulement souterrain est imposé à 0,015 m/j, soit une valeur inférieure à la limite de 0,05 m/j déterminée par Nordell et Hellström [34] pour évaluer le besoin de

mise en place d'un écran à l'amont d'un stockage souterrain de chaleur. On choisit une valeur inférieure pour tenir compte du fait qu'on n'utilise ici qu'un pieu et donc que le volume de sol sollicité thermiquement est très inférieur à un massif complet.

On obtient en fonction des critères de dimensionnement un potentiel d'extraction en moyenne hivernale de 46 W/m (puissance moyenne de dimensionnement PMD), qui est au milieu de la gamme observée par Pahud [27], de 30 à 70 W/m. La puissance moyenne de la recharge estivale doit dans ce cas être de 50 W/m afin d'assurer un usage durable du pieu énergétique. La Figure 3-3 illustre l'évolution de la température dans le pieu sous forme de profils en profondeur. On constate une bonne homogénéité de la température au sein du pieu, sauf à son extrémité basse, on se focalisera donc sur un point du milieu du pieu pour les figures suivantes, ce qui est représentatif. Les températures varient donc entre 1 et 25 °C, logiquement atteintes à fin février et fin août, respectivement.

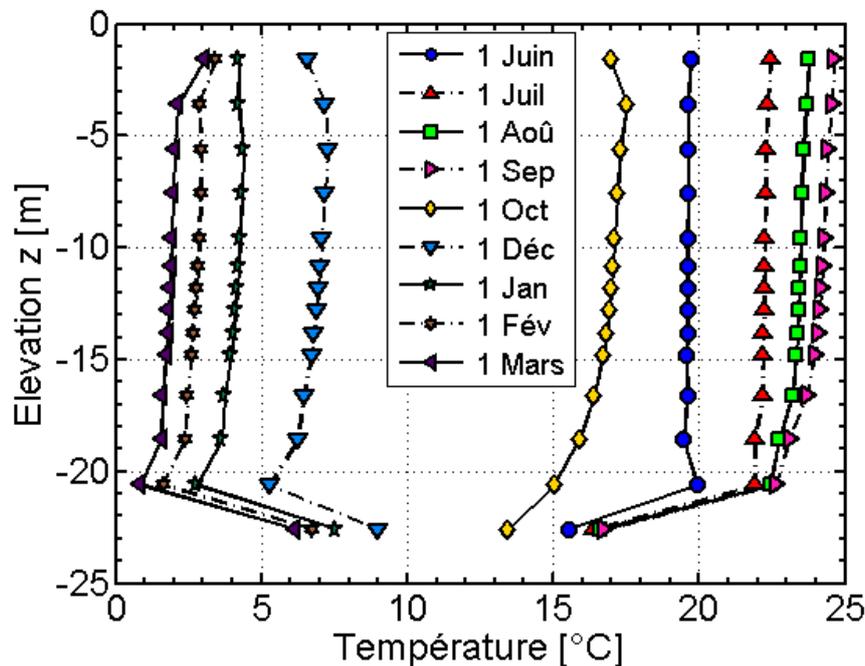


Figure 3-3 Profils de température dans le pieu à différents moments de l'année 2.

L'effet de cette gamme de températures sur le comportement mécanique de la fondation peut être évalué par l'évolution des contraintes pendant la durée de la simulation. On considère trois points du pieu à différentes profondeurs, pour lesquels on représente à la Figure 3-4 la moyenne des contraintes induites par la température sur les trois éléments constituant une tranche du pieu. On observe une homogénéité correcte de l'évolution, la surcontrainte maximale étant localisée près du milieu du pieu. La magnitude observée de 0,2 MPa correspond donc à 15 kPa/°C, une valeur faible qui correspond bien à ce cas où le pieu est très peu contraint par des éléments extérieurs, tels une dalle avec d'autres pieux. Pour comparaison, un pieu entièrement bloqué subirait une surcontrainte de l'ordre de 300 kPa/°C [35]. Ces valeurs ne sont d'aucun danger pour l'intégrité du pieu, dont on rappelle qu'il est chargé en tête à 3,9 MPa, et peut facilement être dimensionné pour cette faible surcontrainte.

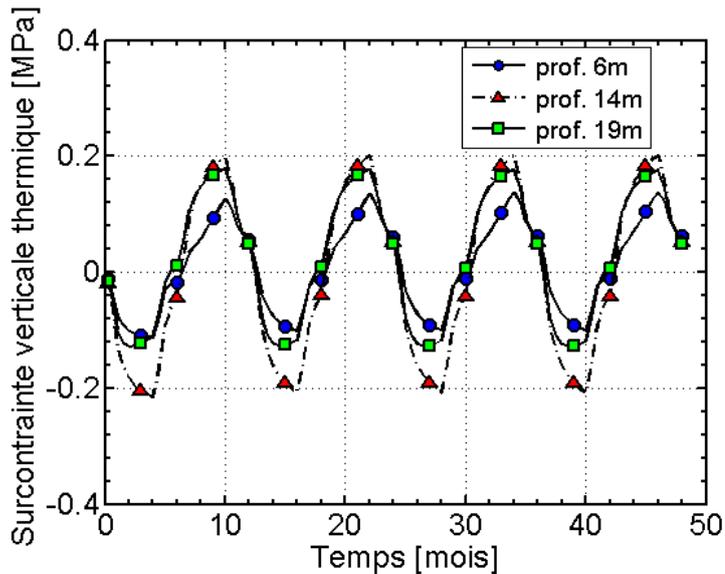


Figure 3-4 Evolution des contraintes additionnelles liées à la température (compression négative) dans le pieu en fonction du temps.

Le second aspect du comportement géotechnique d'un tel pieu isolé est lié aux déplacements, en particulier ceux observables en surface, et qui seraient transférés à la superstructure, en totalité si celle-ci est souple, ce qui est le cas des ponts. L'amplitude totale sur l'année est de 2,5 mm, ce qui reste dans les déplacements admissibles pour un tablier de pont. Si l'on considère ce mouvement comme une déflexion du tablier sous l'effet d'une action quasi-permanente, le critère de la SIA 260 d'une flèche inférieure à  $L/700$  est rempli pour toute longueur de tablier réel.

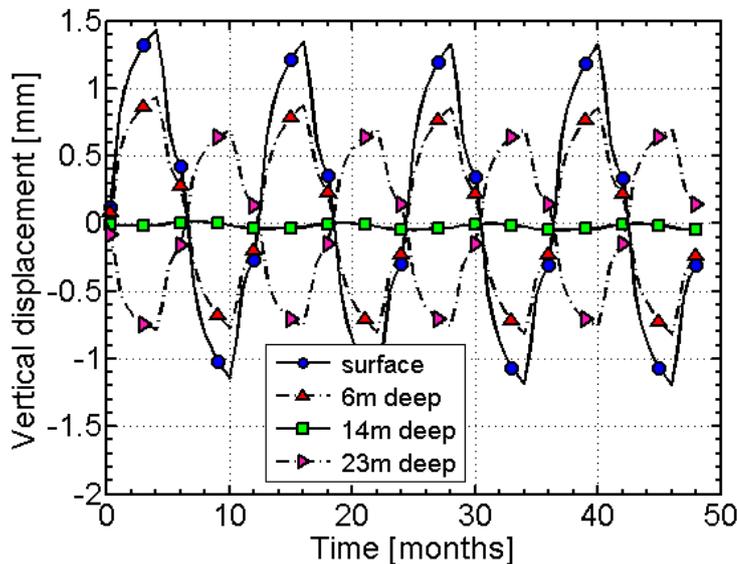


Figure 3-5 Evolution des déplacements en surface et dans le pieu en fonction du temps.

### 3.5.2 Cas 2 : Faible écoulement et recharge naturelle

Pour le cas 2 et les autres cas sans recharge solaire, la simulation commence à la phase d'extraction et pour la compréhension des graphes, l'échelle de temps tient compte de ce décalage ( $t_0=6$  mois). Pour ce cas, on obtient une PMD de 42,5 W/m, ce qui est seulement légèrement inférieur. L'explication de ce faible écart réside dans le comportement du système après injection de chaleur. On représente sur la Figure 3-6 les profils de température dans les deux cas, à la fin de la période d'injection pour la solution solaire, à la fin de la période de recharge pour la solution géothermique. On constate qu'au moins de septembre, alors que de l'énergie est encore injectée dans le système, la perte de

température est déjà très importante, tandis qu'au 1<sup>er</sup> novembre, on est revenu à une température avec moins d'un degré d'écart par rapport à la température naturelle. L'énergie injectée n'est donc pas en mesure d'être stockée de façon viable à l'échelle inter-saisonnière. Si l'on s'attendait à une efficacité moindre du stockage de chaleur par comparaison à une fondation de bâtiment, l'ampleur de la perte interdit l'idée même de stockage saisonnier ici. La récupération estivale d'énergie solaire doit donc être limitée dans son approche à un autre aspect, le contrôle de la température de chaussée. En effet, en l'absence de pompe à chaleur, la récupération de cette énergie est très peu coûteuse (pompe de circulation seulement). Mais elle peut permettre de maintenir systématiquement l'enrobé en chaussée à une température inférieure au point de ramollissement du bitume, bénéficiant à la durabilité de celle-ci et à la sécurité des usagers. Pour des chaussées en béton hydraulique, le contrôle de température peut être considéré comme inutile.

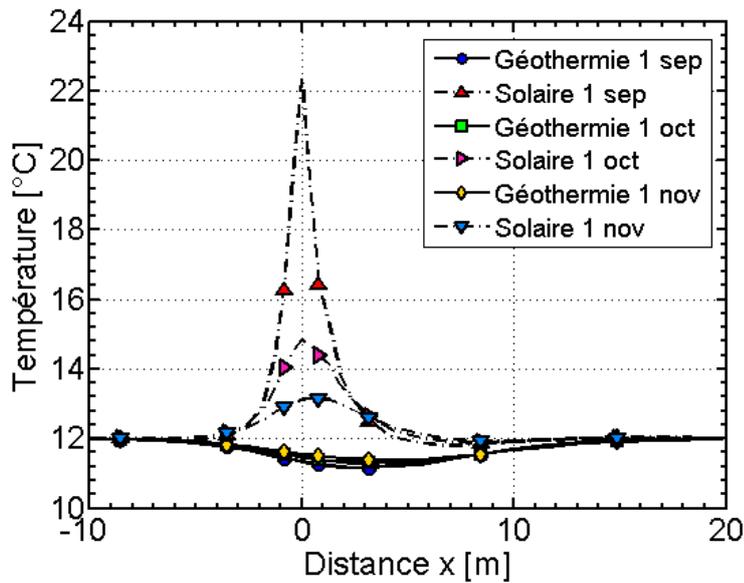


Figure 3-6 Profils de température dans et autour du pieu, à 20 m de profondeur, à trois temps correspondant à la période pré-extraction, pour les cas 1 et 2.

Du point de vue mécanique, la principale différence avec le cas 1 provient de l'évolution annuelle des déplacements, ainsi qu'on peut le voir à la Figure 3-7. L'amplitude dans le cas de la recharge géothermique est de 1,3 mm, ce qui est encore un point positif pour cette solution d'exploitation.

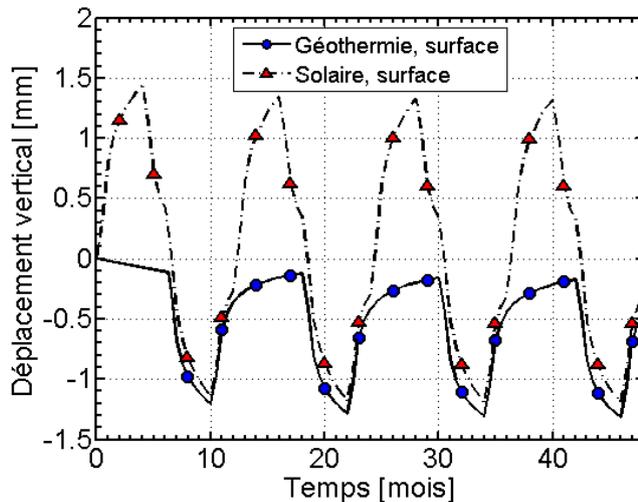


Figure 3-7 Evolution du déplacement vertical de la tête de pieu dans les cas 1 et 2.

### 3.5.3 Cas 3 : Absence d'écoulement et recharge solaire

Un cas supplémentaire a été simulé pour déterminer le rôle de l'écoulement souterrain dans l'inefficacité observée du stockage de chaleur solaire, vis-à-vis du rôle de la géométrie du système. On a donc supprimé l'écoulement souterrain. La PMD obtenue s'établit au même niveau, 46 W/m que dans le cas 1. On observe simplement de légers changements dans le profil de température à proximité du pieu. Ceux-ci sont visibles sur la Figure 3-8, qui montre un léger décalage vers la droite (de l'ordre de 1 m au 1<sup>er</sup> novembre) de la courbe de température. La courbe en question étant relativement plate, et la température maximale inchangée, la perte liée à l'écoulement est minimale. On conclut donc que l'inefficacité de stockage est entièrement liée à la géométrie mono-pieu du système.

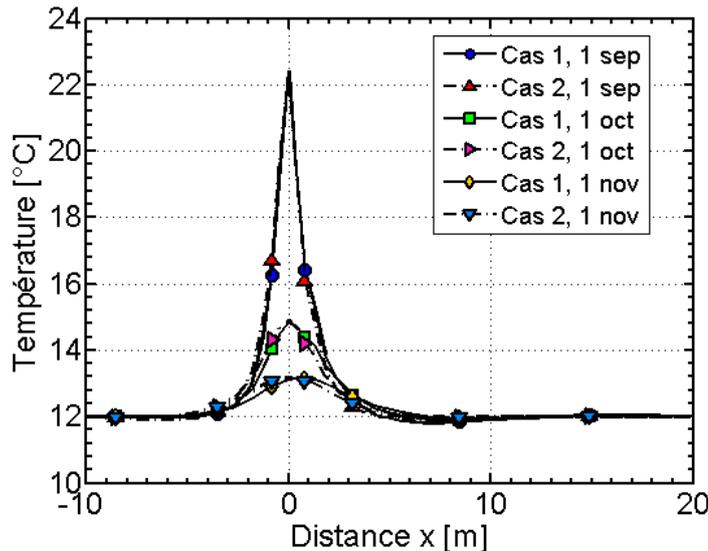


Figure 3-8 Profils de température dans et autour du pieu, à 20 m de profondeur, à trois temps correspondant à la période pré-extraction, pour les cas 1 et 3.

### 3.5.4 Cas 4 : Fort écoulement et recharge naturelle

L'évaluation des usages potentiels d'un pieu énergétique isolé a mis en évidence les différences qui peuvent exister entre celui-ci et une fondation énergétique de bâtiment. La recharge naturelle étant la technique à privilégier avec un tel dispositif, on souhaite estimer dans quelle mesure un écoulement souterrain important pour augmenter l'usage du pieu énergétique. L'écoulement souterrain, néfaste au stockage de chaleur, est en revanche très favorable à la recharge thermique naturelle dans la mesure où l'eau arrive à la température naturelle du sol. Une vitesse d'écoulement de 0,3 m/j est donc considérée pour le cas 4. Le profil d'extraction correspond à celui de la Figure 3-2 avec une PMD adaptée au nouveau cas. On parvient ici à une PMD de 90 W/m, soit au-delà de la gamme de valeurs considérées comme courantes par Pahud [27], mais cependant proche des valeurs mesurées pour d'autres projets utilisant des pieux énergétiques (Palais Quartier, Francfort, 86 W/m [36]). Il s'agit donc d'une augmentation très importante de 110 % du potentiel du pieu énergétique par rapport au cas 1.

L'évolution des températures est représentée à la Figure 3-9, démontrant que le critère utilisé est bien identique pour les deux simulations, tandis que l'allure des courbes diffère nettement. Aussi bien en période d'utilisation que de repos, on atteint pour le cas 4 un plateau, qui indique l'équilibre entre le transfert d'énergie apportée pour l'écoulement et la demande de l'ouvrage. L'énergie prise à l'écoulement croît avec le différentiel de température entre le pieu et le sol. Dans la phase de recharge thermique, on constate aussi que l'énergie apportée par l'écoulement par le phénomène de convection suffit à revenir à la température naturelle en deux mois, alors que dans le cas 2, on atteint en fin de période de repos une température identique sur les années 3 et 4, mais inférieure d'1 °C à la température naturelle.

On s'intéresse finalement aux conséquences mécaniques de cette différence de fonctionnement, en observant les déplacements en surface, à la Figure 3-10. On constate que malgré des températures identiques à l'intérieur du pieu, le fonctionnement thermo-élastique du pieu et du sol est différent du cas 2, avec en particulier des déplacements plus importants dans le cas 2, à température de référence égale. Cela s'explique par des différences dans le champ thermique autour du pieu, à la fois dans la direction de l'écoulement mais aussi perpendiculairement à celui-ci. On représente donc sur les Figures 3-11 et 3-12 les champs de température dans le massif de sol. Le plan supérieur visible (plan de coupe) est situé à la côte -10 m, afin de visualiser la répartition des températures perpendiculairement à l'écoulement. On constate de fortes différences dans l'allure du champ de température : il est plus étendu en longueur et beaucoup moins en largeur dans le cas 4, et les températures à la surface du pieu au même instant sont légèrement inférieures dans le cas 2. On visualise aussi dans le cas 4 la présence des restes d'une bulle de froid due à l'extraction de la première année, à droite de la Figure 3-12, alors que dans le cas 2, les deux bulles sont confondues, expliquant la forme allongée de celle-ci. Ce dernier point explique aussi pourquoi les déplacements dans le cas 2 ne sont pas réversibles par rapport à l'état initial, alors que dans le cas 4, on retrouve dans la zone proche du pieu un état égal à l'état initial.

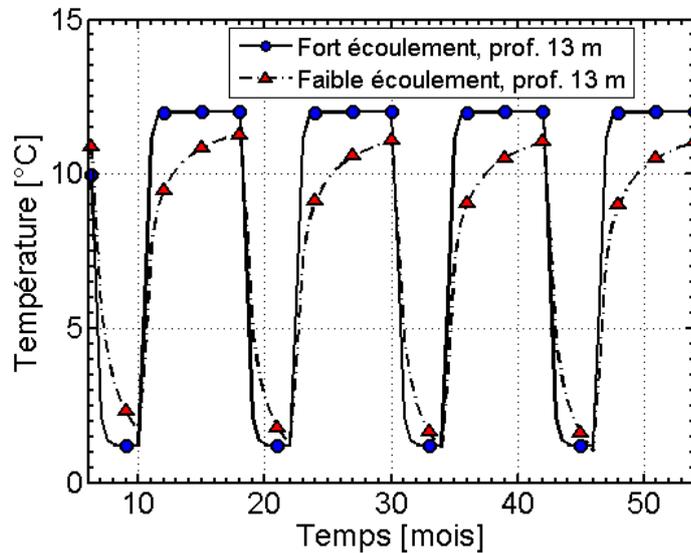


Figure 3-9 Evolution de la température dans le pieu pour deux vitesses d'écoulement souterrain différentes, avec deux puissance d'extraction différentes (Cas 2, Cas 4).

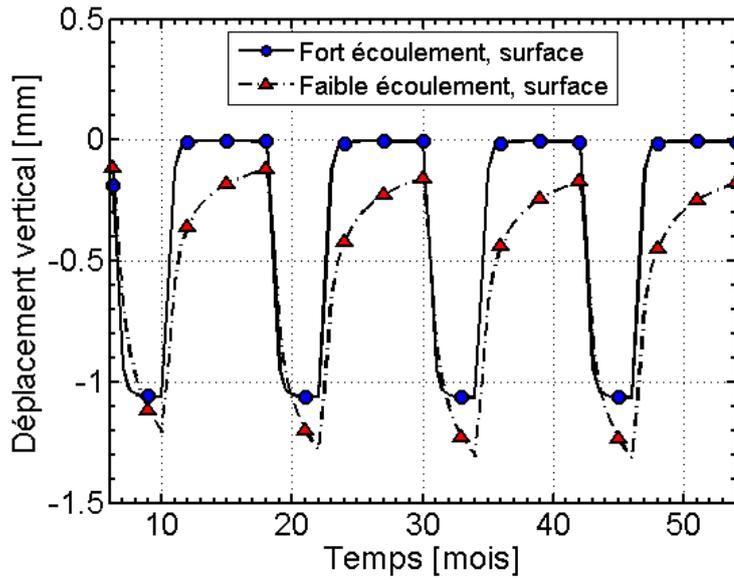


Figure 3-10 Evolution du déplacement en tête de pieu pour les cas 2 et 4.

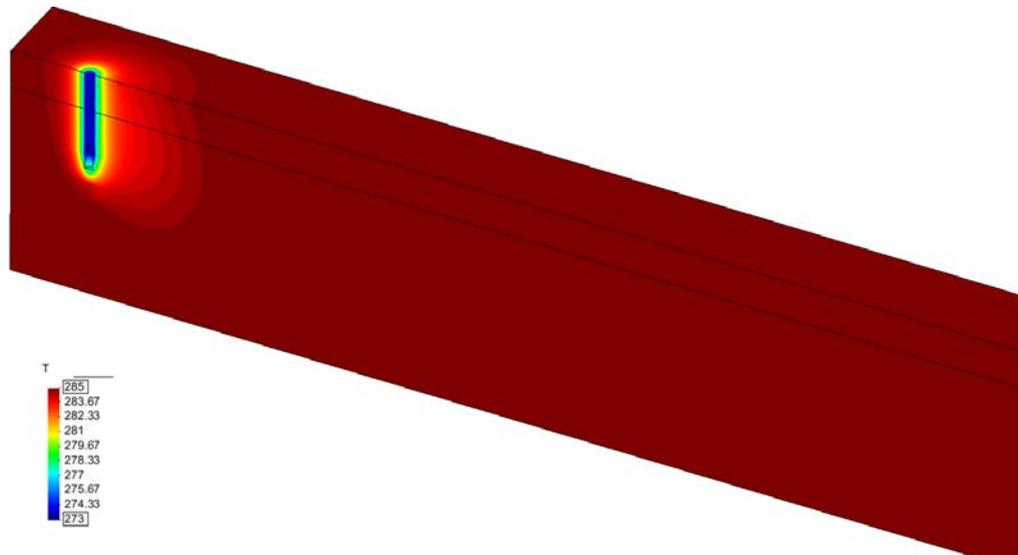


Figure 3-11 Vue tridimensionnelle du champ de température au mois 15 de la simulation dans le cas 2.

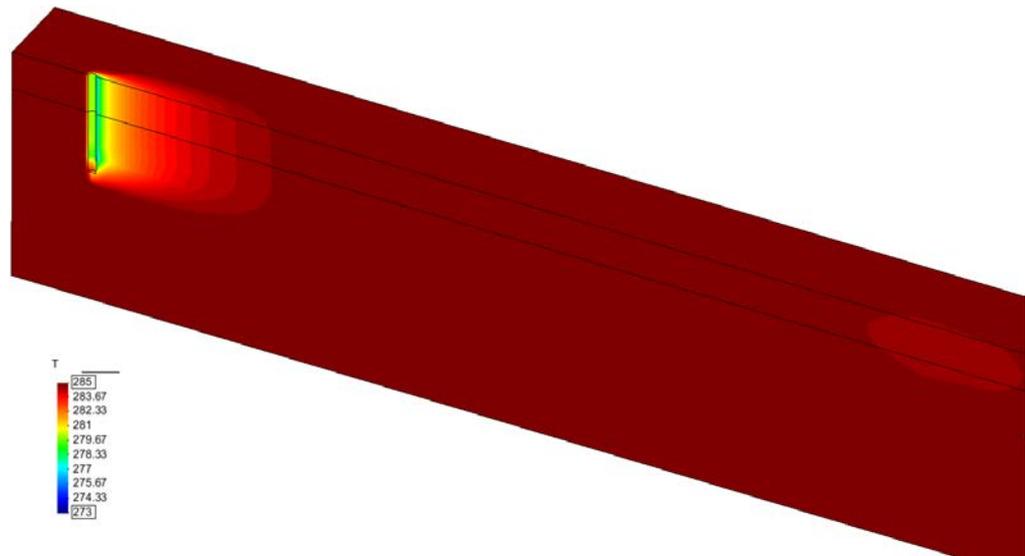


Figure 3-12 Vue tridimensionnelle du champ de température au mois 15 de la simulation dans le cas 4.

### 3.6 Conclusions

Cette partie de l'étude a permis l'identification des approches d'exploitation les plus favorables pour l'usage de pieux énergétiques pour la régulation routière. L'énergie totale que peut fournir le pieu étudié sur une saison froide s'élève de 3,48 MWh pour le cas le moins favorable à 7,37 MWh pour le cas avec forte recharge thermique naturelle induite par l'écoulement d'eau. En première approximation, avec une demande de l'ordre de 100 kWh/m<sup>2</sup> de pont, par saison froide, cela couvrirait les besoins de 34 à 73 m<sup>2</sup> de tablier, ou bien dans une unité plus générale, 1,5 à 3 m<sup>2</sup> de tablier par m de pieu énergétique.

## 4 Comportement d'une fondation de pile de pont

### 4.1 Contexte détaillé

#### 4.1.1 Contexte hydro-géologique et géotechnique

En Suisse, les terrains de la plaine du Rhône peuvent être considérés parmi les terrains les plus favorables pour l'implantation des pieux énergétiques, en raison de la présence de sable et de leur perméabilité pouvant être élevée, et associée à une porosité importante. On se base pour cela sur la réalisation récente d'un pont, le pont sur le Grand Canal, sur la route H144, fondé sur pieux. Cet ouvrage présente des caractéristiques qui correspondent à l'usage d'un tablier chauffant, avec cinq travées totalisant 129 m pour une largeur de deux fois une voie de circulation et une bande d'arrêt d'urgence (10,5 m utiles), soit 1350 m<sup>2</sup> de tablier. On va dans cette section détailler plus avant les caractéristiques de ce projet ainsi que les modifications envisagées pour proposer une variante à fondation énergétique de ce pont. Une étude géotechnique détaillée a été mise à disposition par le bureau Conus & Bignens avec autorisation du Département des Infrastructures de l'État de Vaud [37]. On rappelle tout d'abord le profil en long de l'ouvrage à la Figure 4-2, puis un résumé des conditions géologiques à la Figure 4-3. Six forages carottés ont été effectués au droit des futures fondations, et un dans la zone proche. Chacun était d'une profondeur de 30 m, et des essais in-situ (pénétrömètre statique) ont complété ces forages pour permettre le dimensionnement.

Du point de vue géologique, on rencontre pour cet ouvrage 3 types de sols principaux et quelques éléments secondaires [37]. La couche la plus profonde est constituée de dépôts glacio-lacustres fins. Elle a été rencontrée dans les 6 forages, entre les côtes -20 m et -10 m, et s'étendait toujours jusqu'au bout du carottage. La géologie des lieux indique une grande épaisseur de ce type de dépôt. Ceux-ci ont sédimenté en aval du front du glacier ou sous la glace, et présentent quelques inclusions de graviers ou de moraine. On rencontre ensuite dans six des sept forages des dépôts glacio-lacustres grossiers à moyens, provenant du retrait de la langue du glacier du Rhône. Ces mêmes dépôts sont présents plus haut dans le septième forage. Leur épaisseur varie entre 2 et 10 m, et est plus importante en rive gauche. Enfin on trouve une couche morainique qui est la dernière couche géologique en rive gauche, mais qui est surmontée d'éléments plus récents en rive droite. Celle-ci est la moraine frontale du glacier de la Dérotchia, qui était en rive gauche. L'épaisseur de moraine varie entre 3 et 9 m. En rive gauche, on trouve au-dessus de 1 à 3 m de remblai. En rive droite, des matériaux plus récents surmontent les trois couches principales : dépôts d'inondations, dépôts palustres (tourbe) pour des épaisseurs de 0,5 à 3 m, surmontée d'une fine couche de remblai. Ceux-ci proviennent de divagations du cours du Rhône suite au retrait du glacier de la Dérotchia. Le forage supplémentaire s'est avéré moins clair que les autres, avec les mêmes natures de sols mais avec des insertions de dépôts glacio-lacustres fins dans les couches supérieures.

L'hydrogéologie de la plaine du Rhône a aussi été étudiée. Comme on peut s'y attendre, les mouvements d'eau souterraines sont affectés par les variations de niveau du Rhône, mais présentent deux caractéristiques constantes : une tendance à l'écoulement vers le lac, parallèlement au Rhône et au Grand Canal, et un effet de drainage du Grand Canal. Ces tendances sont représentées à la Figure 4-1. Le Grand Canal étant avant tout destiné au drainage de la région [38], on ne considère pas l'effet des variations thermiques saisonnières de l'eau du canal, qui n'influerait sur la température de l'aquifère que pendant les périodes d'infiltration [39]. Le niveau de la nappe dans les forages a été mesuré toujours proche de celui du canal lui-même, avec des niveaux légèrement inférieurs en rive gauche et légèrement supérieurs en rive droite. La quasi-totalité de la longueur des pieux est donc située en milieu saturé en permanence.

Le dimensionnement purement géotechnique de la fondation a été établi à 46 pieux d'une longueur de 18 à 42 m (moyenne 28 m), la fondation de référence comprenant donc 8 pieux de 1,2 m de diamètre sur 2 rangées, espacés de 3,6 m dans les 2 directions [37]. La semelle de béton surmontant les pieux mesure 14 m de long, 6,2 m de large et 1,15 m d'épaisseur.

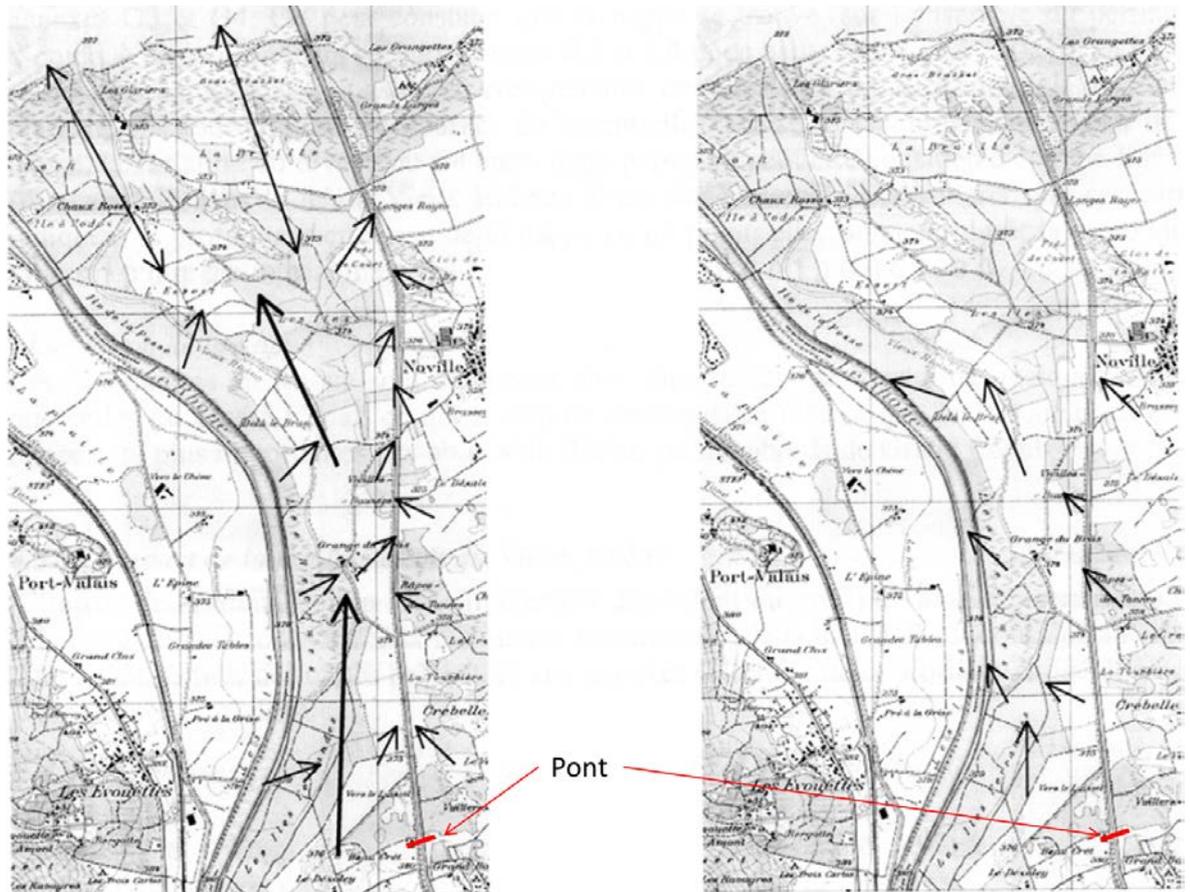


Figure 4-1 Schéma de l'écoulement des eaux souterraines, à gauche pour les périodes de hautes eaux, à droite pour les périodes de basses eaux (de [38], repris de [40]).

#### 4.1.2 Contexte météorologique

Afin de compléter les estimations du potentiel d'exploitation du sous-sol dans cette zone, il est nécessaire d'évaluer les besoins côté tablier, et donc d'estimer l'énergie nécessaire au chauffage du tablier sur un hiver pour la région. Nous avons pour cela appliqué les formules présentées à la section 2.3.1 aux données climatiques collectées auprès de MétéoSuisse pour sa station d'Aigle, située elle aussi en basse vallée du Rhône. Les données collectées sur les vingt dernières années sont utilisées afin d'évaluer la demande moyenne et la demande de pic, soit les valeurs utiles pour les calculs à long terme et pour dimensionner la réserve de fonctionnement du système.

Les détails des calculs sont présentés en annexe. On en présente les conclusions dans le Tableau 4-1. On retiendra de ceux-ci l'importance relativement faible de la fonte de neige dans la demande en énergie, et le fort potentiel de variations. Une année particulièrement froide et neigeuse (ici, 2004) se traduit par des valeurs typiques déjà utilisées dans des régions plus froides ( $100 \text{ kWh/m}^2$ ), alors que l'hiver moyen est relativement doux (seulement 21 % de temps de gel sur 5 mois, avec en moyenne  $-2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) et ne demande que moins de la moitié de cette valeur. Cette variabilité rend nécessaire de quantifier séparément les années les plus froides afin de déterminer une valeur de dimensionnement plus à même d'absorber un hiver exceptionnellement froid sans dépassement du système trop long. Sur les 5 années les plus froides parmi les 20 dernières, on arrive alors à  $74 \text{ kWh/m}^2$  ou  $21 \text{ W/m}^2$ .

Tableau 4-1 Demande énergétique en basse vallée du Rhône (station d'Aigle).

Paramètre	Énergie liée au gel [kWh/m <sup>2</sup> ]	Énergie liée à la fonte de neige [kWh/m <sup>2</sup> ]	Énergie totale [kWh/m <sup>2</sup> ]	Puissance moyenne [W/m <sup>2</sup> ]
Valeur moyenne	40,90	2,77	43,67	12,1
Valeur maximale	98,02	7,44	105,46	29,3
Valeur moyenne des 5 années froides	68,65	5,27	73,93	20,6

## 4.2 Variante étudiée

On souhaite étudier dans cette section la réponse thermo-hydro-mécanique d'une fondation énergétique de pont. Il est donc nécessaire pour ce faire de travailler sur deux plans par rapport à la fondation réelle, conçue du seul point de vue géotechnique. Le premier aspect est d'inclure les connaissances acquises sur le fonctionnement d'une fondation énergétique de bâtiment dans la conception, le second aspect est de simplifier les conditions géologiques pour ne représenter qu'une des six fondations.

### 4.2.1 Modifications de conception

En fonction des données de ce pont, une variante tenant compte des caractéristiques des pieux énergétiques est imaginée pour la réalisation d'une simulation. Le premier point relevé dans la fondation réelle par rapport aux fondations énergétiques est le fort taux de bétonnage de la zone : les pieux sont proches et d'un grand diamètre. Un pieu de grand diamètre permet l'inclusion de plusieurs boucles de tube échangeur de chaleur, mais cet échange n'est efficace que si un grand volume de sol peut être exploité par le pieu échangeur. Ne souhaitant pas changer la taille de la semelle, induite par le reste de la conception des piles et du pont, on décide donc de réduire le diamètre du pieu et d'augmenter sa longueur, favorisant donc l'accès à un plus grand volume de sol pour l'échange de chaleur, tout en limitant un peu l'interaction thermique entre les pieux. On choisit de simuler la fondation la plus sollicitée, qui utilise des pieux de 42 m de long. En supposant le cas extrême d'un pieu flottant, la diminution de la surface de frottement, et donc de la portance, liée à la réduction de diamètre est de 16 %. On augmente donc la longueur dans les mêmes proportions pour retrouver la portance initiale, soit 48 m de long.

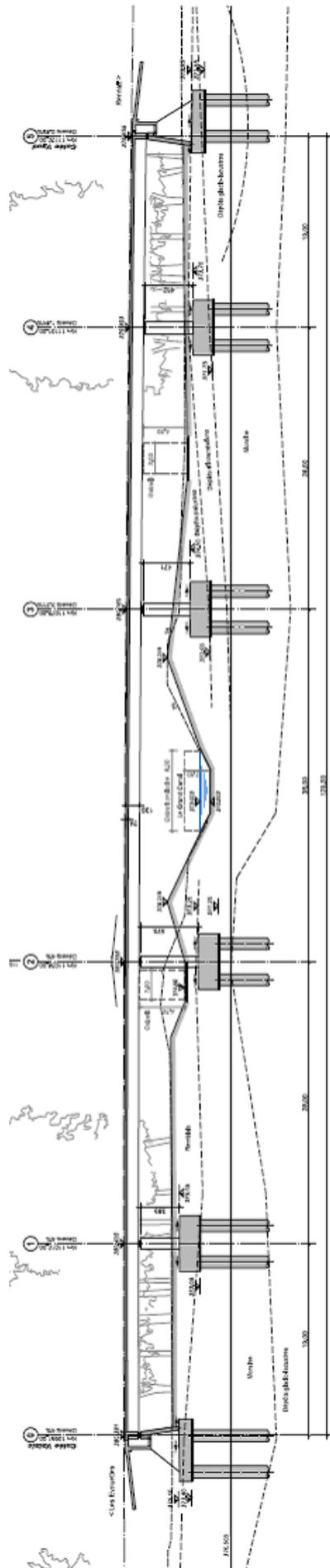


Figure 4-2 Profil en long du pont sur le Grand Canal, échelles horizontale et verticale identiques. Image Conus & Bignens [37].



## 4.2.2 Représentation géologique

On a indiqué à la section 4.1 les différents types de sols rencontrés lors des forages. Si on élimine les forages 1 (culée droite) et 7 (forage additionnel) qui diffèrent nettement des cinq autres, on peut dessiner une coupe représentative de la situation géologique générale de la fondation de ce pont. On choisit donc la simplification suivante pour ne retenir que les sols situés au niveau et en-dessous de la semelle (pas de remblais) :

- Une couche de 5,7 m de moraine frontale, entre les côtes 0 et -5,7
- Une couche de 7 m de dépôts glacio-lacustres grossiers, entre les côtes -5,7 et -12,7
- La couche de base de dépôts glacio-lacustres fins, entre les côtes -12,7 et -80.

On s'est ensuite appuyé sur les travaux de Parriaux et Nicoud [41] concernant les caractéristiques hydrologiques des formations glaciaires du contexte nord-alpin. Pour la moraine frontale, ceux-ci observent des conductivités hydrauliques moyennes à élevées ( $10^{-4}$  à  $10^{-5}$  m/s) mais diminuées par de fréquentes non-continuités. On a donc choisi pour cette couche une conductivité hydraulique de  $3,5 \times 10^{-6}$  m/s. La porosité peut varier entre 15 et 25 %.

La couche de dépôts glacio-lacustres grossiers, typique des vallées alpines, est identifiée dans [41] comme la principale couche aquifère, avec la plus forte perméabilité. Les conductivités hydrauliques observées sont entre  $10^{-3}$  et  $10^{-4}$  m/s, et on choisit ici une valeur intermédiaire de  $3,5 \times 10^{-4}$  m/s. La porosité peut varier entre 15 et 30 %.

La couche de dépôts glacio-lacustres fins n'est pas directement étudiée dans [41], aussi on se basera sur les caractéristiques connues de ce type de matériaux sédimentaires, qui présentent une faible porosité et une faible conductivité hydraulique, que l'on établit pour cette étude à  $4 \times 10^{-5}$  m/s. La porosité de ces matériaux fins est généralement inférieure à 15 %.

## 4.3 Modèle éléments finis

### 4.3.1 Géométrie et maillage

On a établi dans les sections précédentes les caractéristiques de la fondation à modéliser, tant des points de vue hydro-géologiques que technologiques. On a donc une fondation de pile de pont, avec une semelle épaisse reposant sur 8 pieux de 1 m de diamètre et 48 m de profondeur. En raison du nombre de degrés de liberté par nœud (5 :  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $p_i$ ,  $T$ ), de la géométrie tridimensionnelle du modèle et des limitations en termes de puissance de calcul, il est apparu nécessaire de simplifier la géométrie circulaire des 4 pieux afin de contrôler le nombre de nœuds. Suite à l'expérience acquise lors de la simulation présentée à la section 3, la longueur totale dans la direction de l'écoulement a été réduite à 240 m. En revanche, l'énergie échangée par 4 pieux nécessite une augmentation des dimensions à proximité de la fondation, à 40 m.

On utilise un maillage géométriquement structuré dans toutes les directions. On fait usage des propriétés de symétrie dans la représentation du problème, ce qui ici signifie la simulation de quatre des huit pieux de la fondation. Les éléments de type hexaèdre linéaire à 8 points d'intégration sont au nombre de 21060, pour 23760 nœuds. On utilise comme à la section 3 le code de calcul aux éléments finis *Lagamine* [32]. Ce maillage est représenté à la Figure 4-5, sur laquelle on distingue le contour des quatre pieux et leur longueur. Enfin à la Figure 4-6 sont représentés les points qui seront utilisés à la section 4.4 pour la représentation des variables au cours du calcul.

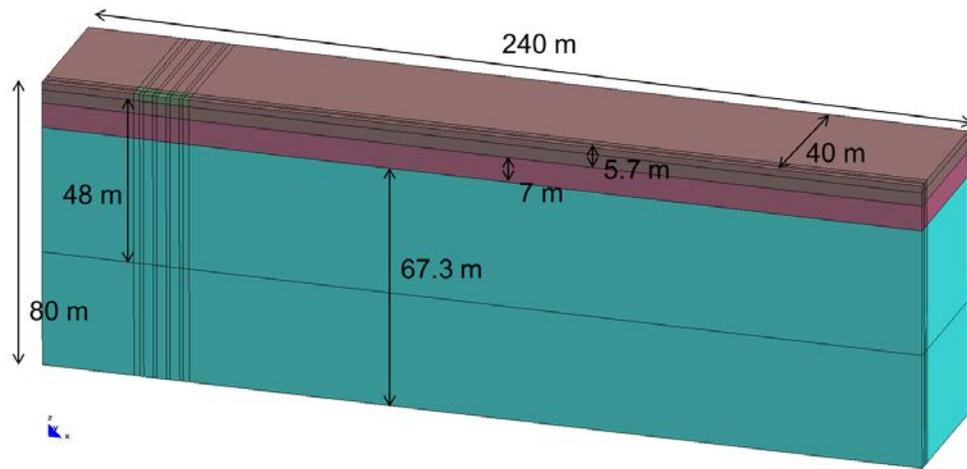


Figure 4-4 Géométrie du modèle de fondation de pont, avec les dimensions principales.

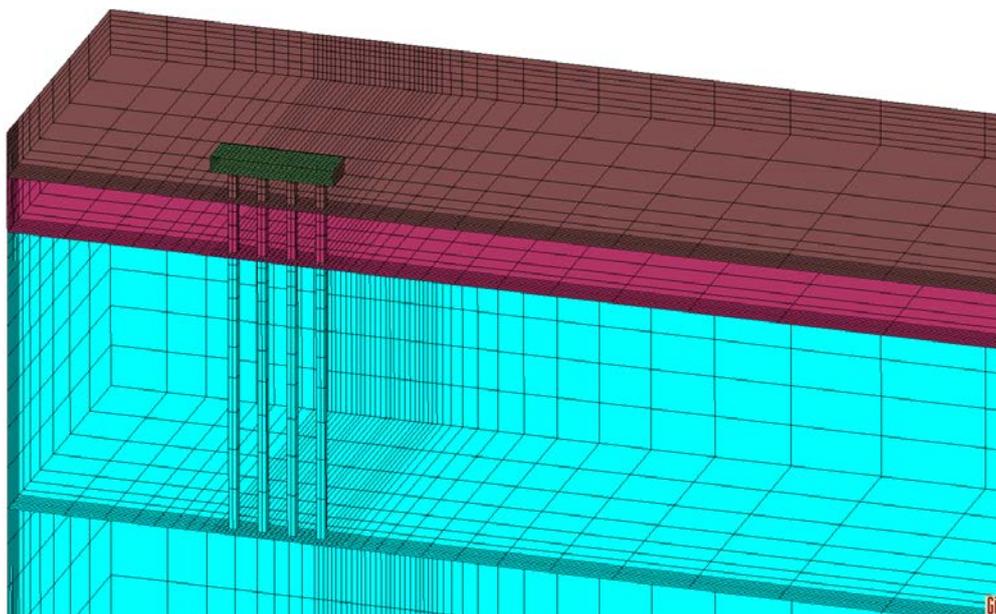


Figure 4-5 Vue du maillage par transparence.

### 4.3.2 Conditions aux limites

On considère des conditions de température constantes sur les faces inférieure, amont, aval et latérale arrière, et des conditions adiabatiques sur la face supérieure, ainsi que par symétrie sur la face latérale avant. Ces conditions ne tiennent pas compte des variations de température naturelles de l'aquifère (qui sont négligées en raison du caractère drainant du canal, voir section 4.1.1), ni de celles de la surface du sol, qui sont négligées en raison de l'importante longueur des pieux par rapport à la zone d'hétérothermie. Sur le plan mécanique, les faces latérales sont bloquées dans la direction  $y$ , la face inférieure l'est dans la direction  $z$ , et les faces amont et aval dans la direction  $x$ . La face supérieure est libre. Du point de vue hydraulique, on applique des conditions aux limites d'étanchéité sur les faces latérales, inférieure et supérieure. Afin de représenter un écoulement souterrain, on impose un gradient de pression entre les faces amont et aval, qui vient s'ajouter à la pression hydrostatique et donc entrainer un écoulement à travers le modèle, dépendant des conditions dans chaque couche.

Ce gradient est de 20 kPa, ou encore une différence de charge hydraulique de 2 m correspondant à une pente réelle de 0,8 %. En première approximation, cela correspond pour la couche 1 à une vitesse d'écoulement de 0,25 cm/j, pour la couche 2 à 0,25 m/j et enfin pour la couche 3 à 0,03 m/j. Comme à la section 3, on doit s'assurer que l'écoulement sortant se fait à la température naturelle du milieu. En fonction des observa-

tions sur la distance nécessaire à la dissipation de la température dans le modèle, il est estimé qu'une distance supérieure à deux ans d'écoulement suffit, soit ici environ 200 m à l'aval de la fondation.

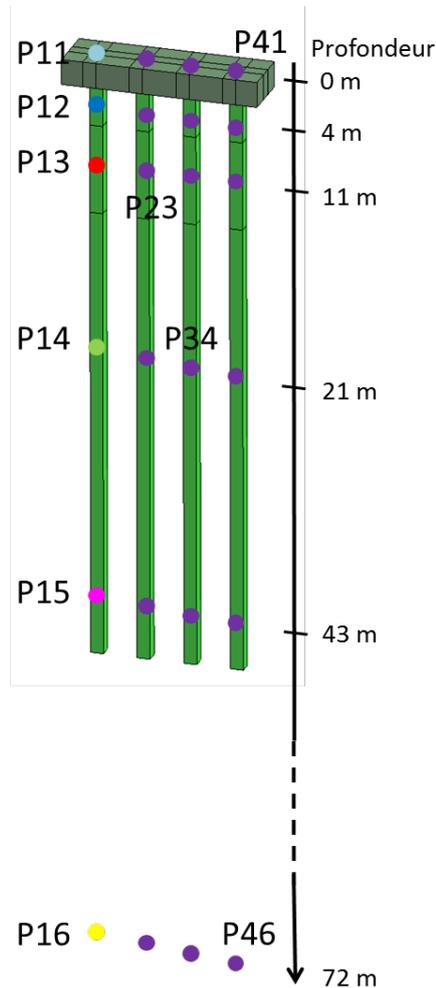


Figure 4-6 Représentation des pieux et des points de mesure de variables.

#### 4.3.3 Conditions initiales

On considère initialement un massif de sol chargé par gravité, avec un coefficient des terres au repos de 1. Lors d'une première étape de calcul, on applique une hausse du niveau de nappe à l'amont du modèle afin de créer un écoulement. On laisse un régime permanent s'établir. Cet écoulement se fait donc dans la grande direction du modèle. On applique aussi dans cette étape une charge mécanique en tête de pieu. Elle s'élève à 28 MN, répartie également sur la surface de la semelle. Les déplacements à l'issue de cette initialisation sont par la suite pris comme référence zéro. D'un point de vue thermique, on prend comme température initiale une valeur de 11 °C typique de celle observée dans cette zone.

#### 4.3.4 Caractéristiques des matériaux

La formulation thermo-hydro-mécanique utilisée dans cette simulation est identique à celle présentée à la section 3.3. On présente donc dans cette section les paramètres utilisés. Quatre matériaux sont considérés ici, le béton et les trois types de sols rencontrés. Les paramètres mécaniques, thermiques et hydrauliques des deux matériaux sont présentés au Tableau 4-2, et sont estimés par rapport aux études citées à la section 4.2.2.

Tableau 4-2 Paramètres matériaux.

Paramètre	Moraine	Dépôts gros-siers	Dépôts fins	Béton
Porosité [-]	0,17	0,34	0,11	0,12
Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	2351	2122	2424	2408
Conductivité hydraulique à 20°C [m/s]	3,5×10 <sup>-6</sup>	3,5×10 <sup>-4</sup>	4×10 <sup>-5</sup>	9×10 <sup>-9</sup>
Conductivité thermique [W/(m.K)]	2,44	1,59	2,02	1,56
Capacité thermique [J/(kg.K)]	1132	1427	1102	1045
Coefficient volumique de dilatation thermique [K <sup>-1</sup> ]	3,6×10 <sup>-5</sup>	3,6×10 <sup>-5</sup>	3,6×10 <sup>-5</sup>	3,6×10 <sup>-5</sup>
Module d'Young [MPa]	20	35	34	3500
Coefficient de Poisson [-]	0,3	0,3	0,3	0,2

#### 4.3.5 Chemin de chargement

Suite à l'étude du comportement THM d'un pieu isolé, et en fonction des spécificités du site considéré, les scénarios d'exploitation ont été réduits au nombre de deux. On envisage dans un premier cas la présence d'un écoulement imposé par gradient de pression, donc dont la vitesse diffère entre les couches. Pour ce cas, le scénario d'exploitation considéré est la recharge géothermique. Dans le deuxième cas, aucun écoulement naturel n'est imposé, et on envisage une recharge thermique solaire.

L'échange de chaleur entre le pieu et le sol est imposé en contrôlant le pieu comme une source ou puits de chaleur de façon homogène sur son volume. Les profils d'exploitation sont identiques à ceux de la Figure 3-2. On utilise pour la détermination de la puissance maximale admissible le même principe qu'à la section 3, c'est-à-dire la recherche de la puissance maximale n'entraînant pas de gel dans le domaine. Les simulations sont effectuées sur 4 ans.

### 4.4 Résultats

#### 4.4.1 Cas 1 : Ecoulement souterrain et recharge géothermique

Après itération, la PMD obtenue pour cette configuration s'établit à 37 W/m. On note tout d'abord que cette valeur est inférieure à la plus petite valeur obtenue pour un pieu isolé, et ce malgré la relaxation du critère de dimensionnement à 0°C. L'explication de cette baisse provient d'une part des conditions de sol, la majeure partie du pieu se trouvant dans un sol avec une vitesse d'écoulement faible ; ainsi que par la géométrie de la fondation et la grande proximité des pieux entre eux. Ces deux effets sont mis en évidence par une vue générale du champ de température, représenté à la Figure 4-7.

L'effet qu'a l'écoulement à vitesse relativement élevée (0,25 m/j) dans les dépôts grossiers est évident sur cette vue : dans cette couche, la bulle de froid est entraînée loin de la fondation. On distingue aussi la bulle résiduelle de l'année précédente. La conduction avec les couches voisines contribue aussi à limiter la baisse de température, ce qui est visible dans la couche de moraine (haut) et dans les cinq premiers mètres de la couche de dépôts fins. Plus bas, on retrouve une situation très proche du cas 2 pour le pieu isolé (section 3.5.2). La bulle de froid est déplacée vers l'aval, mais de façon insuffisante pour

qu'elle n'influence pas l'extraction l'année suivante. Cela est visible sur la Figure 4-8 qui montre l'évolution dans le temps de la température dans un pieu. Le point P12 est au niveau de la moraine, P13 au niveau des dépôts grossiers et P14 et P15 sont au niveau des dépôts fins (voir Figure 4-6). On retrouve cette fois dans un même pieu différents régimes thermiques : plateau pour la zone bien rechargée, et pic pour les autres endroits, avec une différence mesurable de la température fonction de l'éloignement de la couche perméable. On représente aussi à la Figure 4-9 l'effet de l'écoulement rencontrant successivement les quatre pieux. On constate que dès le pieu 2, on n'atteint plus de plateau de température mais un régime en pic, qui traduit le fait que le flux d'eau arrivant sur ce pieu, refroidi par son passage autour du pieu 1, n'est pas capable en régime permanent d'échanger avec le pieu la totalité de l'énergie demandée. Cela se traduit par une diminution continue de la température durant la phase d'extraction. Il en va de même bien sûr pour les 2 derniers points, chacun étant plus froid que le précédent.

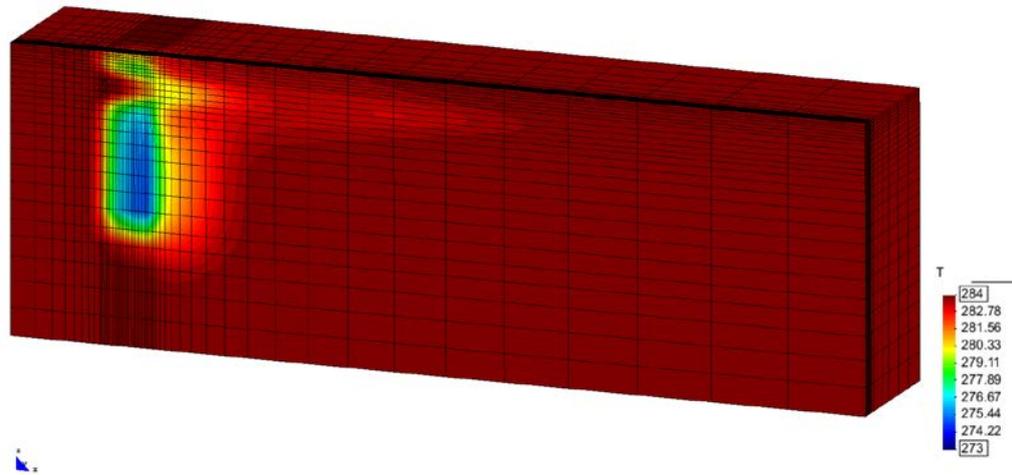


Figure 4-7 Vue générale du champ de température dans le modèle au mois 16 (fin de la deuxième période d'extraction).

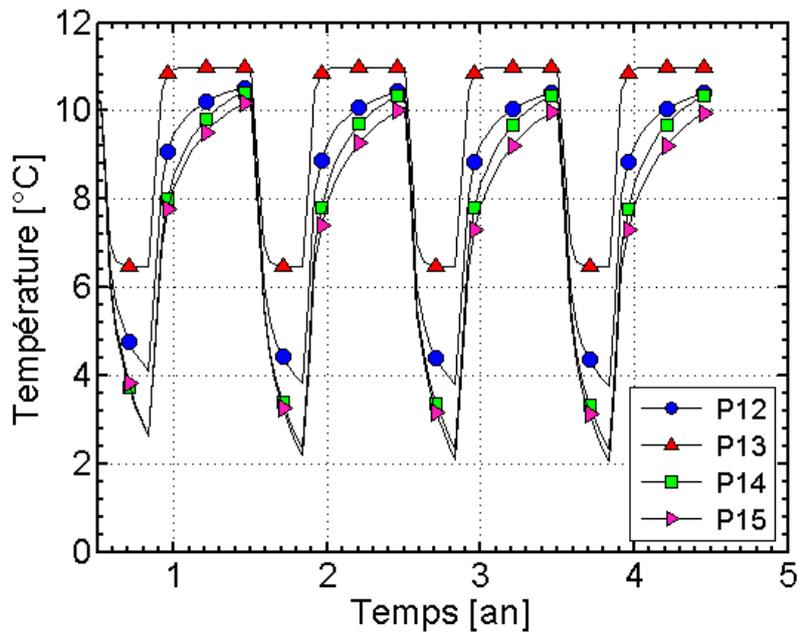


Figure 4-8 Evolution de la température dans le pieu 1 pour 4 points à différentes profondeurs.

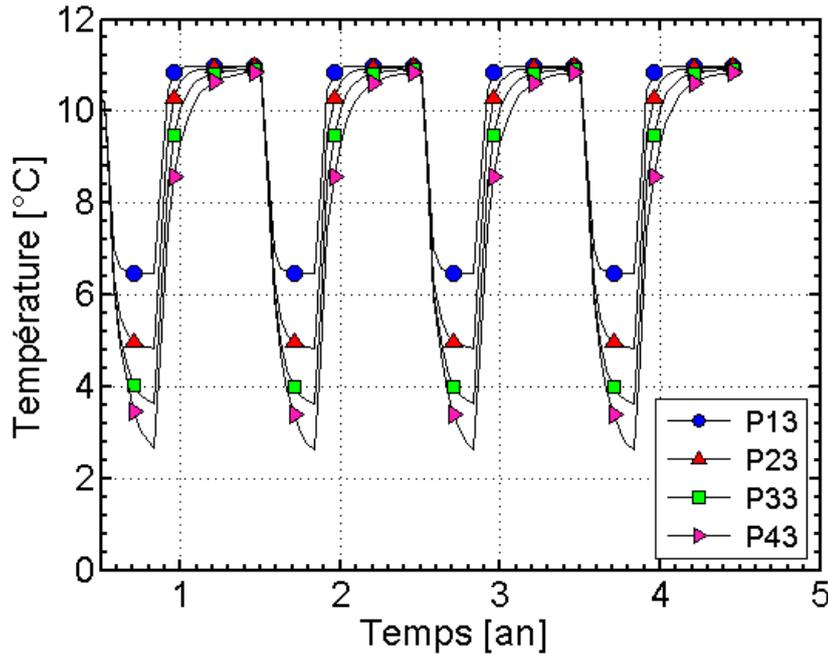


Figure 4-9 Evolution de la température dans les quatre pieux au niveau des dépôts grossiers.

On s'intéresse ensuite au comportement mécanique de la fondation : évolution des contraintes dans les pieux, déplacements de la semelle. On représente sur la Figure 4-10 les profils de contrainte de l'ensemble des quatre pieux considérés, de façon à mettre en évidence les différences entre eux, liées soit à leur position, soit à leur charge, soit aux variations de température qu'ils subissent. Plusieurs éléments sont à analyser : on remarque tout d'abord une différence dans la charge reçue par les pieux, ceux à l'extérieur (1 et 4) se retrouvant plus chargés car étant sur le bord du groupe de pieux. En revanche l'amplitude du changement de contrainte (en extension car refroidit le pieu) est tout à fait comparable entre les pieux. On note que cette amplitude est comparativement faible dans la moraine, évolue à la hausse rapidement dans les dépôts grossiers, diminue légèrement au début des dépôts fins avant de culminer vers le bas du pieu. Ces effets sont dus aux interactions thermo-mécaniques, en particulier du fait de la forte non-uniformité de la température du pieu dans les 15 premiers mètres. Il se dégage malgré cela une tendance très nette, avec des changements de contraintes nettement plus marqués que pour le pieu isolé. Cela est attendu du fait de la présence d'une semelle qui rigidifie l'ensemble des pieux. Ceux-ci se déplaçant comme un groupe de pieux, l'effet reste tout de même limité à 72 kPa/°C, soit environ 5 fois ce qui est observé sur un pieu isolé. Le risque principal visible sur cette figure reste cependant la forte diminution de la contrainte dans le bas du pieu, qui amène à un état très proche de la tension (-0,1 MPa), ce qui peut compromettre la stabilité structurelle du pieu, en particulier dans les cas où le bas du pieu n'est pas armé. Il apparaît donc nécessaire d'armer le pieu entièrement, tout particulièrement dans le cas de pieux flottants (ce qui n'est pas le cas ici).

On relève aussi sur ces figures l'état en fin de recharge géothermique. Le pieu 1 et le pieu 2 reviennent à un état de contraintes très proche de leur état initial, mais ce n'est pas le cas des pieux 3 et plus nettement 4. Cela est lié à l'évacuation lente de la bulle de froid dans la plus grande partie du massif qui interdit un retour parfait à la température naturelle dans l'ensemble, et cela affecte naturellement plus les pieux à l'aval. Pour compléter cette analyse spatiale, on montre à la Figure 4-11 l'évolution temporelle de la contrainte induite par l'échange de chaleur. Les pics correspondent à l'analyse déjà faite mais on observe que les interactions entre pieux (évolution différenciée des températures) ont pour conséquence de décorrélérer l'évolution de la contrainte et l'évolution de la température pour le pieu 1 : le pic d'extension est atteint très vite alors que les températures continuent de diminuer.

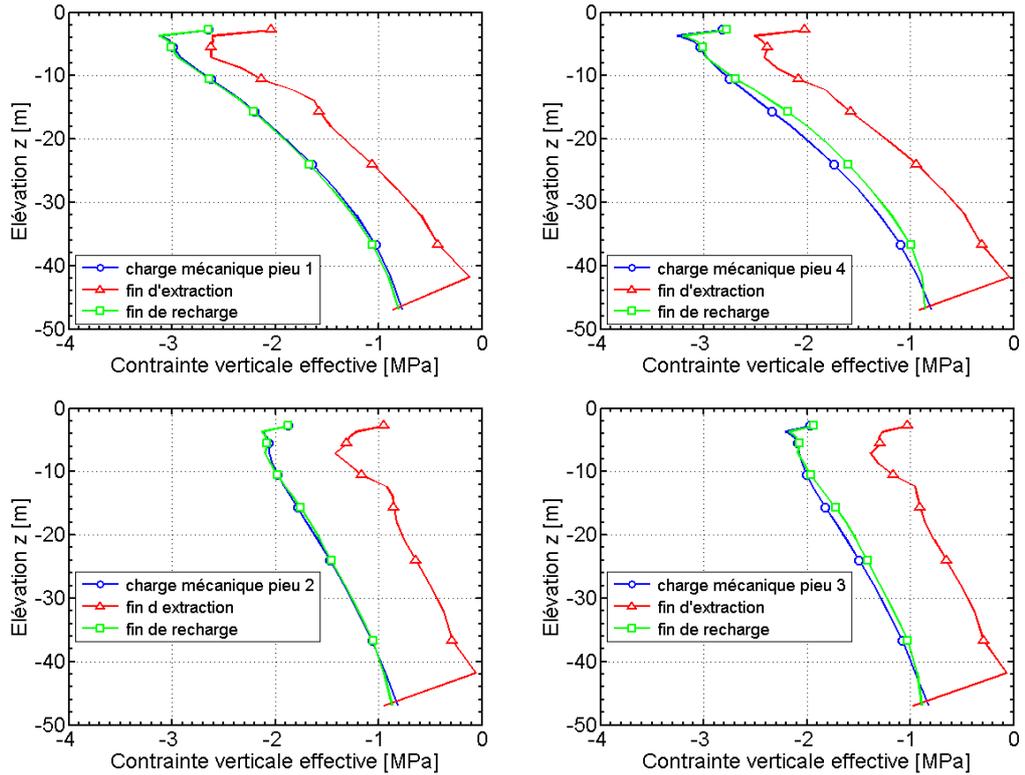


Figure 4-10 Profils de contrainte verticale effective dans les quatre pieux, aux instants correspondant à la fin du chargement hydro-mécanique, à la fin de l'extraction et à la fin de la recharge.

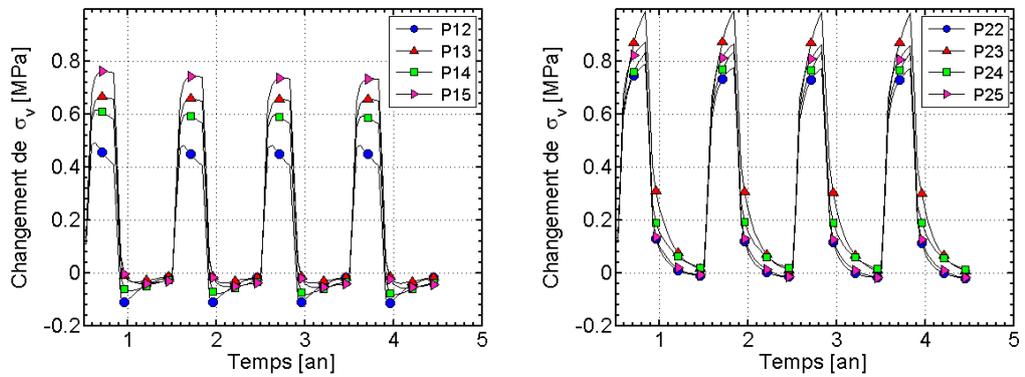


Figure 4-11 Evolution de la contrainte verticale (par rapport à la contrainte après chargement mécanique) pendant les cycles thermiques, en 4 points du pieu 1 et du pieu 2.

On termine cette analyse des aspects couplés THM par un point important pour la stabilité de l'ouvrage, les déplacements de la semelle. Ceux-ci sont représentés à la Figure 4-12. On constate qu'ils restent d'une très faible amplitude, mais on note cependant une légère inclinaison de la semelle dans la direction de l'écoulement. Ni l'amplitude ni ce dernier point ne sont de nature à dépasser les exigences de service.

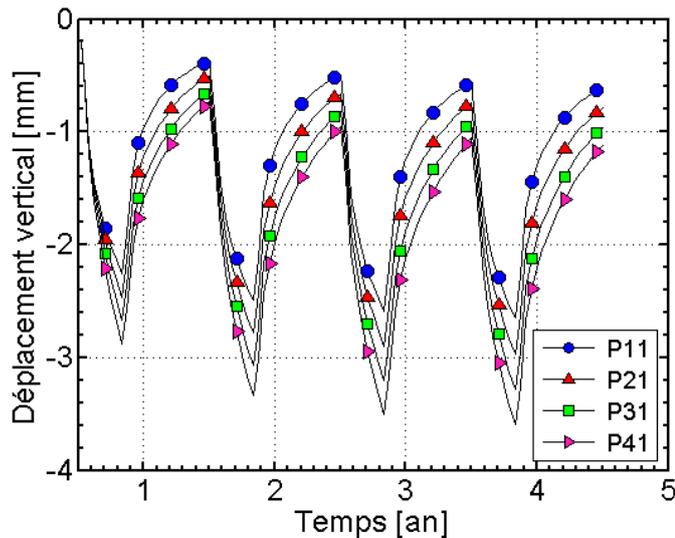


Figure 4-12 Evolution des déplacements de la semelle au cours du temps.

#### 4.4.2 Cas 2 : Pas d'écoulement et recharge solaire

On a pour ce cas établi une PMD de 53 W/m, à comparer aux 37 W/m du cas 1, soit une augmentation de 43 % du potentiel d'exploitation hivernal, ce qui est une amélioration très supérieure à celle obtenue pour le pieu isolé. La puissance d'injection nécessaire dans ce cas est de 55 W/m, ce qui est très proche de la PMD. On montre sur les figures 4-13 et 4-14 les champs de température dans la zone proche de la fondation en fin de période d'extraction, respectivement d'injection. On observe une forte homogénéité de températures dans les deux cas dans la zone, ce qui démontre que les pieux échangeurs interagissent fortement entre eux. C'est la principale raison de la légère hausse de la PMD par rapport au pieu isolé. Cette valeur est néanmoins largement inférieure aux possibilités d'échange thermique offerte par un pieu énergétique, qui pourraient être atteinte si l'espacement était plus important.

On représente sur la Figure 4-15 l'évolution de la température à quatre endroits du pieu 1. Par rapport au cas 1, on a une grande homogénéité aussi dans cette direction. On remarque tout de même que les températures extrêmes sont atteintes à P13, donc au niveau de la couche la moins conductrice de chaleur.

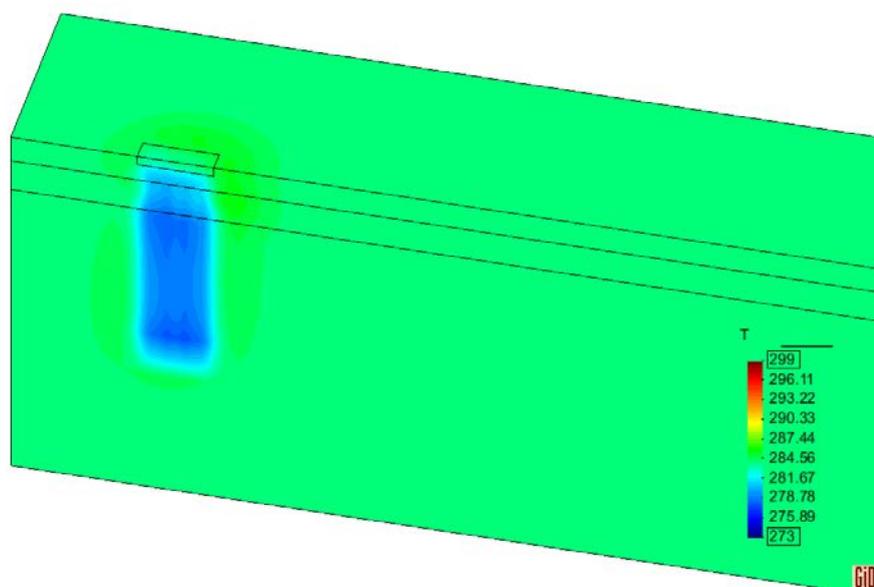


Figure 4-13 Vue générale du champ de température dans le modèle à la fin de la deuxième période d'extraction.

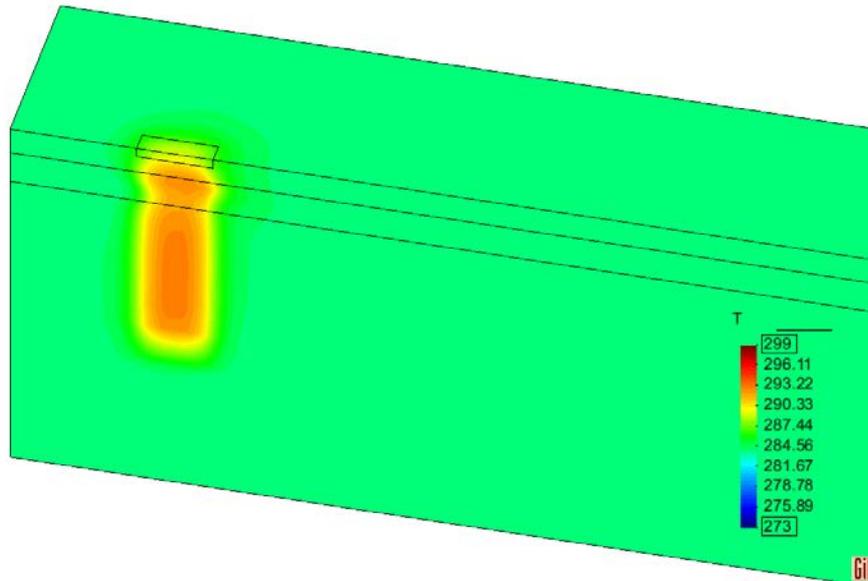


Figure 4-14 Vue générale du champ de température dans le modèle à la fin de la deuxième période d'injection.

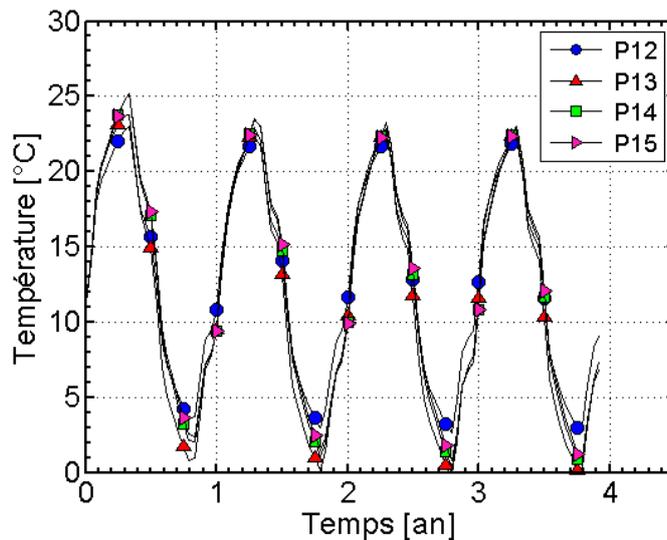


Figure 4-15 Evolution de la température dans le pieu 1 pour 4 points à différentes profondeurs.

On souhaite donc face à ces résultats évaluer l'efficacité du stockage d'énergie solaire, c'est-à-dire quelle proportion de l'énergie emmagasinée en été parvient à être restituée en hiver. On va pour cela d'une part comparer les températures du cas 2 avec celles du cas 1, en prenant l'exemple du pieu 1 (Figure 4-16), et d'autre part observer l'évolution de la température dans une coupe du modèle (Figure 4-17). On constate alors deux points principaux : on retrouve comme pour le pieu isolé, mais de manière plus limitée, une forte baisse de température avant le début de l'extraction de chaleur (environ 8 °C). Mais on remarque sur la coupe que cette perte est moindre pour les pieux 2 et 3. En moyenne sur le massif de sol, on passe d'une température de 23 °C à 18 °C, ce qui reste médiocre s'agissant d'un dispositif de stockage de chaleur (perte de plus de 40 % en considérant comme référence un massif à 11°C), mais est bien meilleur que pour un pieu isolé. Cette valeur n'est que légèrement supérieure aux pertes admises lors de la conception du projet SERSO, soit 35 % [27].

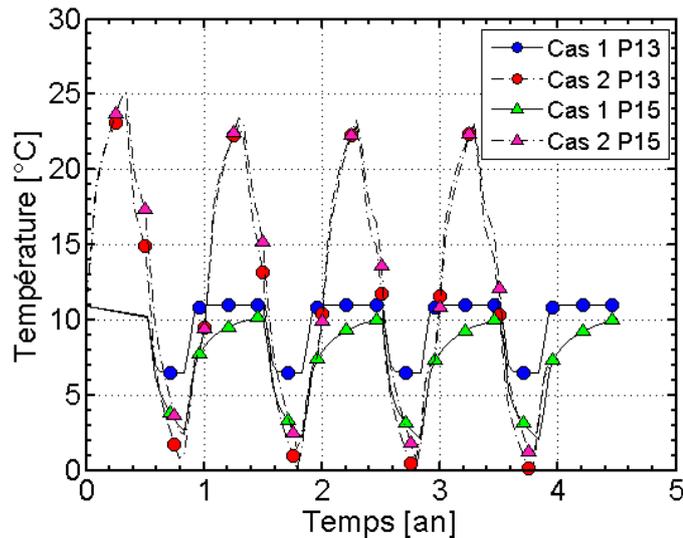


Figure 4-16 Comparaison des cas 1 et 2, évolution de la température en 2 points du pieu 1 au cours du temps.

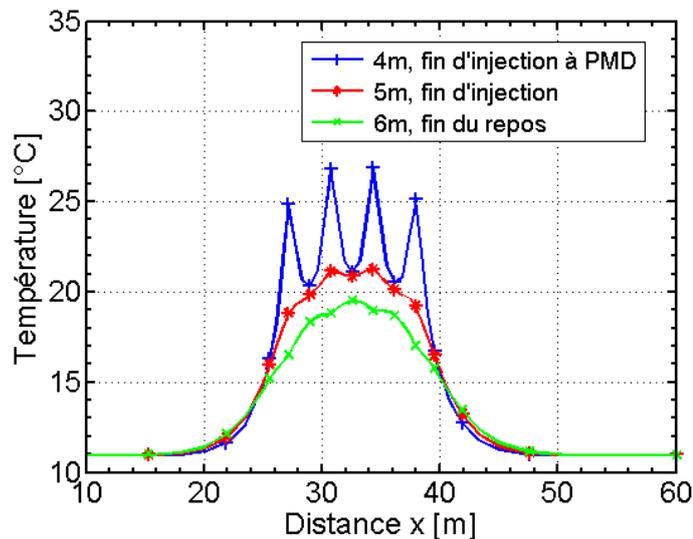


Figure 4-17 Profil de température selon l'axe X, à une profondeur de 21 m, à 3 temps en fin d'injection de chaleur.

On s'intéresse finalement au comportement thermo-mécanique de la fondation. Comme pour le cas 1, on représente d'une part l'évolution des contraintes induites par le changement de température (Figure 4-18), d'autre part les déplacements de la semelle (Figure 4-19). L'homogénéité du champ de température a deux effets : on peut exploiter pour chaque pieu un peu plus de différentiel de température, ce qui entraîne une hausse de la contrainte induite maximale, qui passe de 1 à 1,2 MPa. Le deuxième effet, non visible ici, est que les quatre pieux subissent des contraintes induites par la température extrêmement similaires, alors qu'elles se différencient nettement dans le cas 1. Les déplacements de la semelle sont eux aussi très homogènes : aucun basculement ni flexion n'est observé. L'amplitude totale est de 6,5 mm, ce qui est dans les limites admissibles.

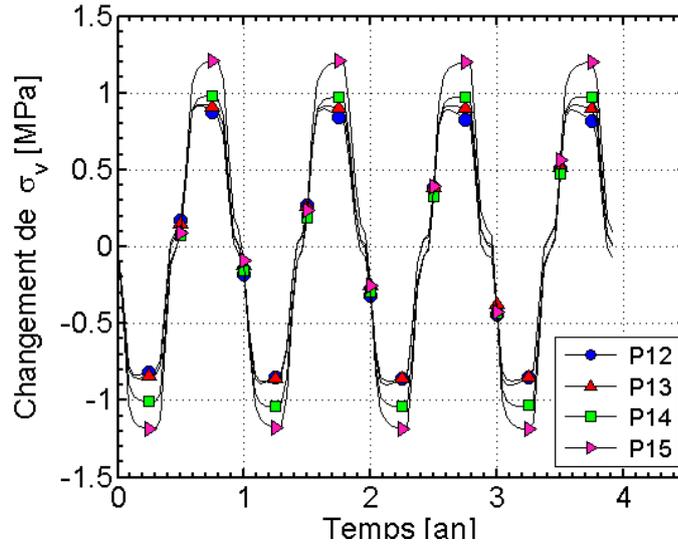


Figure 4-18 Evolution au cours du temps des contraintes induites par la température dans le pieu 1.

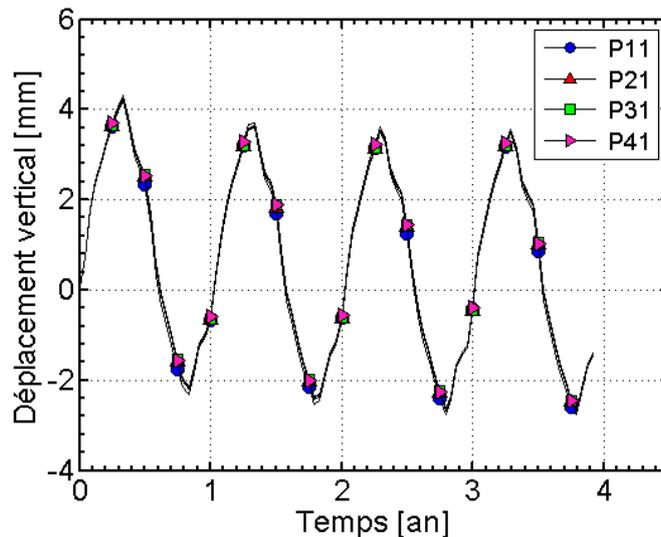


Figure 4-19 Evolution au cours du temps des déplacements de la semelle.

## 4.5 Conclusions

Une variante d'un pont récemment réalisé en Suisse est étudiée : on simule le remplacement des pieux standard réalisés pour le pont sur le Grand Canal par des pieux énergétiques permettant un fonctionnement soit en mode de recharge géothermique, soit en mode de recharge par apport estival d'énergie solaire. Après un redimensionnement pour tenir compte des besoins en énergie, on simule le comportement thermo-hydro-mécanique de l'ouvrage dans des conditions soit avec écoulement souterrain, soit sans. Ces simulations avec comportement thermo-élastique des matériaux mettent en évidence à la fois l'efficacité énergétique que l'on peut attendre de l'ouvrage et son comportement en termes mécaniques, contraintes et déformation induites par la différence de température.

Quantitativement parlant, la gamme de performances d'une telle fondation est inférieure au potentiel observé sur un pieu isolé. Dans le cas 1, avec une PMD linéique de 37 W/m, on obtient 106 kWh/m de pieu, soit une capacité de chauffage d'environ 1,4 m<sup>2</sup>/m de pieu. Dans le cas 2, on culmine à 152 kWh/m de pieu soit environ 2 m<sup>2</sup>/m de pieu, ce qui est plus efficace au niveau de la construction, mais avec de fortes pertes énergétiques, dont l'importance dépend de la source d'énergie extérieure nécessaire au captage de

l'énergie solaire.

Pour le pont du Grand Canal, qui présente dès le départ un rapport entre surface de tablier et longueur cumulée des pieux proche de  $1 \text{ m}^2/\text{m}$ , on constate que le surdimensionnement en longueur de pieu proposé par la variante n'est pas forcément nécessaire, en raison du climat relativement doux du site. Un essai de réponse thermique permettrait de valider les valeurs choisies pour la conductivité thermique des sols et serait nécessaire pour le dimensionnement d'un projet réel. Les ratios de dimensionnement calculés dans cette étude sont dépendants d'une grande variété de facteurs (conductivité thermique des sols, nature de l'écoulement souterrain...), et un enseignement principal de cette dernière partie du projet est de montrer la possibilité qui est maintenant offerte aux ingénieurs de réaliser relativement facilement une étude similaire avec des outils éléments finis, des codes commerciaux offrant les mêmes possibilités que celles montrées ici.

## 5 Conclusions générales

L'objectif de ce projet est d'évaluer le potentiel d'utilisation des géostructures énergétiques dans la régulation thermique des routes. Pour ce faire, deux aspects principaux ont été analysés : la faisabilité technologique, et la capacité à dimensionner de façon conjointe les aspects thermique et géotechnique du problème. Dans la première partie, l'historique des projets hydroniques de régulation thermiques des routes, en particulier des ponts a été effectué, avec une insistance particulière sur les solutions technologiques choisies (matériau de l'échangeur noyé, source thermique, choix d'une pompe à chaleur ou non...), et sur le dimensionnement thermique côté route.

Parmi le peu d'ouvrages existants, on peut dire que pas deux n'ont utilisé la même technologie. Les développements récents en techniques routières semblent cependant indiquer que la voie la plus prometteuse, tant pour le coût que pour la mise en œuvre, est l'utilisation de tubes PEX noyés dans un béton bitumineux coulé à basse température. Ce type d'enrobé est cependant réservé au réseau secondaire ; les sollicitations d'un réseau autoroutier ne permettent donc que l'usage de tubes métalliques. Pour tous les ouvrages, la durabilité reste un point d'interrogation. Il est noté que pour bénéficier complètement des bénéfices de la suppression localisée du salage, la zone chauffée doit s'étendre des deux côtés des points sensibles, avec une information adaptée pour le service hivernal.

Pour ce qui concerne le dimensionnement énergétique en chaussée, les méthodes sont par contre anciennes et largement validées, et même intégrées à des outils de dimensionnement. Elles ont permis la validation de critères de calcul pour la suite du projet, en fonction de paramètres climatiques disponibles auprès de MétéoSuisse.

Ces deux points mis en place, le reste du travail s'est focalisé sur l'aspect géostructurel du problème. La seconde partie du travail a mis en évidence le comportement thermo-hydro-mécanique d'un pieu énergétique isolé, ce qui permet de mettre celui-ci en parallèle avec les connaissances acquises sur les sondes géothermiques.

Enfin la troisième partie propose une variante utilisant les géostructures énergétiques pour un ouvrage récemment construit. Une démarche complète de dimensionnement est effectuée, et permet la mise en évidence des points sensibles modifiant le comportement de la fondation énergétique. Comme pour tout projet de géothermie très peu profonde (quelques dizaines de mètres), il apparaît indispensable de réaliser des essais in-situ afin de déterminer la conductivité thermique des sols rencontrés. S'ajoute ici par rapport à une fondation plus massive l'importance exacerbée de l'écoulement souterrain qu'il importe de déterminer, soit par une bonne connaissance de l'hydro-géologie locale, soit par mesures.

Le projet révèle que les longueurs usuelles de pieux pour les ouvrages de franchissement coïncident parfaitement avec celles nécessaires pour la régulation thermique des ouvrages. Des adaptations peuvent bien sûr être nécessaires, mais plus celles-ci seront faites en amont, moins elles seront coûteuses au final : par exemple une extrême compacité de la fondation devra être évitée. Une valeur de base d'1 m de pieu pour 1 m<sup>2</sup> de tablier permet de visualiser rapidement si un projet peut être adapté à la régulation par géostructures énergétiques ou non. Des critères de sécurisation, comme la nécessité d'armer les pieux sur toute leur longueur, et une évaluation des contraintes additionnelles, sont mis en évidence.

Le projet ouvre la perspective aux ingénieurs de pouvoir réaliser relativement facilement un dimensionnement thermo-hydro-mécanique de fondation énergétique de pont avec les outils de simulation disponibles. Les deux inconnues principales à ce stade sont d'une part l'écart qui subsiste entre le comportement des pieux énergétiques décrit dans ce projet par un modèle thermo-élastique et le comportement réel ; et d'autre part la problématique de la durée de vie et de la recyclabilité des chaussées avec échangeur, pour lesquels trop peu de données existent à l'heure actuelle.



## Annexes

I	Analyse des données climatiques pour la station d'Aigle .....	63
I.1	Analyse des données climatiques pour la station d'Aigle .....	63

# I Analyse des données climatiques pour la station d'Aigle

## I.1 Analyse des données climatiques pour la station d'Aigle

Année	Ratio d'heures avec T>0	Ratio d'heures avec T≤0	Moyenne des T≤0	Vitesse moyenne du vent lorsque T≤0	q <sub>h</sub> hors période de neige	T moyenne lors de chute de neige	Nombre d'heure de neige	Ratio d'heures de neige	Cadence des précipitations neigeuses	q <sub>h</sub> pendant chute de neige	q <sub>e</sub>	q <sub>m</sub>	q <sub>s</sub>	q <sub>0</sub> avec A <sub>r</sub> =1	q <sub>0</sub> avec A <sub>r</sub> =0	énergie liée au gel	énergie liée à la fonte de neige	énergie totale
Unité	[-]	[-]	[°C]	[km/h]	[W/m <sup>2</sup> ]	[°C]	[h]	[-]	[mm/h]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]
1992	80,0%	20,0%	-1,9	14	35,8	0,5	18	0,5%	0,07	0,0	2,9	6,48	-0,02	9,38	6,46	26,00	0,17	26,17
1993	87,4%	12,6%	-1,7	17	37,3	1,2	12	0,3%	0,05	0,0	3,3	4,63	-0,03	7,91	4,60	17,07	0,09	17,15
1994	86,3%	13,7%	-4,7	19	97,3	0,3	72	2,0%	0,26	3,7	3,7	24,08	-0,05	31,43	24,03	48,38	2,28	50,67
1995	75,1%	24,9%	-1,8	15	37,0	-2,7	54	1,5%	0,11	51,5	3,1	10,19	0,17	64,98	10,36	33,45	3,54	36,98
1996	80,8%	19,2%	-2	16	40,9	-1,6	66	1,8%	0,12	34,4	3,2	11,11	0,11	48,82	11,22	28,54	3,19	31,73
1997	84,5%	15,5%	-2,3	12	36,1	0,6	24	0,7%	0,24	0,0	2,5	22,22	-0,08	24,66	22,14	20,30	0,64	20,92
1998	75,7%	24,3%	-2,8	19	62,7	0	144	4,0%	0,16	9,5	3,7	14,82	0,00	28,03	14,82	55,31	4,07	59,38
1999	77,9%	22,1%	-3	16	57,3	-0,1	102	2,8%	0,1	9,8	3,2	9,26	0,01	22,29	9,27	45,99	2,27	48,26
2000	93,7%	6,3%	-1,3	16	29,5	0,4	12	0,3%	0,05	1,6	3,2	4,63	-0,01	9,46	4,62	6,74	0,10	6,85
2001	75,4%	24,6%	-3,3	16	62,2	-1,6	36	1,0%	0,16	34,4	3,2	14,82	0,15	52,56	14,96	55,58	1,91	57,49
2002	80,9%	19,1%	-2,3	19	53,2	-1,3	66	1,8%	0,13	34,2	3,7	12,04	0,10	50,05	12,14	36,89	3,27	40,16
2003	80,5%	19,5%	-1,7	17	37,3	-0,6	90	2,5%	0,08	18,7	3,3	7,41	0,03	29,41	7,44	26,41	2,67	29,08
2004	64,8%	35,2%	-3,6	19	76,7	-1,5	132	3,6%	0,17	37,4	3,7	15,74	0,15	56,96	15,89	98,02	7,44	105,46
2005	62,1%	37,9%	-2,5	18	54,4	-2,2	102	2,8%	0,09	48,9	3,5	8,33	0,11	60,93	8,45	74,82	6,19	81,01
2006	85,4%	14,6%	-2,2	13	37,9	0	0	0,0%	0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	20,10	0,00	20,10
2007	80,5%	19,5%	-1,8	12	30,3	1	12	0,3%	0,05	0,0	2,6	4,63	-0,03	7,17	4,60	21,45	0,08	21,53
2008	75,3%	24,7%	-2,3	15	43,4	0,2	114	3,1%	0,17	4,7	3,0	15,74	-0,02	23,40	15,72	38,93	2,63	41,56
2009	73,4%	26,6%	-2,4	20	57,6	-2	96	2,6%	0,11	49,7	3,9	10,19	0,13	63,88	10,31	55,65	6,03	61,68
2010	75,7%	24,3%	-2,1	22	55,5	-1,9	96	2,6%	0,11	51,2	4,2	10,19	0,12	65,67	10,31	48,92	6,20	55,12
2011	80,1%	19,9%	-3,9	19	82,3	-0,7	78	2,1%	0,09	22,5	3,7	8,33	0,04	34,48	8,37	59,47	2,63	62,10
Année moyenne	78,8%	21,2%	-2,5	16,6	51,2	-0,6	66	1,8%	0,12	20,61	3,18	10,74	0,04	34,57	10,79	40,90	2,77	43,67



## Abréviations

<b>Concept</b>	<b>Signification</b>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> (Association américaine des ingénieurs de chauffage, réfrigération et climatisation)
CEVA	Cornavin - Eaux-Vives – Annemasse (liaison ferroviaire à Genève)
COP	<i>Coefficient of performance</i> (Coefficient de performance)
DCHE	<i>Downhole Coaxial Heat Exchanger</i> (Echangeur de chaleur vertical coaxial)
OSU	<i>Oklahoma State University</i> (Université d'état de l'Oklahoma)
PEX	Polyéthylène réticulé
PMD	Puissance moyenne de dimensionnement
SERSO	<i>Solar Energy Recovery from Road Surfaces</i> (Récupération d'énergie solaire à partir des surface routières)
TEA-21	<i>Transportation Equity Act for the 21st Century</i> (Loi sur l'équité dans les transports pour le XXIe siècle)
THM	Thermo-hydro-mécanique



## Bibliographie

- [1] Li, S. et Ye, X. 2008. Study on the Bridge Surface Deicing System in Yuebei Section of Jingzhu Highway. *International Journal of Business and Management*. 3(12):116-121.
- [2] Williams, G. P. et Gould, L. W. 1977. Ground temperatures. *Canada Building Digests*. 180(F).
- [3] Sia-D0-190. 2005. Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de fondation et de soutènement en béton.
- [4] Ashrae. 1995. Snow melting, in *Heating, Ventilating and Air-Conditioning Applications*, 4, Ashrae, éditeur: Atlanta. 46.41-13.
- [5] Chapman, W. P. et Katunich, S. 1956. Heat requirements of snow melting systems. *ASHRAE Transactions*. 62:359-372.
- [6] Kilkis, I. B. 1994. Design of Embedded Snow Melting Systems: Part 1, Heat Requirements – An Overall Assessment and Recommendations. *ASHRAE Transactions*. 100(1):423-433.
- [7] Keey, R. B. 1992. *Drying of loose and particulate materials*: Hemisphere Publishing. 504 p.
- [8] Krischer, O. 1963. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*: Springer-Verlag.
- [9] Farouki, O. T. 1981. Thermal properties of soils, Monograph 81.1, CRREL.
- [10] Lund, J. W. 1999. Geothermal snow melting. *Transactions of the Geothermal Research Council*. 23:127-133.
- [11] Lee, R. C., Sackos, J. T., Nydahl, J. E. et Pell, K. M. 1984. Bridge heating using ground-source heat pipes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 962:51-56.
- [12] Spitler, J. D. et Ramamoorthy, M. 2000. Bridge Deck Deicing Using Geothermal Heat Pumps. in *Fourth International Heat Pumps in Cold Climates Conference*. Alymer, QC, Canada.
- [13] Chiasson, A. et Spitler, J. 2001. Modeling Approach to Design of a Ground-Source Heat Pump Bridge Deck Heating System. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1741(1):207-215.
- [14] Liu, X., Rees, S. J. et Spitler, J. D. 2007. Modeling snow melting on heated pavement surfaces. Part I: Model development. *Applied Thermal Engineering*. 27(5-6):1115-1124.
- [15] Liu, X., Rees, S. J. et Spitler, J. D. 2007. Modeling snow melting on heated pavement surfaces. Part II: Experimental validation. *Applied Thermal Engineering*. 27(5-6):1125-1131.
- [16] Nagai, N., Miyamoto, S., Nishiwaki, M. et Takeuchi, M. 2009. Numerical simulation of snow melting on pavement surface with heat dissipation pipe embedded. *Heat Transfer—Asian Research*. 38(5):313-329.
- [17] Morita, K. et Tago, M. 2000. Operational Characteristics of The Gaia Snow-Melting System in Ninohe, Iwate, Japan: Development of a Snow-Melting System Which Utilizes Thermal Functions of the Ground. Keynote paper in *Proceedings World Geothermal Congress 2000*. Kyushu-Tohoku, Japan.
- [18] Seo, Y., Seo, U., Eum, J. et Lee, S.-J. 2011. Development of a Geothermal Snow Melting System for Highway Overlays and Its Performance Validations. *Journal of Testing and Evaluation*. 39(4):11.
- [19] Minsk, L. D. 1999. Heated Bridge Technology: Report on ISTECA Sec. 6005 Program, FHWA-RD-99-158, Federal Highway Administration, 51 p.
- [20] Liu, X. et Spitler, J. D. 2004. Simulation Based Investigation on the Design of Hydronic Snow Melting System. in *Proceedings of the Transportation Research Board 83rd Annual Meeting*. Washington, D.C.
- [21] Oklahoma State University. Geothermal Smart Bridge. 2004; Available from: <http://www.smartbridge.okstate.edu/>.
- [22] Miyamoto, S. Visite du chantier du pont de Shin-Kiyonaga (langue japonaise). October 2006; Available from: <http://www.fklab.fukui.fukui.jp/yk/information/20061011kengakukai/information20061011.htm>.
- [23] Miyamoto, S. et Takeuchi, M. 2002. Snow-melting and de-icing system on road using natural thermal energy sources. Keynote paper in *XIth PIARC Winter Road Congress*. Sapporo, Japan.
- [24] Miyamoto, S. et Takeuchi, M. 2005. Snow-melting system on road using seasonal energy storage through foundation piles for bridge. *Proceedings of JSCE (Japan Society of Civil Engineers)*. 797:51-62.
- [25] Mackert, K.-U. 2011. Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn. Keynote paper in *Expertengespräch Stahlbrückenbau*. Bergisch Gladbach, DE: BAST, Bundesanstalt für Straßenwesen.
- [26] Rehau. Geothermisches Brückenheizungssystem. May 2010; Available from: [http://www.rehau.com/linkableblob/RO\\_ro/231384/data/Geothermisches\\_Bruecken-Heizsystem\\_Berkenthin\\_Objektinfo-data.pdf](http://www.rehau.com/linkableblob/RO_ro/231384/data/Geothermisches_Bruecken-Heizsystem_Berkenthin_Objektinfo-data.pdf).
- [27] Pahud, D. 2007. Serso, stockage saisonnier solaire pour le dégivrage d'un pont. Rapport final, Office fédéral de l'énergie, 112 p.
- [28] Polydynamics Engineering. SERSO: Energy from the road. 30 March 2000; Available from: [http://www.polydynamics.ch/e/r\\_d/page\\_e\\_serso.htm](http://www.polydynamics.ch/e/r_d/page_e_serso.htm).
- [29] Eugster, W. J. 2007. Road and Bridge Heating Using Geothermal Energy. Overview and Examples. Keynote paper in *Proceedings European Geothermal Congress 2007*. Unterhaching, DE. 5.
- [30] Pahud, D. 2008. BRIDGESIM: outil de simulation pour le dégivrage de pont par énergie solaire. Keynote paper in *15. Schweizerisches Status-Seminar "Energie- un Umweltforschung im Bauwesen"*. Zürich, CH.
- [31] Webb, Z. L. 2005. Snow and Ice Control Operations Manual, Texas Department of Transportation.
- [32] Charlier, R. 1987. Approche unifiée de quelques problèmes non linéaires de mécanique des milieux continus par la méthode des éléments finis. PhD Thesis, Université de Liège in Department ArGenCo, Belgium.
- [33] Collin, F. 2003. Couplages thermo-hydro-mécaniques dans les sols et les roches tendres partiellement saturés. PhD Thesis, Université de Liège in Department ArGenCo, Belgium.
- [34] Nordell, B. et Hellström, G. 2000. High temperature solar heated seasonal storage system for low temperature heating of buildings. *Solar Energy*. 69(6):511-523.
- [35] Amatya, B., Soga, K., Bourne-Webb, P. J., Amis, T. et Laloui, L. 2012. Thermo-mechanical Behaviour of Energy Piles. *Géotechnique*. 62(6):503-519.

- [36] Katzenbach, R., Ramm, H. et Waberseck, T. 2009. Recent developments in foundation and geothermal engineering. Keynote paper in *2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Nicosia, Cyprus. 464-471.
- [37] Conus & Bignens et Amsler Bombeli & Associés. 2009. Rapport géotechnique pour le Pont sur le Grand Canal, H144.
- [38] Cornaz, S. 2004. Evaluation du statut trophique d'un canal de drainage sous l'impact des pollutions d'origines diffuses et ponctuelles: le cas du Grand Canal de la plaine du Rhône. Licence Thesis, Université de Lausanne in Institut de Géographie. 151 p.
- [39] Tacher, L. 1999. Modélisation mathématique de l'impact de pompes à chaleur du type eau-eau dans l'aquifère superficiel de la vallée du Rhône dans la région de Sion (Suisse), Etude, 9903, EPFL.
- [40] Bertrand, J. 1986. Palier 10 – Les Evouettes, étude hydrogéologique : rapport sur l'état de la nappe d'eau souterraine après trois années d'étude (1983-1985). Evaluation des impacts d'un barrage sur la nappe et recommandations, Hydro-Rhône SA pour EOS.
- [41] Parriaux, A. et Nicoud, G. 1993. De la montagne à la mer, les formations glaciaires et l'eau souterraine. Exemple du contexte Nord-alpin occidental. *Quaternaire*. 4(2-3):61-67.

## Clôture du projet



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,  
de l'énergie et de la communication DETEC  
Office fédéral des routes OFROU

### RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Version du 09.10.2013

#### Formulaire N° 3 : Clôture du projet

établi / modifié le : 29/10/2013

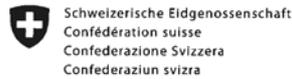
#### Données de base

Projet N° : VSS 2010/503  
Titre du projet : Utilisation des géostructures énergétiques pour la régulation thermique et l'optimisation énergétique des infrastructures routières et ouvrages d'art  
Echéance effective : 29/10/2013

#### Textes :

Résumé des résultats du projet :

L'objectif de ce projet est d'évaluer le potentiel d'utilisation des géostructures énergétiques dans la régulation thermique des routes. Pour ce faire, deux aspects principaux ont été analysés : la faisabilité technologique, et la capacité à dimensionner de façon conjointe les aspects thermique et géotechnique du problème. Dans la première partie, l'historique des projets hydroniques de régulation thermiques des routes, en particulier des ponts a été effectué, avec une insistance particulière sur les solutions technologiques choisies (matériau de l'échangeur noyé, source thermique, choix d'une pompe à chaleur ou non...), et sur le dimensionnement thermique côté route. Parmi le peu d'ouvrages existants, on peut dire que pas deux n'ont utilisé la même technologie. Les développements récents en techniques routières semblent cependant indiquer que la voie la plus prometteuse, tant pour le coût que pour la mise en œuvre, est l'utilisation de tubes PEX noyés dans un béton bitumineux coulé à basse température. Pour tous les ouvrages, la durabilité reste un point d'interrogation. Pour ce qui concerne le dimensionnement, les méthodes sont par contre anciennes et largement validées, et même intégrées à des outils de dimensionnement. Elles ont permis la validation de critères de calcul pour les sections suivantes du projet, en fonction de paramètres climatiques suisses disponibles auprès de MétéoSuisse. Ces deux points mis en place, le reste du travail s'est focalisé sur l'aspect géostructurel du problème. La seconde partie du travail a mis en évidence le comportement thermo-hydro-mécanique d'un pieu énergétique isolé, ce qui permet de mettre celui-ci en parallèle avec les connaissances acquises sur les sondes géothermiques. Enfin la troisième partie propose une variante utilisant les géostructures énergétiques pour un ouvrage récemment construit. Une démarche complète de dimensionnement est effectuée, et permet la mise en évidence des points sensibles modifiant le comportement de la fondation énergétique. L'importance de l'écoulement souterrain est exacerbée et il importe de le déterminer, soit par une bonne connaissance de l'hydro-géologie locale, soit par mesures. Le projet révèle que les longueurs usuelles de pieux pour les ouvrages de franchissement coïncident parfaitement avec celles nécessaires pour la régulation thermique des ouvrages. Des adaptations peuvent bien sûr être nécessaires, mais plus celles-ci seront faites en amont, moins elles seront coûteuses au final : par exemple une extrême compacité de la fondation devra être évitée. Une valeur de base d'1 m de pieu pour 1 m<sup>2</sup> de tablier permet de visualiser rapidement si un projet peut être adapté à la régulation par géostructures énergétiques ou non. Le projet ouvre la perspective aux ingénieurs de pouvoir réaliser relativement facilement un dimensionnement thermo-hydro-mécanique de fondation énergétique de pont avec les outils de simulation disponibles. Les deux inconnues principales à ce stade sont d'une part l'écart qui subsiste entre le comportement des pieux énergétiques décrit dans ce projet par un modèle thermo-élastique et le comportement réel ; et d'autre part la problématique de la durée de vie et de la recyclabilité des chaussées avec échangeur, pour lesquels trop peu de données existent à l'heure actuelle.



Département fédéral de l'environnement, des transports,  
de l'énergie et de la communication DETEC  
Office fédéral des routes OFROU

Atteinte des objectifs :

Chacun des trois objectifs initiaux a été traité:

Chacune des réalisations existantes liées à la technologie a été recensée et étudiée afin de déterminer un optimum technologique.

Sur la base de deux modèles numériques, des recommandations constructives spécifiques ont pu être justifiées.

Enfin sur la base du deuxième modèle numérique, une étude de faisabilité type a été réalisée, avec les critères techniques et de rendement énergétique.

Déductions et recommandations :

Les résultats incitent à émettre un avis favorable à la mise en oeuvre d'une telle technologie sur les ponts suisses. Nous recommandons l'utilisation des géostructures par rapport aux sondes en raison du coup inférieur et de l'absence de problèmes structurels dans cet usage. Les pieux devront simplement être armés sur toute la longueur en raison de la sollicitation nouvelle. Le pont et les voies d'accès doivent être équipés afin de permettre aux saieuses de stopper la projection avant l'ouvrage lui-même. Une forte limitation du vieillissement des ouvrages liée au salage est à attendre.

La durabilité des ouvrages, surtout côté chaussée, leur adaptation au niveau de trafic concerné, restent des problématiques cruciales qui incitent à utiliser les méthodes les plus robustes (tubes acier) au détriment de solutions moins coûteuses mais potentiellement moins durables.

Publications :

F. Dupray, T. Mimouni and L. Laloui. Alternative uses of heat exchanger geostructures, in Energy Geostructures: Innovation in Underground Engineering, p. 119-137, ISTE Ltd. and John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, ISBN: 9781848215726, 2013.

F. Dupray, M. Baehler and L. Laloui. Effect of groundwater flow on the THM behavior of an energy pile. International symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics, Torino, Italy, July 1-3, 2013.

Chef/cheffe de projet :

Nom: Laloui

Prénom: Lyesse

Service, entreprise, institut : Laboratoire de Mécanique des Sols, EPFL

Signature du chef/de la cheffe de projet :

## RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

### Formulaire N° 3 : Clôture du projet

#### Appréciation de la commission de suivi :

##### Evaluation :

Les résultats de la recherche sont d'excellente qualité. Différentes expériences dans ce domaine effectuées au Japon, aux États Unies, en Autriche et en Suisse, et qui se complètent, ont été évaluées. Des études numériques montrent les facteurs importants qui influencent le système. Cette recherche montre que l'utilisation des géostructures énergétiques pour la régulation thermique des infrastructures routières et des ouvrages d'art est réalisable. De plus ce concept est économique, en particulier s'il est prévu dans la phase initiale du projet de construction.

##### Mise en oeuvre :

Le projet SERSO, réalisé sur la route nationale N8 près de Därligen, est une bonne expérience. Il pourrait être utile de réparer et remettre en opération ce système de régulation thermique, afin d'acquérir plus d'expérience, notamment en ce qui concerne la durabilité et la fiabilité du concept.

Des mises en œuvre de systèmes de régularisation thermique, basées sur ce concept, devraient être prévues sur des tronçons typiques des routes nationales suisses.

##### Besoin supplémentaire en matière de recherche :

Cette recherche montre que les outils pratiques et théoriques sont disponibles pour mettre en œuvre ce système de contrôle thermique. Les problématiques sont principalement économiques; elles concernent également la durabilité de l'équipement mis en place dans l'infrastructure.

##### Influence sur les normes :

Aucune influence directe sur les normes.

#### Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Steiner Prénom : Walter

Service, entreprise, institut : B+S AG/ Ancien président VSS EK 5.07

#### Signature du président/ de la présidente de la commission de suivi :



## Index des rapports de recherche en matière de route

N° de rapport	N° de projet	Titre	Année
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektierungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Vieillissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012

N° de rapport	N° de projet	Titre	Année
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweißnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologientransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsanbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011

N° de rapport	N° de projet	Titre	Année
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkieranlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS"	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflusbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labormassstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme	2011
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010

N° de rapport	N° de projet	Titre	Année
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN	2010
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmaßnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisell	2009

N° de rapport	N° de projet	Titre	Année
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeugrückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDAinSVT Einsatz modellbasierter Datentransfernormen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Synthesebericht	2008
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009

N° de rapport	N° de projet	Titre	Année
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrintensiven Einrichtungen (VE)	2009
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut	2007
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlagschutzgalerien	2010

N° de rapport	N° de projet	Titre	Année
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	2009
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009