HAL
open science

Récupération d'énergie dans les chaussées pour leur maintien hors gel

Sarah Asfour

To cite this version:

Sarah Asfour. Récupération d'énergie dans les chaussées pour leur maintien hors gel. Autre. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2016. Français. NNT : 2016CLF22768 . tel-01511966

HAL Id: tel-01511966

https://theses.hal.science/tel-01511966v1

Submitted on 21 Apr 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : D.U 2768 EDPSIC : 779

UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL-CLERMONT II

ECOLE DOCTORALE

SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR DE CLERMONT-FERRAND

THÈSE

Présentée par

SARAH ASFOUR

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

SPÉCIALITÉ : Génie Civil

Récupération d'énergie dans les chaussées pour leur maintien hors gel

Soutenue publiquement le 9 décembre 2016 devant le jury :

Frédéric BERNARDIN	Ingénieur-chercheur, Cerema, Clermont-Ferrand	**Co-encadrant**
Teddy FEN-CHONG	Directeur de recherche, École des Ponts ParisTech, Paris	**Examinateur**
Ferhat HAMMOUM	Directeur de recherche, Ifsttar, Nantes	**Rapporteur**
Christophe PETIT	Professeur des Universités, Université de Limoges	**Rapporteur**
Jean-Michel PEREIRA	Ingénieur-chercheur, École des Ponts ParisTech, Paris	**Examinateur**
Jean-Michel PIAU	Ingénieur Général des Ponts, des Eaux et des Forêts, IFSTTAR, Nantes	**Examinateur**
Evelyne TOUSSAINT	Professeure des Universités, Université de Clermont-Ferrand	**Directrice de thèse**

Abstract

Winter maintenance operations for road networks are an important issue for maintaining the mobility in degraded situations, but generate high direct and indirect exploitation costs, particularly related to the intensive use of road de-icing and environmental impact. We study a road structure free of this penalty, thanks to a bonding drainage asphalt layer, circulated by a hot fluid, to prevent the deposition of snow or ice formation on the road surface. As part of an integrated vision of promoting the use of renewable energy, such device could be used to recuperate the thermal energy available in the road surface during the hot period, to transport it to a storage location (e.g. geothermal) and use it during cold period. We study here the heat exchanger function between the fluid and the road, the external storage function to the road being not addressed. The considered pavement structure has three asphalt layers.The bearing layer and the base layer are formed of conventional materials with hydrocarbon-based binders. The material of the bonding layer has a porosity of 20% and based on the use of a binder resistant to a prolonged circulation of the coolant. The road structure is assumed to have a slope of about 2 to 3%. An instrumented experimental road is implemented to collect data on the thermo-hydraulic response of the pavement structure. A thermo-hydraulic 2D model is designed to simulate the temperature field in the road structure when the fluid is injected at the upslope side of the road with a target temperature. This model is calibrated from experimental data collected on the experimental road subjected to meteorological solicitations. Initially, the sensibility of the distribution of the surface temperature of the road toward various model parameters (hydraulic conductivity, transversal slope, thermal conductivities, heat capacities) is analysed, in order to study the optimization of control procedures allowing to keep positive the road surface temperature at any point (e.g. determination of the minimum fluid injection temperature, under given meteorological data). In a second time, pavement thermal parameters is identified using control optimal method in order to validated unidimensionnel thermal model applied on July experimental data. In third time, hydraulic model is validated experimentaly using a laboratory mock-up in saturated and unsaturated conditions. In a fourth time, thermo-hydraulic bidimensionnal model is validated numerically using mesured data of experimental pavement. Finally, harvest energy in summer period using thermal reglementation RT2012 data and heating energy in winter period using RT2012 and Massif Interdepartmental Road Direction (DIR MC) are calculated in order to evaluate system performance.

Keywords

Road – porous asphalt – coolant– renewable energy - surface temperature control – thermo/hydraulic model

Résumé

Les opérations de maintenance des routes en conditions hivernales sur réseaux routiers constituent un enjeu important pour maintenir l'offre de mobilité en situation dégradée. Elles génèrent des coûts d'exploitation directs et indirects élevés, liés en particulier à l'utilisation intensive de fondants routiers. Par ailleurs, leur impact environnemental doit être pris en considération. Nous étudions ici une structure de chaussée non soumise à ce type d'astreinte, grâce à la présence d'une couche de liaison drainante dans laquelle circule un fluide chaud, permettant ainsi d'éviter le dépôt de neige ou la formation de glace en surface. Dans le cadre d'une démarche en faveur de l'emploi d'énergie renouvelable, un tel dispositif pourrait permettre de récupérer l'énergie thermique disponible en surface de chaussée en période chaude, de l'acheminer vers un lieu de stockage (ex : géothermie) et de l'utiliser en période froide. Nous étudions ici la fonction d'échangeur de chaleur entre le fluide et la chaussée, la fonction de stockage externe à la chaussée n'étant pas abordée hormis dans la revue bibliographique. La structure de chaussée considérée comporte trois couches d'enrobés. La couche de roulement et la couche de base sont constituées de matériaux classiquement utilisés dans les chaussées, à base de liants hydrocarbonés. Le matériau de la couche de liaison possède une porosité supérieure à 20%. La structure de chaussée est supposée avoir un dévers de l'ordre de 2%. Une chaussée expérimentale instrumentée a été mise en œuvre pour recueillir des grandeurs thermo-physiques de la chaussée. Un modèle thermo-hydrique 2D est developpé numériquement pour calculer la distribution de température dans le corps de chaussée lorsque l'on injecte un fluide à température d'entrée donnée, en haut de dévers. Les paramètres du modèle sont identifiés à partir des données expérimentales recueillies sous diverses sollicitations climatiques. On analyse dans un premier temps la sensibilité de la distribution de température en surface de chaussée aux différents paramètres du modèle (conductivité hydraulique, dévers, conductivités thermiques, chaleurs massiques), afin d'optimiser les procédures nécessaires au contrôle sous contraintes de températures positives en tout point. Dans une deuxième partie, des données expérimentales recueillies durant une période estivale d'un mois ont servi à valider le modèle thermique 1D. Une maquette de laboratoire a également permis d'identifier des paramètres en milieu saturé et non saturé. La dernière partie de thèse est consacrée au calcul des quantités énergétiques récupérables pendant la période estivale à l'aide des données de la réglémentation thermique RT2012. Elles sont comparées aux quantités énergétiques de chauffage nécessaires pendant la période hivernale en s'appuyant sur des données de la RT2012 et des données de la Direction Interdépartementale des Routes Massif (DIR MC) ; l'objectif final étant de déterminer les performances énergétiques du système.

Mots-clés

Chaussée – béton bitumineux drainant – fluide caloporteur – température de surface –modèles thermohydriques

Remerciements

A l'issue de la rédaction de cette recherche, je suis convaincue que la thèse est loin d'être un travail solitaire. En effet, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail doctoral sans le soutien d'un grand nombre de personnes dont la générosité, la bonne humeur et l'intérêt manifestés à l'égard de ma recherche m'ont permis de progresser dans cette phase délicate de « l'apprenti-chercheur».

En premier lieu, je tiens à remercier ma directrice de thèse, Madame Evelyne TOUSSAINT, et mon co-directeur Frédéric BERNARDIN, pour la confiance qu'ils m'ont accordée en acceptant d'encadrer ce travail doctoral, pour leurs multiples conseils et pour toutes les heures qu'ils ont consacrées à diriger cette recherche. Leur expertise, leur rigueur scientifique et leurs conseils pertinents m'ont permis d'avancer dans la bonne direction. Je les remercie également pour leur disponibilité tout au long de cette période. Enfin, je n'oublie pas les encouragements continuels et le grand professionnalisme d'Evelyne et j'ai été extrêmement sensible aux qualités humaines d'écoute et de compréhension de Frédéric tout au long de ce travail doctoral.

Je souhaite exprimer mes remerciements les plus respectueux aux membres du Jury qui ont accepté d'évaluer mon travail de thèse. Je voudrais remercier M. Ferhat HAMMOUM et M. Christophe PETIT, de m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger les travaux de ce mémoire. Je tiens également à remercier M. Jean-Michel PEREIRA et M. Jean-Michel PIAU d'avoir accepté d'examiner ce travail. Je n'oublie pas de remercier M. Teddy FEN-CHONG d'avoir présidé le jury de cette thèse.

Je remercie le personnel et la direction du laboratoire de Clermont-Ferrand du Cerema Centre Est de m'avoir acceuillie durant mes trois ans de thèse. Je tiens à remercier tous mes collègues, notamment Christiane, Catherine, Michele et Pierre.

Les derniers mois, j'ai vécu les moments les plus stressants, mais heureusement, j'étais bien entourrée. Grand merci pour vous, Cesard, Mathilde, Bernard, Sofiane, Chames, Maitham, Husam, Mohamad, Taher, Elodie, Edward, Claude, Maria et Sadek mes collègues de Polytech Clermont Ferrand.

Durant ces années, j'ai vécu les moments les plus difficiles, j'ai été confronté à de nombreuses situations destabilisantes, j'ai dû vivre loin de ma famille. Durant ces années, j'ai eu souvent les larmes aux yeux et j'ai pu trouver un réconfort d'amour et de tendresse auprès de ma chère Christiane ARNAUD. Je n'oublierai jamais ses petits câlins quand j'avais vraiment envie de tomber dans les bras de ma mère. Je t'aime trop !

La présence des amis dans notre quotidien embellit et colorie le trajet suivi. Je tiens également à remercier Mostafa et Mariam pour leur encouragement et leur soutien et mes amis libanais. Je vous souhaite une bonne chance pour la suite.

Les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection à ma famille qui m'ont fait comprendre que la vie n'est pas faite que de problèmes qu'on pourrait résoudre grâce à des formules mathématiques et des algorithmes. Malgré

mon éloignement, leur intelligence, leur confiance, leur tendresse, leur amour me portent et me guident tous les jours. Le plus grand merci s'adresse à mon père, merci pour avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui, merci pour ta confiance en moi, merci pour ton encouragement, merci pour toutes tes sacrifies pour moi et pour ma famille. Mon père, il n'y a pas de mot pour te remercier, je vous remercie au nom de la famille. La vie sans toi, n'a pas de sens, tu es la bougie qui éclaircit mon chemin obscure, tu es la chaleur et la tendresse qui chauffe mon coprs dans ce pays froid, tu es l'amour qui envahit mon coeur, tu es l'espoir qui m'aide pour dépasser les obstacles. Merci ma mère ! Finalement, je noublie jamais les encouragements de mon frère Ali, la sagesse de ma soeur Esraa et la tendresse de ma petite soeur Heba. J'ai la chance de vous avoir dans ma vie.

Finalement, depuis que tu es dans ma vie, tu me fais découvrir la vie en rose, tu as fait renaître mes rêves et mes envies, tu ne m'as donné que l'amour. Je n'oublie jamais les distances que tu a parcourues juste pour que tu sois à côté de moi, je n'oublie jamais les heures passées au téléphone juste pour m'écouter, je n'oublie jamais tes yeux qui me protégent durant mon parcours, je n'oublie jamais ton sourire qui me racontait l'histoire de mon succès, je n'oublie jamais tous tes sacrifies. Dans ce pays étranger, tu étais mon support, ma famille et toute ma vie ! Sans toi, je ne pourrais espérer la lumière ... mon amour Hamza.

« A mon père
A ma mère
A mon frère
A mes soeurs
A mon Hamza »

Table des matières

1 Introduction **1**

2 Synthèse bibliographique **4**
2.1 Systèmes de récupération d'énergie dans les chaussées 4
2.1.1 Introduction 4
2.1.2 Structures routières avec des tuyaux de circulation du fluide . 5
2.1.3 Structures routières avec applications photovoltaïques 5
2.1.4 Générateurs piézoélectriques 6
2.1.5 Générateurs thermoélectriques 6
2.1.6 Structures routières avec utilisation des matériaux à changement de phase 7
2.1.7 Comparaison des différentes techniques 7
2.2 Capteurs solaires bitumineux/cimentiers 8
2.2.1 Introduction 8
2.2.2 Composantes des systèmes de récupération d'énergie et de chauffage 9
2.2.3 Études et applications 17
2.3 Modélisation des systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers 21
2.3.1 Modèle thermique des systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers existants 21
2.3.2 Présentation du modèle de transfert de l'énergie dans les systèmes hydrauliques 22
2.4 Performance de systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers 27
2.4.1 Ajout des aggrégats à haute conductivité thermique 27
2.4.2 Arrangements des tubes 28
2.4.3 Débit 30
2.4.4 Quantité énergétique récupérée et de chauffage 30
2.5 Systèmes hydrauliques bitumineux dans une couche de chaussée drainante 33
2.5.1 Concept du dispositif des systèmes hydrauliques aux travaux d'une couche de chaussée drainante 33
2.5.2 Travaux sur l'échangeur thermique 34
2.5.3 Travaux sur les aspects mécaniques 35
2.6 Conclusion 38

3 Comportement thermo-hydraulique d'une chaussée avec couche drainante 39
3.1 Introduction 39

3.2 Milieu poreux 39
3.2.1 Définition du milieu poreux 39
3.2.2 Échelle microscopique 41
3.2.3 Échelle macroscopique 41
3.3 Modèle thermo-hydraulique d'une chaussée drainante poreuse 42
3.3.1 Mouvement laminaire et mouvement turbulent 42
3.3.2 Cinématique d'écoulement 43
3.3.3 Conservation de la masse à l'échelle microscopique 43
3.3.4 Conservation de l'énergie à l'échelle microscopique 44
3.3.5 Méthode du volume moyen 46
3.3.6 Conservation de la masse à l'échelle macroscopique 47
3.3.7 Equation de diffusion-convection : l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique 49
3.4 Écoulement macroscopique dans un milieu poreux 52
3.4.1 Conductivité hydraulique 52
3.4.2 Vitesse de Darcy dans un milieu poreux 53
3.4.3 Charge hydraulique - Perte de charge 54
3.4.4 Loi de Darcy 55
3.4.5 Présentation du modèle thermo-hydraulique 57
3.5 Étude de sensibilité 65
3.5.1 Les indices de Sobol 67
3.5.2 Estimation des indices de Sobol par des simulations Monte-Carlo 68
3.5.3 Analyse de sensibilité de la température de surface du modèle 69
3.6 Conclusion 74

4 Validation expérimentale du modèle thermo-hydraulique 75
4.1 Présentation du système expérimental 75
4.1.1 Description 75
4.1.2 Schéma en plan 79
4.1.3 Profils en travers de la chaussée : zone A et B 81
4.1.4 Travaux entrepris 85
4.1.5 Capteurs de mesure des variables météorologiques 88
4.2 Présentation du modèle thermique 1D 92
4.3 Identification des paramètres thermiques et de surface 97
4.3.1 Introduction 97
4.3.2 Données météorologiques utilisées 98
4.3.3 Méthode d'identification 102
4.3.4 Stratégie d'identification 107
4.3.5 Résultats 109
4.4 Calage du modèle thermique 1D sur une grande période 117
4.4.1 Calage du modèle sur le mois de juillet 2015 117
4.4.2 Calage du modèle sur huit mois 118

4.5 Étude hydraulique sur une maquette de laboratoire [119] 121
4.5.1 Détermination de la conductivité hydraulique saturée de la couche drainante à saturation 122
4.5.2 Détermination de la conductivité hydraulique par écoulement à surface libre dans la couche drainante 124
4.6 Validation du modèle thermo-hydraulique 2D 127
4.6.1 Présentation du modèle thermo-hydraulique 2D 127
4.6.2 Mesures expérimentales 127
4.6.3 Comparaison entre les températures mesurées et simulées . . . 135
4.7 Conclusion 156

5 Quantifications des énergies récupérables et nécessaires pour le déverglacage et le déneigement de la surface de la chaussée 159
5.1 Introduction 159
5.2 Données météorologiques utilisées 160
5.2.1 Données de la RT2012 160
5.2.2 Données météorologiques de la Direction Interdépartementale des Routes Massif Central 164
5.3 Énergie nécessaire au chauffage de la chaussée sans prise en compte du verglas et de la neige 169
5.3.1 Introduction 169
5.3.2 Cas stationnaire 170
5.3.3 Cas dynamique 175
5.4 Énergie de chauffage nécessaire pendant l'hiver pour la fonte de la neige et du verglas 179
5.4.1 Cas stationnaire 180
5.4.2 Cas dynamique 190
5.5 Récupération d'énergie en période chaude 200
5.5.1 Protocole 200
5.5.2 Résultats 202
5.5.3 Rendement énergétique annuel 209
5.6 Conclusion 211

6 Conclusion et perspectives 213
6.1 Conclusion 213
6.2 Perspectives 215
6.2.1 Sur le développement du modèle de simulation 216
6.2.2 Sur la détermination des quantités énergétiques et des puissances et la méthode de stockage 216
6.2.3 Sur l'aspect mécanique de la structure de chaussée 216

7 Glossaire 219

8 Annexe A 225

9 Annexe B: Fiches techniques des capteurs et modules d'acquisition 229

Bibliographie 239

1 Introduction

La France est un pays soumis aux problèmes de formation de gel ou de neige sur les routes. Plusieurs actions et études sont engagées afin de gérer et résoudre ce problème avec des technologies autres que l'utilisation des fondants routiers. En effet, ces derniers sont certainement efficaces mais engendrent des impacts écologiques et économiques importants. Pour la France, cette problématique est abordée depuis quelques années, sous l'impulsion entre autres de l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) et du Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'enironnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema). Une solution consiste à utiliser des tubes insérés dans la couche de surface de la chaussée, dans lesquels circule un fluide caloporteur. Plusieurs projets ont été réalisés en appliquant cette idée innovante. Malgré la réussite de cette technique permettant de maintenir hors gel la surface de la chaussée, elle impose des contraintes économiques et de durée de vie des tubes et de la chaussée. Dans le projet *Route de cinquième génération* porté par l'IFSTTAR et le Cerema, il s'agit de récupérer l'énergie solaire à partir de la circulation d'un fluide caloporteur dans une couche bitumineuse drainante de la chaussée. L'eau doit circuler dans les pores de la couche drainante sous gravité.

Ces problématiques de récupération d'énergie dans les chaussées émergent sous la double impulsion du Grenelle de l'Environnement et de la toute récente loi sur la transition énergétique. Elles s'inscrivent par ailleurs dans le périmètre scientifique du cluster INDURA (Infrastructures Durables en Rhône-Alpes) dont le Cerema, coporteur du sujet de thèse, est un des membres. L'unité Mobilité Durable et Sécurité (MDS) du Département Laboratoire de Clermont-Ferrand (DLCF) du Cerema mène des recherches depuis plusieurs années sur la mobilité et la sécurité en conditions météorologiques dégradées. L'intérêt de récupérer de l'énergie dans les chaussées réside dans l'utilisation d'une telle énergie pour maintenir une chaussée hors-gel, limitant alors drastiquement l'application de fondants routiers en période hivernale et ouvrant ainsi la voie à des gains écologiques voire économiques.

Le présent travail, vise à mettre au point un dispositif permettant de récupérer l'énergie solaire que peuvent capter les chaussées. Des travaux préliminaires à la thèse menés au cours du premier semestre de l'année 2013 ont permis d'identifier l'usage de la géothermie comme pertinent pour répondre à la problématique : en effet des dispositifs par fluide caloporteur permettraient de délivrer en période froide l'énergie stockée en été. Par ailleurs, la collecte d'énergie en période chaude permettrait de réduire fortement les hausses de température dans le corps de chaussée qui

peuvent lui être dommageables.

Une convention signée entre le DLCF et l'EATP (École d'Application des Travaux Publics) a permis lors de la thèse de construire une chaussée expérimentale instrumentée pour permettre un suivi thermique et météorologique de la route, avec en son sein un dispositif de chauffage par fluide caloporteur.

Dans cette thèse nous souhaitons étudier un procédé original basé sur la collecte d'énergie solaire en période chaude par la circulation d'un fluide dans une des couches superficielles de la chaussée sans avoir recours à des tubes, en tirant profit de la porosité de certains enrobés. L'objectif de la thèse est de lever des interrogations portant sur les aspects thermiques de ce concept. Il s'agit aussi de dégager des quantités énergétiques pouvant être récupérées en été et les comparer à celles nécessaires à la chaussée en hiver pour sa mise hors gel. Ces quantités doivent permettre de faire une première évaluation du rendement du dispositif.

La thèse s'articule autour des chapitres suivants. Dans le premier chapitre, une étude bibliographie présente les différents systèmes de chauffage et de récupération d'énergie appliqués aux chaussées. Premièrement, les différents systèmes et leurs composants sont décrits. Puis, la modélisation des systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers existants et utilisant des tubes sont présentés ainsi que leurs performances. Finalement, des travaux récents sur les systèmes hydrauliques bitumineux dans une couche drainante sont présentés afin d'introduire le travail développé dans cette thèse.

Dans le deuxième chapitre, le comportement thermo-hydraulique d'une chaussée avec une couche drainante est présenté en détail. Premièrement, les caractéristiques d'un milieu poreux aux échelles microscopique et macroscopique sont décrites. Puis, le modèle thermo-hydraulique d'une chaussée drainante poreuse est présenté en détail afin de passer de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. Finalement, une analyse de sensibilité de la température de surface à l'aide du modèle thermo-hydraulique développé permet de dégager les paramètres thermiques et hydrauliques les plus influents sur le système.

Dans le troisième chapitre, une méthode d'identification est appliquée sur un modèle thermique unidimensionnel à l'aide des données météorologiques réelles d'un mois d'été. Cette méthode basée sur la méthode du contrôle optimal est développée afin de dégager un jeu de paramètres thermiques et de surface de chaussée. Ce jeu de paramètres est ensuite utilisé pour valider numériquement le modèle thermique. Une maquette du laboratoire permet de valider le modèle hydraulique en milieu saturé et non saturé en appliquant la loi de Darcy. Finalement, le modèle thermo-hydraulique 2D est validé numériquement à l'aide des données mesurées sur la chaussée instrumentée.

Dans le quatrième chapitre, les quantités énergétiques et les puissances récupérées et de chauffage obtenues à partir des données de la réglementation thermique (RT2012) et de la Direction Interdépartementale des Routes Massif Central (DIR MC) sont

calculées avec le modèle thermo-hydraulique développé dans le chapitre 2. Le rendement énergétique du système est finalement déterminé afin de déterminer les performances du système proposé.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale accompagnée de perspectives.

2 Synthèse bibliographique

2.1 Systèmes de récupération d'énergie dans les chaussées

2.1.1 Introduction

La récupération d'énergie est de grand intérêt dans la problématique mondiale concernant l'énergie et l'épuisement des ressources naturelles. L'étude des structures routières dans le but de capter des énergies et de la réutiliser pour leurs besoins propres ou pour ceux de leur environnement proche est un axe de recherche qui se développe. Les techniques permettant de capter de l'énergie avec ces structures routières sont entre autres : l'insertion de tuyaux pour la circulation de fluide caloporteur, les panneaux photovoltaïques, les matériaux à changement de phase, les capteurs piézo-électriques, les générateurs thermoélectriques. La récupération d'énergie s'effectue selon la procédure suivante : la collecte d'énergie, le stockage de l'énergie et l'utilisation de cette énergie (figure 2.1). L'énergie récupérée par ces systèmes peut être utilisée par exemple pour produire de l'électricité, pour chauffer ou refroidir des bâtiments ou pour dégivrer des surfaces de structures routières.

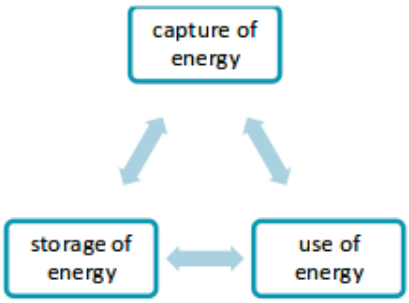


Figure 2.1: Procédure de récupération d'énergie [1]

Les paragraphes suivants décrivent brièvement les différentes techniques rencontrées le plus fréquemment.

2.1.2 Structures routières avec des tuyaux de circulation du fluide

L'incorporation de tubes dans la structure routière est un système de plus en plus utilisé pour la récupération d'énergie (figure 2.2). Ce système s'appelle système de capteurs solaires bitumineux ou cimentier. Le principe de fonctionnement de ce système est que le fluide, en circulant dans les tubes pendant l'été, absorbe l'énergie transférée à la chaussée par les radiations solaires. Par la suite, la température du fluide qui circule dans les tubes augmente. Cette énergie est ensuite stockée dans des systèmes géothermiques ou dans des réservoirs bien isolés [2]. Différents modèles numériques sont développés afin d'étudier les performances et l'influence de différents paramètres tels que la température d'injection, la profondeur des tubes et l'espacement entre les tubes sur les performances énergétiques de ces systèmes [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

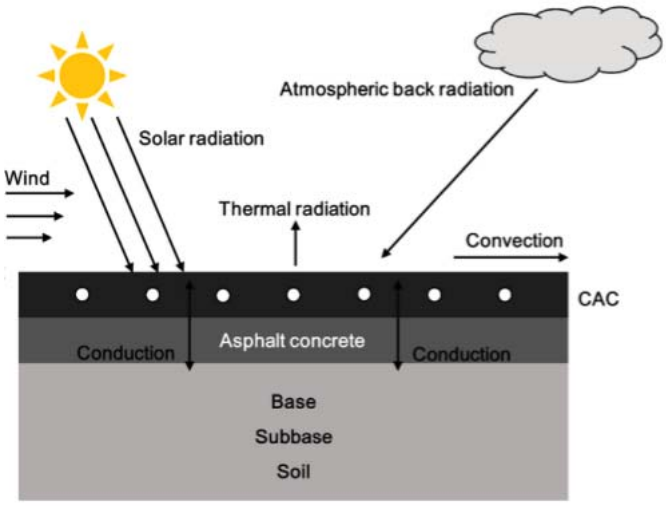


Figure 2.2: Principe de fonctionnement des collecteurs solaires [9]

2.1.3 Structures routières avec applications photovoltaïques

D'après Andriopouilou [1], des chercheurs coréens ont étudié différentes méthodes de collecte d'énergie à l'aide de structures routières. Ils ont étudié la possibilité d'incorporer des cellules photovoltaïques dans la chaussée. La technologie d'insertion de cellules solaires à couches minces n'est pas applicable sur des routes à trafic élevé à cause des contraintes mécaniques engendrées par les véhicules qui circulent. Pour cette raison, les chercheurs ont développé de nouvelles cellules solaires capables de supporter le trafic intense avec des poids lourds. Actuellement on trouve des projets

similaires à [1] en cours de développement (par exemple Solar Roadways aux Etats-Unis [10], TNO aux Pays-Bas [11] et Colas Wattway [12]). L'objectif est de concevoir un panneau routier solaire qui sera capable de résister à la charge de trafic d'un point de vue structurel.

2.1.4 Générateurs piézoélectriques

Des générateurs piézoélectriques insérés dans la structure de chaussée permettent de produire une tension électrique. Cette tension est creée lorsque ces générateurs sont exposés à des vibrations ou à des contraintes mécaniques. Les structures routières subissent des charges lourdes qui engendrent des contraintes mécaniques, de la fatigue, de la déformation permanente. L'introduction de tels générateurs permet de récupérer l'énergie engendrée par les vibrations et contraintes mécaniques et de la stocker sous forme d'énergie électrique dans un condensateur électronique. Cette énergie stockée peut être utilisée pour l'éclairage. La figure 2.3 présente le principe de fonctionnement de cette méthode.

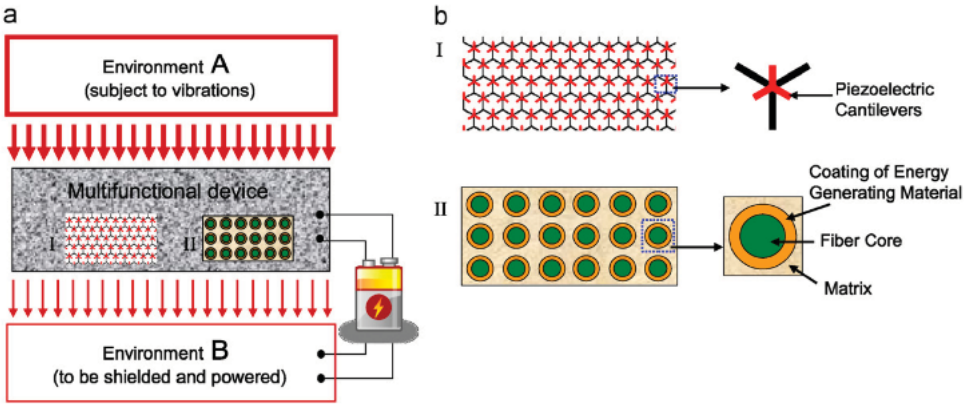


Figure 2.3: Générateurs piézoélectriques : a) application comme un absorbeur de vibrations et b) configurations internes [13]

2.1.5 Générateurs thermoélectriques

Les générateurs thermoélectriques permettent de récupérer de l'énergie thermique à partir des gradients thermiques de l'infrastructure de la chaussée. Cette technique peut être utilisée pour récupérer de l'énergie thermique de la chaussée et pour la transformer en éléctricité [2]. Cette transformation en électricité s'appuie sur le phénomène découvert en 1821, appelé effet Seebeck [14]. Comme il est mentionné ci-dessus, lorsqu'une différence de température est établie entre les extrémités chaudes

et froides du matériau semi-conducteur, une tension est produite, à savoir la tension Seebeck. Sur la base de cet effet Seebeck, les dispositifs thermoélectriques peuvent également agir en tant que générateurs de puissance. De tels dispositifs appliqués dans la structure routière exploitent la différence de température entre les couches inférieures de la chaussée et sa surface qui fournit une source potentielle en termes de production d'électricité. L'inconvénient de cette technique est son faible rendement de production d'énergie.

2.1.6 Structures routières avec utilisation des matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux capables de stocker et de libérer de l'énergie thermique pendant la transition de phase solide/fluide. Pendant la période de gel, ces matériaux libèrent des grandes quantités d'énergie alors que durant la période de réchauffement ils absorbent une grande quantité d'énergie grâce à leur changement d'état solide à fluide [15]. Ces matériaux incorporés dans la chaussée permettent de retarder la baisse de la température de surface de la chaussée en libérant de l'énergie lors de leur solidification au cours de l'hiver. Il s'agit d'utiliser des MCP ayant une température de fusion entre 2 et 5 ^{o}C [16]. L'incorporation de ces matériaux tels que la paraffine dans les infrastructures routières permet de contrôler la température de surface de ces structures car ces matériaux peuvent ajuster leur température à travers le stockage et la libération d'énergie thermique pendant le processus de changement de phase (solide-solide et solide-fluide) [17].

2.1.7 Comparaison des différentes techniques

Les tableaux 2.1 et 2.2 résument les avantages et les inconvénients des technologies de récupération d'énergie décrites ci-dessus, lorsqu'elles sont appliquées aux infrastructures routières. La prise en compte de leurs avantages et de leurs inconvénients est utile pour déterminer leur mise en oeuvre. Il est possible de combiner plusieurs techniques de manière à concevoir et à créer des systèmes de collecte plus efficaces.

D'après les tableaux 2.1 et 2.2, on peut conclure que le prix élevé des applications photovoltaiques, le faible rendement énergétique des générateurs piézoélectriques et thermoélectriques et la difficulté de mise en oeuvre des matériaux à changement de phase limitent l'usage de ces systèmes de récupération d'énergie.

Système	Avantages
Collecteurs solaires bitumineux	**E**xistence de nombreuses installations de démonstration **R**éduction directe de l'effet d'îlot de chaleur urbain **D**iminution de la demande d'électricité pour le chauffage et le refroidissement **A**mélioration de la durée de vie des surfaces des routes **R**éduction de la quantité de produits chimiques pour le dégivrage des routes
Applications photovoltaiques	**R**éduction des effets d'îlot de chaleur urbain **P**roduction d'énergie électrique : éclairage et la ventilation
Générateurs piézoélectriques	**E**xploitation de l'énergie mécanique produite
Générateurs thermo-électriques	**L**'électricité produite peut être utilisée de façon immédiate pour l'éclairage des rues, les systèmes de circulation et pour les foyers individuels
Matériaux à changements de phase	**A**llongement de la durée de vie de la structure de la chaussée par abaissement de sa température en été **R**éduction des effets d'îlot de chaleur urbain

Tableau 2.1: Avantages des systèmes de récupération d'énergie

Système	Inconvénients
Collecteurs solaires bitumineux	**D**épendance à l'ensoleillement **L**e développement d'un modèle numérique doit tenir compte de la variabilité des précipitations, de la température, de l'humidité, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire
Applications photovoltaiques	**L**'efficacité dépend de la qualité et du type des cellules solaires utilisées **P**rix élevé
Générateurs piézoélectriques	**F**aible rendement énergétique **I**nspections régulières et constantes pour modérer les effets des charges de trafic lourd
Générateurs thermo-électriques	**F**aible rendement énergétique
Matériaux à changements de phase	**P**roblème de fuite et questions environnementales **D**ifficulté de trouver des MCP ayant une température de fusion autour de 2 ^oC

Tableau 2.2: Inconvénients des systèmes de récupération d'énergie

Dans la suite, nous nous intéressons plus particulièrement à décrire les systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers. Ces systèmes jouent le rôle de capteurs solaires pendant l'été et de fournisseur d'énergie pendant l'hiver. Nous présentons les différents composants de ces systèmes et des exemples d'applications. Ensuite, nous décrivons leur modélisation qui comprend le comportement thermique de la chaussée, le transfert d'énergie entre la chaussée et les tuyaux. Enfin, nous présentons l'influence des paramètres de ces systèmes sur leur performance.

2.2 Capteurs solaires bitumineux/cimentiers

2.2.1 Introduction

Pendant la période estivale, les structures routières peuvent atteindre des températures assez élevées de l'ordre de 70 ^{o}C. Ces températures élevées sont néfastes et causent des problèmes environnementaux comme l'îlot de chaleur en milieu urbain et le dommage structurel des routes en raison du durcissage et de l'orniérage produits par les cycles thermiques. Les capteurs solaires bitumineux sont des systèmes actifs efficaces permettant de résoudre les problèmes cités précédemment grâce à leur

capacité à récupérer de l'énergie solaire utilisable pour différentes applications. Par exemple, Gao et al [5] ont montré que la moyenne de la puissance récupérée pendant l'été sur les périodes diurnes d'ensoleillement se situe entre 150 et 250 W/m^2 pour un rayonnement solaire entre 300 et 1000 W/m^2. Ces systèmes appliqués aux chaussées permettent de récupérer de l'ordre de 30% de l'énergie solaire pendant l'été.

Dans la suite, nous décrivons les différents composants des systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers : les collecteurs solaires bitumineux/cimentiers, l'utilisation d'une pompe à chaleur et les différentes méthodes de stockage géothermique de l'énergie récupérée.

2.2.2 Composantes des systèmes de récupération d'énergie et de chauffage

2.2.2.1 Système de circulation du fluide caloporteur dans la chaussée

Les systèmes hydrauliques bitumineux sont composés de tubes incorporés dans la structure routière dans lesquels circule un fluide caloporteur. Un transfert d'énergie dû au gradient thermique résultant de la circulation du fluide dans la chaussée permet de réduire la température dans la structure routière et d'augmenter la température du fluide. La figure 2.4 présente l'effet de la circulation du fluide sur la température de surface de la chaussée. En injectant du fluide, la température diminue de 56 ^oC à 38 ^oC. Ce système permet par la suite de réduire l'effet de l'îlot de chaleur, le risque d'endommagement et de déformation de la chaussée et la récupération de l'énergie. La figure 2.5 présente l'augmentation de la température de fluide suite à l'échange thermique entre ce fluide et la chaussée et par la suite le gain d'énergie résultant de la différence de température du fluide entre son injection et sa sortie. Cette énergie récupérée est normalement utilisée pour dégeler les routes ou pour chauffer des bâtiments. Ces systèmes hydrauliques peuvent être appliqués pour des structures en béton [18]. Mais les perfomances et l'efficacité des structures bitumineuses sont plus importantes que celle en béton, notamment à cause de sa capacité plus importante à absorber les rayonnements [18].

Le principe de fonctionnement de ce système est le suivant : pendant l'été, on fait circuler de l'eau froide qui récupère de l'énergie thermique, et pendant l'hiver cette énergie est stockée dans le sol et ré-utilisée pour dégivrer la surface des infrastructures routières. Les figures 2.6 et 2.7 donnent une description détaillée du principe de fonctionnement de ce système hydraulique.

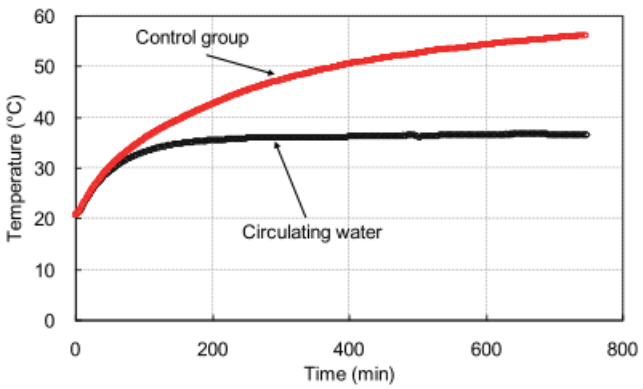


Figure 2.4: Températures de surface en fonction du temps (chaussée témoin en rouge, chaussée avec circulation de fluide en noir) [19]

Les inconvénients de ces systèmes de récupération d'énergie et de chauffage sont :

1. lors de la mise en œuvre la haute température du mélange bitumineux à chaud qui peut causer des dommages au système de tuyaux [18] ;
2. ce type de capteurs solaires ne peut pas être construit dans les routes soumises à des trafics intenses ([21, 22]).

Les avantages de ces systèmes de récupération de l'énergie et de chauffage sont :

1. l'installation de ces systèmes est pratique même si elle est "manuelle". Ces systèmes de collecte d'énergie peuvent être installés pendant les travaux de maintenance des routes ;
2. la réduction de l'effet de l'îlot de chaleur ;
3. la prolongation de la durée de vie de la structure routière résultant de la réduction des gradients thermiques dans les chaussées ;
4. les structures routières occupent des surfaces importantes et par suite, l'efficacité de ces systèmes pour récupérer l'énergie est importante ;
5. la méthode est écologique pour dégeler les routes car elle limite l'utilisation des fondants routiers.

2.2.2.2 Systèmes de stockage géothermique

Les méthodes principales de stockage saisonnier de l'énergie solaire thermique sont sous forme de chaleur sensible. Les pertes d'énergie pendant la durée de stockage

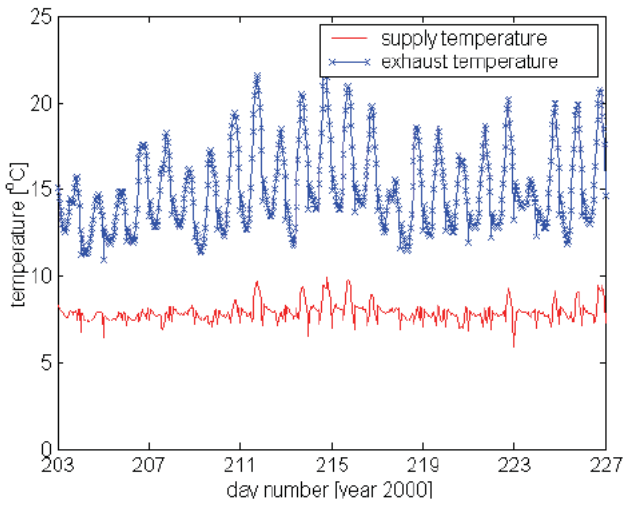


Figure 2.5: Température d'injection et de sortie du fluide sur une période de 3.5 semaines [20]

dépendent du temps de stockage, de la température de stockage, du volume de stockage, de la géométrie de stockage, et des propriétés thermiques du support de stockage. Les technologies de stockage saisonnier les plus prometteuses sont les stockages géothermiques [23, 24]. On a quatre types de stockage présentés sur la figure 2.8 : systèmes de stockage dans des réservoirs, systèmes de stockage dans les roches, systèmes de stockage à basse température (ATES) et systèmes de stockage de l'énergie thermique dans des puits (BTES).

Systèmes de stockage dans des réservoirs. Le réservoir d'eau utilisé pour le stockage d'énergie thermique est généralement constitué d'un réservoir en béton armé enfoui dans le sol entre 5 et 15 m. Les parois de ces réservoirs sont bien isolées, surtout les parois verticales. Des chemises en acier sont utilisées pour réduire les pertes de chaleur et garantir l'étanchéité à l'eau [27]. Cette technologie est la plus favorable pour le stockage d'un point de vue thermodynamique. Des réservoirs de stockage saisonniers ont été construits en Allemagne depuis 1995 [27, 28, 29] et au Danemark [30].

Systèmes de stockage dans des fosses remplie de gravier. Les fosses de gravier sont habituellement enfouies dans le sol à une profondeur entre 5 et 15 m. Ils ont besoin d'être étanches à l'eau et isolés au moins au niveau des parois latérales et sur le dessus [27]. L'injection et l'extraction de la chaleur peut se faire soit par échange direct de l'eau, soit par des tuyaux en plastique. Le mélange gravier-eau a une capacité thermique plus faible que l'eau seule ; c'est pour cette raison que le volume du bassin de stockage doit être plus grand que celui du réservoir d'eau.

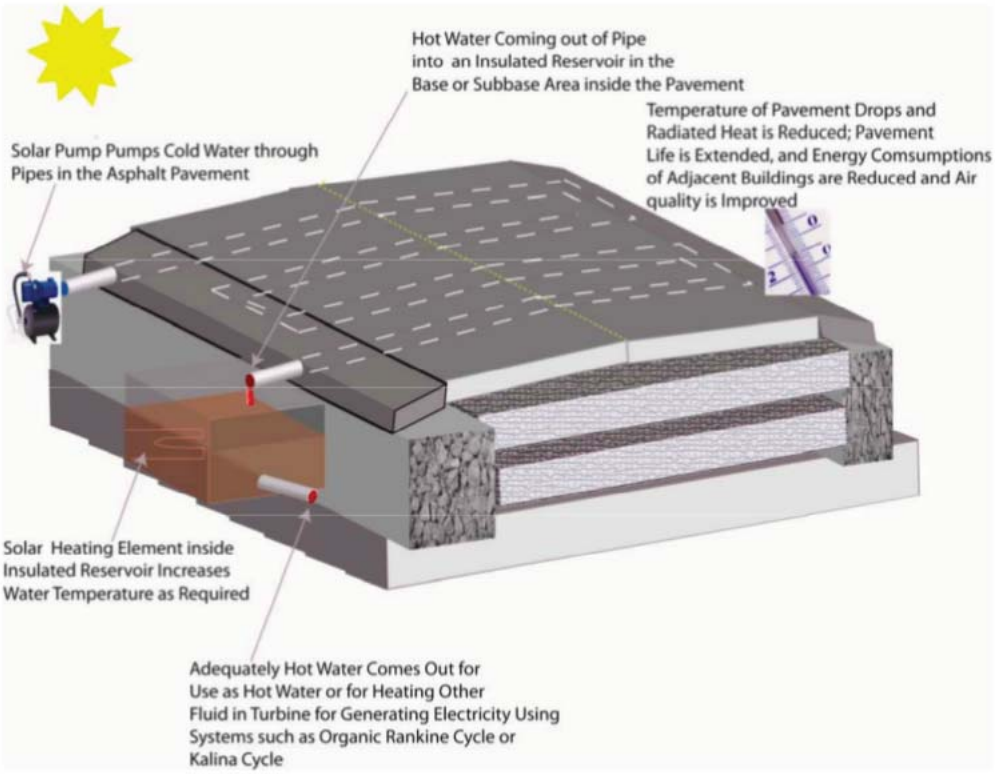


Figure 2.6: Principe de fonctionnement des systèmes hydrauliques [8]

Systèmes de stockage par nappe phréatique. Les aquifères sont distribués dans le sable, le gravier ou dans les couches de calcaire de grande conductivité hydraulique [27]. Si cet aquifère se trouve entre deux couches imperméables, il peut être utilisée pour le stockage de la chaleur. Durant la période de charge, l'eau froide est extraite du puits, elle est chauffée par le rayonnement solaire et est ensuite injectée dans le puits. Pendant la période de décharge, l'eau chaude extraite des aquifières, circule dans la chaussée où elle se refroidit pour être ensuite reinjectée dans l'acquifère. L'aquifère est utilisé comme stockage saisonnier à basse température avec une plage de température comprise entre 10 et 50 ^{o}C.

Systèmes de stockage de l'énergie thermique dans des puits. Le stockage de chaleur dans des puits est un type de stockage très utilisé. L'énergie est directement stockée dans le sol. Ce système de stockage est composé de tubes en U comme échangeur de chaleur. Ces tubes sont insérés dans des puits verticaux, à une profondeur comprise entre 30 et 200 m. Les puits sont généralement remplis avec les eaux souterraines (Europe du Nord), ou avec de la bentonite, sable de quartz. Dans la partie supérieure du magasin de stockage, il y a une couche d'isolation thermique permettant de réduire les pertes de chaleur vers la surface. Un avantage de ce type de stockage est la possibilité d'une conception modulaire. En raison de la faible

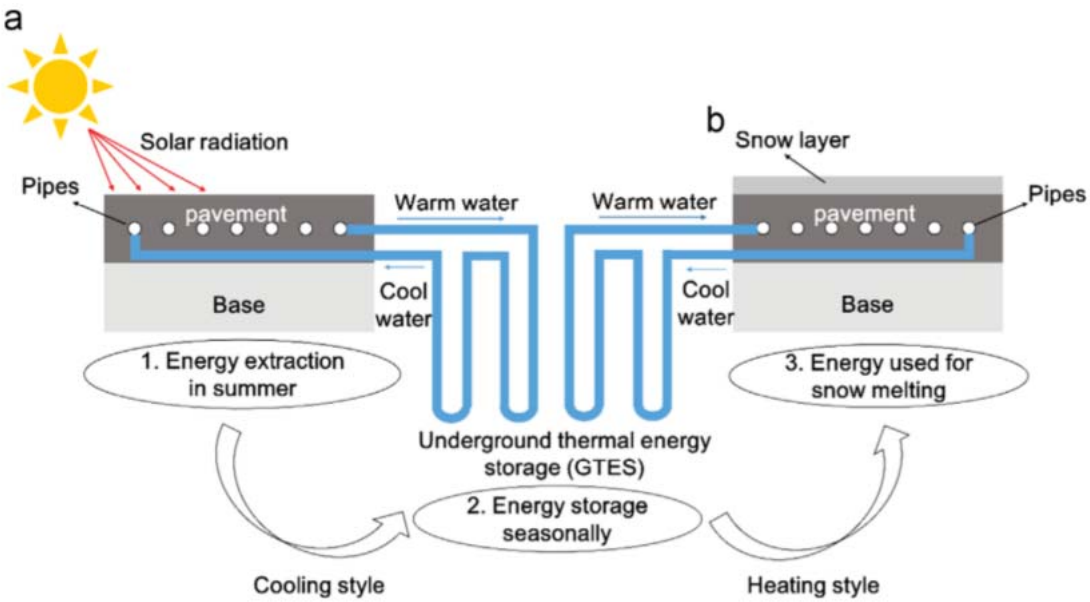


Figure 2.7: Fonctionnement des systèmes hydrauliques [20, 21]

capacité de charge et de décharge, une mémoire tampon (réservoirs d'eau) est intégrée dans le système. Selon Balbay et al [31], la puissance thermique maximale qui peut être extraite des tubes en U en régime permanent est de 50 à 80 W/m. Le tableau 2.3 résume certaines des caractéristiques des principaux concepts de stockage saisonniers.

Type de stockage	Réservoir	Fosse gravier/eau	Nappe phréatique	Puits
Capacité de stockage	$60-80\,\mathrm{kWh/m^3}$	$60-80\,\mathrm{kWh/m^3}$	$30-40\,\mathrm{kWh/m^3}$	$15-30\,\mathrm{kWh/m^3}$
Volume de stockage en eau équivalent	$1\,\mathrm{m^3}$	$1.3-2\,\mathrm{m^3}$	$2-3\,\mathrm{m^3}$	$3-5\,\mathrm{m^3}$
Conditions géologiques requises	Sol stable (pas de tassement) De préférence sans eau souterraine Profondeur $5-15\,\mathrm{m}$	Sol stable (pas de tassement) De préférence sans eau souterraine Profondeur $5-15\,\mathrm{m}$	Formation ne présentant pas de risques géologiques Nappe aquifère naturelle, Haute conductivité hydraulique Peu de courant	Formation ne présentant pas de risques géologiques Haute capacité thermique Haute conductivité thermique Faible conductivité Très faible courant Profondeur $30-200\,\mathrm{m}$

Tableau 2.3: Comparaison entre les différents types de stockage [32, 33]

2.2.2.3 Pompes à chaleur géothermiques

Les pompes à chaleur géothermiques sont des systèmes largement utilisés dans le monde. Ces pompes à chaleur prennent l'énergie du sol et augmentent la température du fluide qui sert pour l'échange de chaleur. Le transfert de la chaleur sur les différentes saisons est possible du fait que la conductivité thermique du sol est faible et par la suite la température du sol évolue lentement. À partir de 8 m de

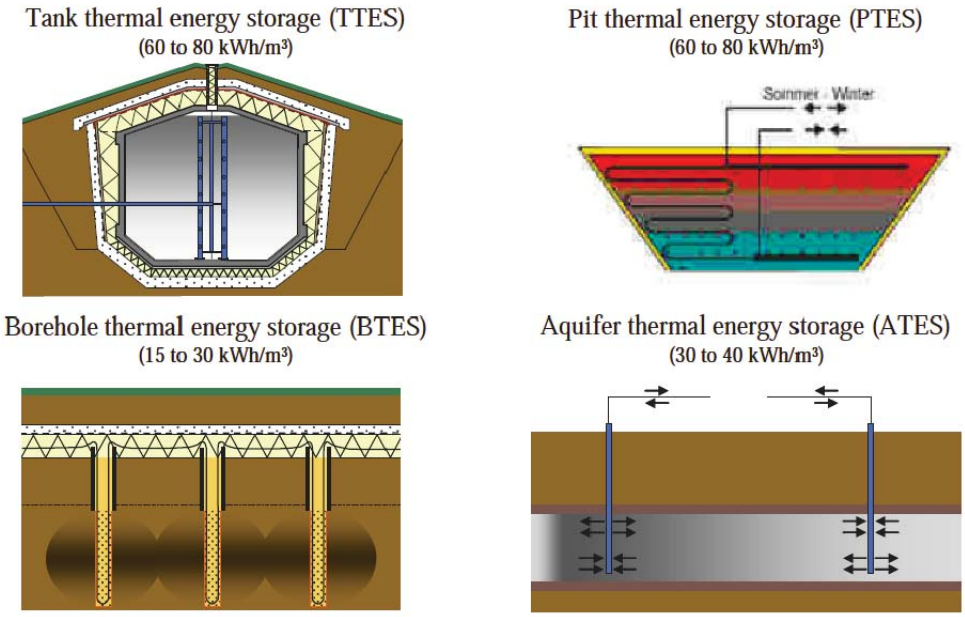


Figure 2.8: Types de stockage géothermiques [25, 26]

profondeur, le sol est considéré comme étant isolé [34] et la température varie peu au cours de l'année, ce qui rend faisable le stockage saisonnier. Une pompe à chaleur géothermique peut améliorer le chauffage avec un coefficient de performance (COP) variant de 2.4 à 5 en fonction du type de pompe. Le COP représente le rapport entre la quantité d'énergie produite et la quantité d'énergie utilisée par cette pompe. Les éléments principaux d'une pompe à chaleur sont : un compresseur, une vanne de détente et deux échangeurs de chaleur - l'évaporateur et le condenseur (figure 2.9).

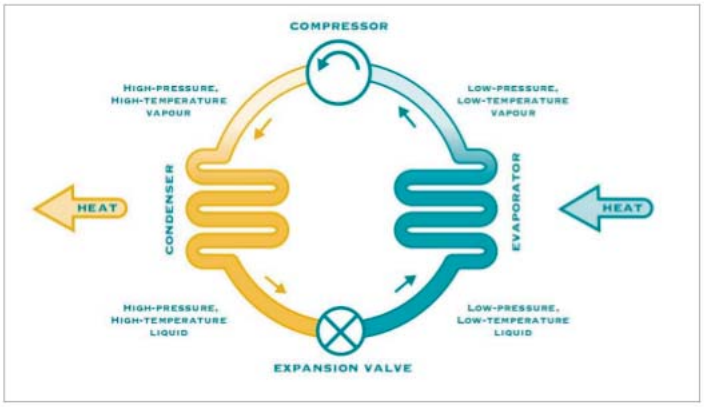


Figure 2.9: Éléments principaux d'une pompe à chaleur [35]

Une caractéristique de la pompe à chaleur est qu'elle est capable de fonctionner en double sens : en mode de chauffage et en mode de refroidissement. Le bon fonctionnement de la pompe à chaleur dépend de la différence entre la température de fluide fournie par la pompe à chaleur et celle extractée du sol. Il y a deux configurations de pompes à chaleur géothermiques : systèmes souterrains couplés (boucle fermée figure 2.10) et eaux souterraines (boucle ouverte figure 2.11).

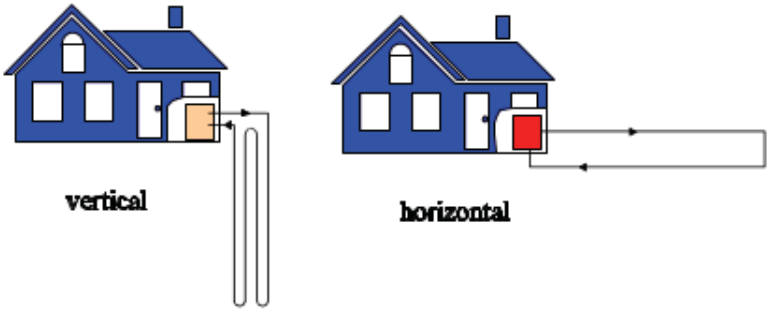


Figure 2.10: Pompes à chaleur en boucle fermée [36]

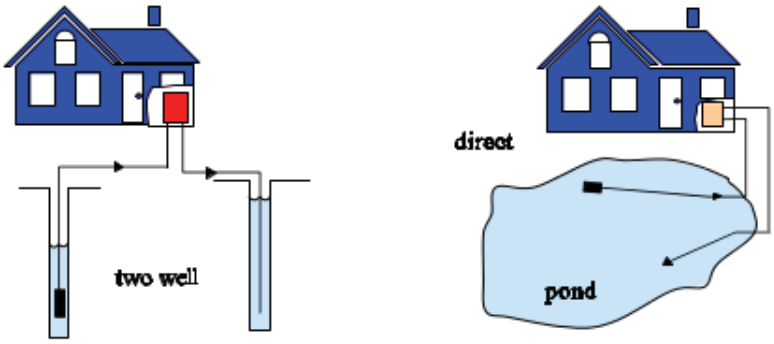


Figure 2.11: Pompes à chaleur en boucle ouverte [36]

Les différents types de pompes à chaleur et leurs caractéristiques sont décrits dans le tableau 2.4.

Types des pompes à chaleur géothermiques	Description
Les pompes à chaleur qui utilisent le sol comme source de chaleur	Ce type utilise le sol comme source de chaleur. Il peut être un échangeur de chaleur verticale ou horizontale (figures 2.12 et 2.13)
Les pompes à chaleur à eau de nappe	Ce type utilise l'eau souterraine comme une source de chaleur

Tableau 2.4: Types des pompes à chaleurs géothermiques et leur description

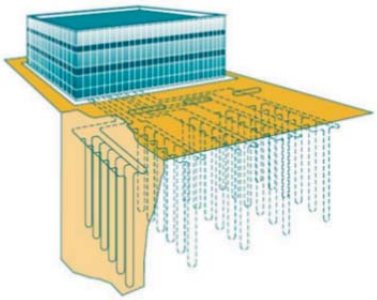


Figure 2.12: Échangeur thermique vertical [35]

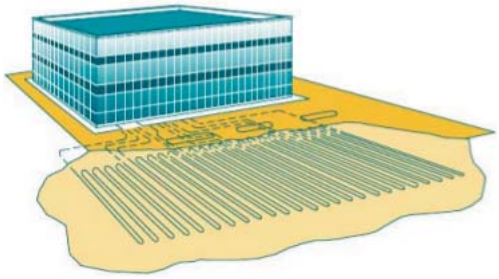


Figure 2.13: Échangeur thermique horizontal [35]

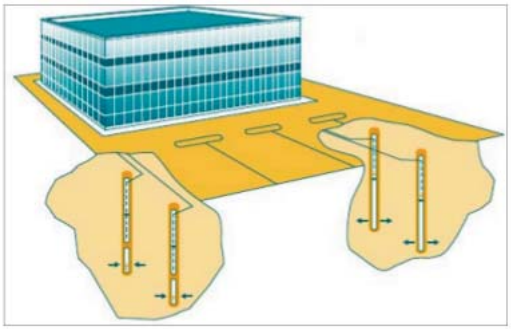


Figure 2.14: Échangeur thermique vertical avec l'eau souterraine [35]

Après avoir décrit les différents composants des systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers et les différentes méthodes de stockages géothermiques, nous présentons dans ce qui suit les études et les applications de ces systèmes.

2.2.3 Études et applications

L'utilisation de la chaussée comme source de chaleur pour récupérer de l'énergie et faire fondre la neige est une technique utilisée dans plusieurs pays comme l'Irlande, le Japon et les Etats-Unis. Ces systèmes de chauffage des chaussées en utilisant des tubes dans lesquels circule un fluide caloporteur ont besoin d'une puissance entre 320 W/m^2 et 600 W/m^2 qui est inférieure à celle nécessaire par un chauffage électriques (500 W/m^2 et 750 W/m^2) [37]. Ce nouveau type de système de chauffage est utilisé pour les chaussées, les ponts, les allées piétonnières, les plateformes d'aéroports et les héliports ([5, 38, 39, 40]). Ces systèmes sont basés sur des tuyaux incorporés dans la couche superficielle de la chaussée. La plupart des systèmes utilisent de l'eau glycolée ou de l'eau chaude qui circule dans ces tuyaux. Récemment, ces tuyaux sont utilisés dans la chaussée pour collecter l'énergie solaire estivale qui sera stockée dans le sol [40]. Pour le stockage saisonier de cette énergie, le meilleur choix est le stockage géothermique dans des puits [3].

Bon nombre de projets de chauffage ont été construits et mis en application, notamment aux Etats-Unis, lors de projets de chauffage de chaussée utilisant le stockage géothermique sont réalisés [41, 42]. Le premier et le plus ancien projet a été implanté en 1948 en Oregon aux Etats-Unis [43].

Pendant les années 1990, plusieurs systèmes hydrauliques utilisant des pompes géothermiques ont été réalisées au Japon [44, 45]. En 1994, le projet Serso de chauffage des ponts a été réalisé en Suisse [5, 46, 47]. Entre 1994 et 1999 plusieurs systèmes ont été mis en place dans les régions du Nebraska, de l'Oregon, du Texas, et de la Virginie. Au Japon, le premier système de récupération et stockage d'énergie est le système Gaia installé en 1995 à Ninohe. Les recherches sur les systèmes de chauffage de la chaussée ont commencé depuis 1998 à l'université d'Oklahoma [48]. En 2002 deux systèmes de chauffage des trottoirs ont été achevés dans la ville d'Aomori, au Japon. Puis des études sur le chauffage thermique des chaussées et des ponts ont été initialisées en Allemagne (NRW, 2005) et en Suisse (TBA, 2006). Finalement en 2005, un projet de chauffage de plateforme ferroviaire à été réalisé à Harz en Allemagne en 2005.

Des systèmes ont été commercialisés et implantés par une companie néerlandaise "Ooms International Holding"("Road Energy System " [49] et "WinnerWay" [50]). La companie anglaise ICAXTM Ltd. a installé un système de chauffage à Toddington, et l'énergie récupérée par ce système est utilisée pour le confort des bâtiments [51]. L'institut polytechnique à Worcester a développé le système "Roadway Power System" [52].

2.2.3.1 Au Japon

Au Japon, en 1995, le système de chauffage "Gaia snow-melting system" est installé sur une surface de 266 m^2 à Ninohe (Tokyo-Japon), Iwate Prefecture [44, 39]. Ce système utilise un échangeur thermique coaxial dans un forage pour extraire l'énergie

du sol. Des tubes horizontaux sont incorporés dans la chaussée à une profondeur de 10 cm avec un espacement de 20 cm. L'énergie récupérée par ce fluide caloporteur est stockée dans le sol pour être utilisée pendant l'hiver. La source d'énergie principale est l'énergie géothermique et son énergie solaire récupérée pendant les périodes estivales. L'échange énergétique se fait à l'aide de trois forages de longueur 150 m et de diamètre intérieur de 9 cm ([53, 54]).

Ces échangeurs de chaleur sont formés des tuyaux internes isolés. Pendant l'hiver, l'énergie est extraite par l'échangeur thermique coaxial à l'aide d'une pompe à chaleur et est transmise au fluide circulant dans les tubes. Pendant l'été, l'énergie solaire augmente la température du fluide dans les tubes à un intervalle 30 et 50 ^{o}C. La puissance moyenne fournie aux tubes de chauffage pendant la saison de la neige varie entre 178 et 185 W/m^2. En comparaison la moyenne d'énergie extraite des forages d'échanges thermiques varie entre 80 et 83 W par mètre de forage. Le déficit en énergie est apporté par une pompe à chaleur. Un autre système de chauffage avec des cables électriques a été mis en place dans la même ville afin de faire la comparaison en consommation d'énergie électrique entre ce système et le système Gaia. D'après le tableau 2.5, la consommation de puissance électrique annuelle (entre 1996 et 1998) par unité de surface de système Gaia (énergie pour alimenter les pompes à chaleur) pour le dégivrage est de 17% à 19% supérieure à celle des systèmes de chauffage par cable électrique [44].

Année de fonctionnement	Énergie de chauffage à l'aide des cables électriques (kWh/m^2/an)	Énergie de chauffage à l'aide Gaia (kWh/m^2/an)
1996	145.4	24.7 (17.0%)
1997	154.7	28.3 (18.3%)
1998	168.9	31.2 (18.5%)

Tableau 2.5: Comparaison de la consommation d'énergie entre le système Gaia et le système à cables de chauffage électrique [44]

2.2.3.2 Aux États-Unis

Le premier système de chauffage de la chaussée a été implanté en 1948 en Oregon aux Etats-Unis sur une section d'esplanade en béton à Klamath Falls [43]. Ce système est formé de tuyaux en fer de diamètre 1.9 cm placés à une profondeur de 7.6 cm de la surface. Le système utilise le stockage géothermique local de l'énergie gagnée pendant l'été pour ensuite utiliser l'énergie pour la fonte de neige [39]. Entre 1994 et 1999 plusieurs systèmes sont mis en place dans les régions américaines du Nebraska, Oregon, Texas, et Virginie, ces systèmes utilisant le stockage géothermique comme source de chaleur [41, 42]. Plus récemment des études ont été mises en place. Elles utilisent le béton bitumineux à la place du béton cimentier comme source de collecte d'énergie [7, 21].

2.2.3.3 En Suisse

En 1994, le projet Serso de chauffage d'un pont a été installé en Suisse [46, 55]. Ce projet utilise l'énergie géothermique pour fondre la neige sur un pont de 1300 m^2 (figures 2.15 et 2.16). Ce système fonctionne en été et récupère de l'énergie qui est stockée dans une roche de volume 55000 m^3. L'énergie spécifique de chauffage annuelle du projet Serso varie entre 100 et 132 $\mathrm{kWh/m^2}$ (figure 2.17) correspondant à une puissance variant entre 30 et 45 $\mathrm{W/m^2}$.

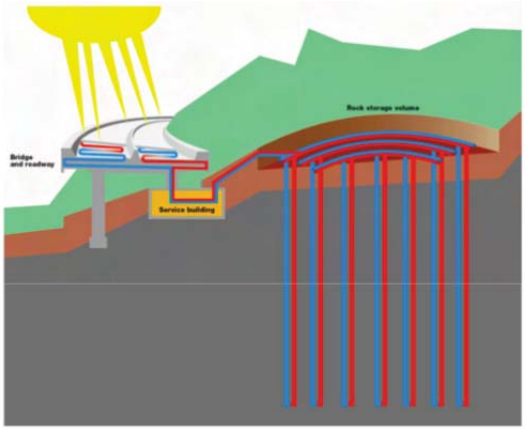


Figure 2.15: Schéma du projet Serso [55]

Figure 2.16: Projet Serso en fonctionnement [55]

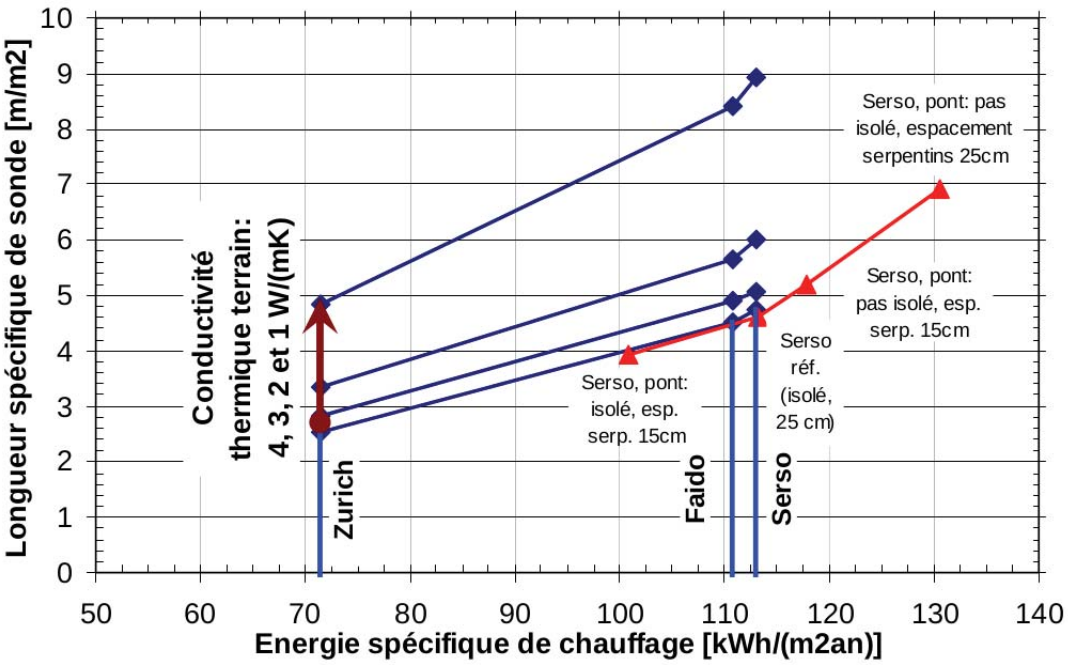


Figure 2.17: Énergie de chauffage annuelle [56]

2.2.3.4 En Pologne

Un système de chauffage a été installé à l'aéroport de Goleniow en Pologne en 2002. Ce système utilise des pompes à chaleur pour extraire l'énergie géothermique stockée dans un aquifère de la région de Szczecin proche de Goleniow. L'eau thermale dans cette région varie entre 40 ^{o}C et 90 ^{o}C pour une profondeur variant entre 600 et 2200 m. Ce système de chauffage a été testé pour des variations de température de l'air compris entre $-16\,^o$C et $3\,^o$C. La puissance maximale à fournir pour dégeler et faire fondre la neige la surface est estimée à 200 W/m^2.

Dans la suite, nous présentons diverses modélisations des systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers. Une grande partie de ces modèles décrivent la modélisation du processus de la fonte de neige unidimensionnelle et bidimensionnelle. Nous nous intéressons au seul modèle du transfert thermique dans la chaussée. En effet, nous nous intéressons dans la suite de ce document à la fonte instantanée des flocons de neige au contact de la chaussée, sans possibilité de formation d'un manteau neigeux. Le système que nous étudions devra donc garantir une fonte "instantanée" de la neige.

2.3 Modélisation des systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers

2.3.1 Modèle thermique des systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers existants

Avant d'étudier le comportement des systèmes hydrauliques appliqués aux chaussées, il est important de connaître la répartition de la température dans la structure bitumineuse ou en béton soumise au rayonnement solaire. Ce travail passe par le développement de modèles numériques. Barber est le premier à avoir développé un modèle de diffusion thermique afin de prédire la température maximale du corps de chaussée [57, 58, 59] . Une série d'études pour prédire les températures des chaussées ont par la suite été développés jusqu'en 1987 en se basant sur un premier modèle [60, 61, 62]. Puis des modèles ont été développés en se basant sur l'équation du bilan énergétique [58, 61, 62].

En se basant sur la méthode de Solaimanian [58], Hermansson et al [59, 63] ont développé un modèle numérique capable de simuler la température pendant l'été et l'hiver. Yavuzturk et al [62] ont développé un modèle bidimensionnel transitoire résolu par différences finies pour prédire la distribution de température. Dans le même temps, Minhoto et al [64] ont développé un modèle aux éléments finis bidimensionnel pour calculer la température de la chaussée à partir des données moyennes horaires du rayonnement solaire, de la vitesse du vent et de la température de l'air. Récemment, Han et al [65] et Hall et al [66] ont développé des modèles unidimensionneles pour calculer les températures des chaussées aux États-Unis. En outre, Han et al. [65] ont étudié la variabilité des propriétés de l'enrobé en été et en hiver comme Hermansson l'a fait. La précision de calcul du modèle présenté par Hall et al [66] est aussi bonne que celle des autres logiciels commerciaux complexes basés sur la méthode aux éléments finis en 2D ou 3D [59, 64, 65, 66].

La modélisation des systèmes hydrauliques est basée sur le phénomène de diffusion dans la chaussée, de la chaleur convectée par le fluide caloporteur, et l'échange de chaleur entre la surface de la dalle et l'environnement. Les modèles dévéloppés prennent en considération la présence d'une couche de neige. L'échange d'énergie dans la couche de neige et entre la couche et l'atmosphère est pris en compte. Le processus de fonte de neige est un phénomène très complexe et il a été étudié et développé par de nombreux chercheurs. Dans notre tavail, on cherche à injecter un fluide à une température qui évite la formation d'un manteau neigeux et qui permette aux flocons de neiges de fondre une fois qu'ils ont atteint la surface de la chaussée chauffée. L'objectif de la modélisation est d'étudier le performance de ces systèmes hydrauliques et de dégager des quantités énergétiques pour ces systèmes.

La distribution de température dans la couche d'enrobé influe fortement sur l'efficacité de collecte de l'énergie solaire. Le problème de transfert de chaleur associé au processus de collecte de l'énergie est un problème de conduction-convection-rayonnement

couplé avec des conditions aux limites pour l'interface chaussée-air et chaussée-eau. Bobes et al [67] ont identifié les principaux mécanismes de transfert de chaleur pour le processus de collecte de l'énergie solaire et les ont modélisés. Ils ont souligné le fait qu'il est important de calibrer d'abord les modèles numériques avec des études expérimementales.

De nombreux modèles bidimensionnels aux éléments finis sont dévéloppés et validés expérimentalement pour étudier l'influence des différents composants de système de chauffage sur leurs performances [7, 9, 19, 21, 67, 68]. Chen [17] a modélisé un modèle 3D aux éléments finis dans le but de déterminer la quantité d'énergie récupérée [8, 68].

Dans ce qui suit, on présente les équations décrivant le phénomène de transfert de chaleur dans les systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers.

2.3.2 Présentation du modèle de transfert de l'énergie dans les systèmes hydrauliques

Comme indiqué précédemment, le procédé de transfert de chaleur comprend la conduction dans la chaussée, la convection entre la surface de la chaussée et l'air, la convection entre l'eau et la chaussée et le rayonnement thermique entre la chaussée et l'atmosphère (figure 2.18).

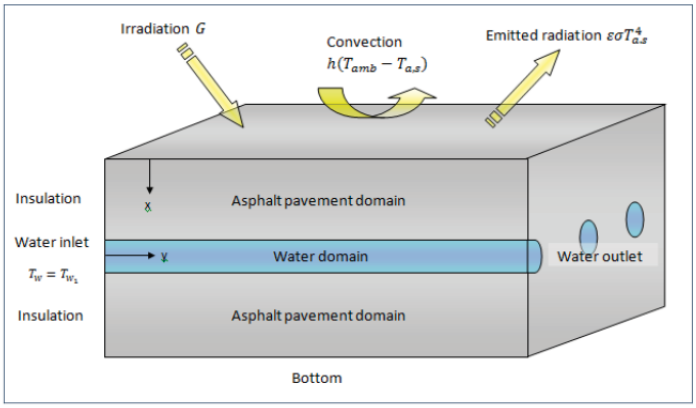


Figure 2.18: Procédé de transfert de chaleur [35]

Conduction dans la chaussée. Le transfert de chaleur par conduction est le transfert d'énergie à travers la chaussée en présence d'un gradient de température. Ce

procédé est appelé la diffusion de la chaleur. Il est décrit par la loi de Fourier. Le flux thermique par conduction s'écrit :

$$\mathbf{q} = -\lambda_s \nabla T \tag{2.1}$$

avec

$\mathbf{q}$ le flux de chaleur par conduction (W/m^2) ;

λ_s la conductivité thermique de la chaussée (W/m.K) ;

∇T le gradient de température (K/m) ;

On notera que λ_s varie entre 0.74 et 2.06 (W/m^2) [69].

Dans le système de coordonnées tridimensionnelles, le flux thermique est exprimé pour chaque direction à partir des formules suivantes: $q_x = -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x}$, $q_y = -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial y}$ et $q_z = -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial z}$.

Convection. La convection est un procédé de transfert de chaleur par lequel la chaleur est transférée entre un fluide en mouvement et une surface solide en contact avec le fluide. Deux procédés différents de convection se produisent dans un collecteur solaire bitumeux, une entre la surface de la chaussée et de l'air au-dessus, et l'autre entre le fluide en circulation et les parois des tubes. La convection peut être forcée ou naturelle, selon les causes qui induisent le mouvement du fluide et le débit peut être turbulent ou laminaire en fonction des conditions de circulation des flux. Le nombre de Reynolds nécessaire pour avoir un écoulement turbulent est de l'ordre $Re = 5.10^5$. Le flux de chaleur par convection est exprimé par la relation:

$$q_c = h_v A \left(T_s - T_{inj}\right) \tag{2.2}$$

où

h_v est le coefficient de convection de la surface (W/m^{2}K) ou coefficient d'échange ;

A est la surface de la chaussée en contact avec l'environnement (m^2) ;

T_s est la température de surface (^{o}C) ;

T_{inj} est la température de fluide (^{o}C) ;

Convection entre la surface et l'air. Le coefficient de convection entre la surface de la chaussée et l'air est donné par une corrélation empirique développée par Panpan et al [9] pour la surface des chaussées :

$$h_v = 698.24 \left[0.00144 T_m^{0.3} V_{vent}^{0.7} + 0.00097 \left(T_s - T_{air}\right)^{0.3}\right] \tag{2.3}$$

où

T_{air} est la température de l'air (^{o}C) ;

T_s est la température de surface de la chaussée (^{o}C) ;

T_m est la moyenne entre la température de surface de la chaussée et la température de l'air (^{o}C) ;

V_{vent} est la vitesse du vent (m/s) à 10 m [66].

Il y a une autre expression du coefficient de convection [9] qui donne un bon accord avec les mesures expérimentales. Dans ce cas, le coefficient dépend juste de la vitesse du vent:

$$h_v = 5.8 + 4.1V_{vent} \tag{2.4}$$

Convection entre le tube et l'eau. Le coefficient de convection h_v est obtenu à partir le nombre de Nusselt N_u [9] :

$$h_v = \frac{N_u.\lambda}{l} \tag{2.5}$$

où

λ est la conductivité thermique du matériau homogène et isotrope (W/mK) et l est la longueur de tube (m).

Le nombre de Nusselt N_u est déterminé en utilisant différentes corrélations empiriques en fonction du type de convection et du régime d'écoulement (laminaire ou turbulent).

Rayonnement solaire absorbé par la chaussée. Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain, comme les rayons gamma, aux ondes radio en passant par la lumière visible. Une partie du rayonnement solaire est absorbée par l'atmosphère avant d'atteindre la surface de la Terre. La fraction du rayonnement qui atteint la surface de la chaussée est le rayonnement incident. Le rayonnement incident sur une surface peut être absorbé, transmis ou réfléchi en différentes proportions.

La chaussée étant opaque dans le visible, la partie du domaine du visible du rayonnement solaire est absorbée ou réfléchie.

Le rayonnement solaire absorbé par la chaussée est donné par la relation :

$$q_s = (1 - \alpha)q_i \tag{2.6}$$

où

q_s est le rayonnement absorbé par la surface de la chaussée (W/m^2) ;

q_i est le rayonnement solaire incident (W/m^2) ;

α est l'albédo ($-$).

Rayonnement thermique émis par la surface de la chaussée. L'émissivité ε est le rapport entre le rayonnement électromagnétique émis par un corps à une certaine température et le rayonnement émis par un corps noir à la même température. Le rayonnement thermique émis par une surface d'asphalte est donnée selon la loi de Stefan-Boltzmann [59] :

$$q_r = \sigma\varepsilon(T_s + 273.15)^4 \tag{2.7}$$

avec :

q_r rayonnement émis par une surface (W/m^2) ;

ε est l'émissivité de la surface de la chaussée ($-$) ;

σ est la constante de Stefan-Boltzmann égale à 5.67×10^{-8} W/m^{2}K^4.

Rayonnement thermique absorbé de l'atmosphère. Outre les radiations émises, la surface de la chaussée absorbe également les rayonnements infrarouge provenant de l'atmosphère [9] :

$$R_{atm} = \sigma\varepsilon(T_{ciel} + 273.15)^4 \tag{2.8}$$

avec

$$T_{ciel} = T_{air}\left(0.8 + \left(\frac{T_{rose} + 273.15}{250}\right)^{0.25}\right) \tag{2.9}$$

où

R_{atm} est le rayonnment infrarouge absorbé de l'atmosphère (W/m^2) ;

T_{ciel} est la température du ciel (^{o}C) ;

T_{rose} est la température du rosée ou point de rosée (^{o}C).

Le transfert de chaleur a lieu dans deux domaines : le domaine de la chaussée où la conduction de transfert de chaleur est résolue et le domaine de l'eau où les termes convectifs sont prises en compte (figure 2.18).

Équation de conservation d'énergie

- dans la chaussée:

$$(\rho C_p)_s \frac{\partial T_{ch}}{\partial t} + \nabla \left(-\lambda_s \nabla T_{ch}\right) = 0 \tag{2.10}$$

- dans les tubes:

$$(\rho C_p)_l \frac{\partial T_l}{\partial t} + \nabla \left(-\lambda_l \nabla T_l\right) = -(\rho C_p)_l V \nabla T_l \tag{2.11}$$

$(\rho C_p)_l$ est la capacité thermique volumique de l'eau (J/m^{3}K) ;
$(\rho C_p)_s$ est la capacité thermique volumique de la chaussée (J/m^{3}K) ;
T_{ch} est la température de la chaussée (^{o}C) ;
T_l est la température de l'eau circulant dans le tube (^{o}C) ;
λ_s est la conductivité thermique de la chaussée (W/m.K) ;
λ_l est la conductivité thermique du fluide (W/m.K) ;
V est la vitesse de circulation de leau (m/s).

Conditions de bords

- surface de la chaussée:

$$-n\left(-\lambda_s \nabla T_s\right) = h_v\left(T_s - T_{air}\right) + \sigma\varepsilon\left((T_{ciel} + 273.15)^4 - (T_s + 273.15)^4\right) + \alpha q_i \tag{2.12}$$

- chaussée-eau:

$$-\lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial n} + \rho_l (C_p)_l V T_l = -\lambda_s \frac{\partial T_{ch}}{\partial n} \tag{2.13}$$

- eau amont:

$$T = T_{inj} \tag{2.14}$$

- eau aval:

$$-\lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial n} = 0 \tag{2.15}$$

- chaussée en bas:

$$-\lambda_s \frac{\partial T_{ch}}{\partial n} = 0 \tag{2.16}$$

où

T_s est la température de surface de la chaussée (^{o}C) ;

T_{inj} est la température d'injection de l'eau (^{o}C) ;

$\frac{\partial T_{ch}}{\partial n}$ est la dérivée par rapport à la direction normale.

Dans la suite, nous décrivons les différents paramètres influents sur les performances des systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers.

2.4 Performance de systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers

Des études expérimentales ont été réalisées afin d'évaluer la performance des systèmes hydrauliques bitumineux et cimentiers et l'influence des matériaux utilisés, l'espacement des tubes, la profondeur des tubes et la température d'injection du fluide sur l'efficacité de ces systèms [5, 8, 19, 21, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76].

2.4.1 Ajout des aggrégats à haute conductivité thermique

Des modèles numériques et des expérimentations sont faites afin de déterminer la distribution du champ de température dans la chaussée sans circulation de fluide. Les résultats montrent que la conductivité thermique de la chaussée est un paramètre pertinent pour la distribution du champ de température [77, 78]. Dans le but d'augmenter les performances de systèmes de récupération d'énergie, des études ont été menés en ajoutant au mélange bitumineux ou cimentier, des aggrégats de grande conductivité thermique comme le graphite et le quartz [7, 8, 75, 77, 78, 79, 80].

Shaopeng et al [75] ont testé deux échantillons avec et sans graphite qui ont une conductivité thermique de $2,23\,\mathrm{W/m.K}$ et $1,73\,\mathrm{W/m.K}$. Les résultats avec et sans agrégats de haute conductivité ont montré que l'ajout d'agrégats améliore l'efficacité du système [75, 80]. Par la suite le gradient de température dans le corps de chaussée et la température de surface diminuent. En outre, la température augmente avec la profondeur indiquant que le processus de transfert de chaleur est accéléré par l'augmentation de la conductivité thermique. L'augmentation de la conductivité thermique de la couche bitumineuse permet d'accélerer le transfert de chaleur et d'augmenter l'éfficacité de ces systèmes entre 11% et 26% [19, 81, 82].

2.4.2 Arrangements des tubes

Diamètre des tubes. Wang et al (2010) [77] ont étudié numériquement l'effet du diamètre sur la température. Il ont montré que l'augmentation du diamètre provoque une diminution de la température de surface de la chaussée et une augmentation de l'énergie récupérée (figure 2.19).

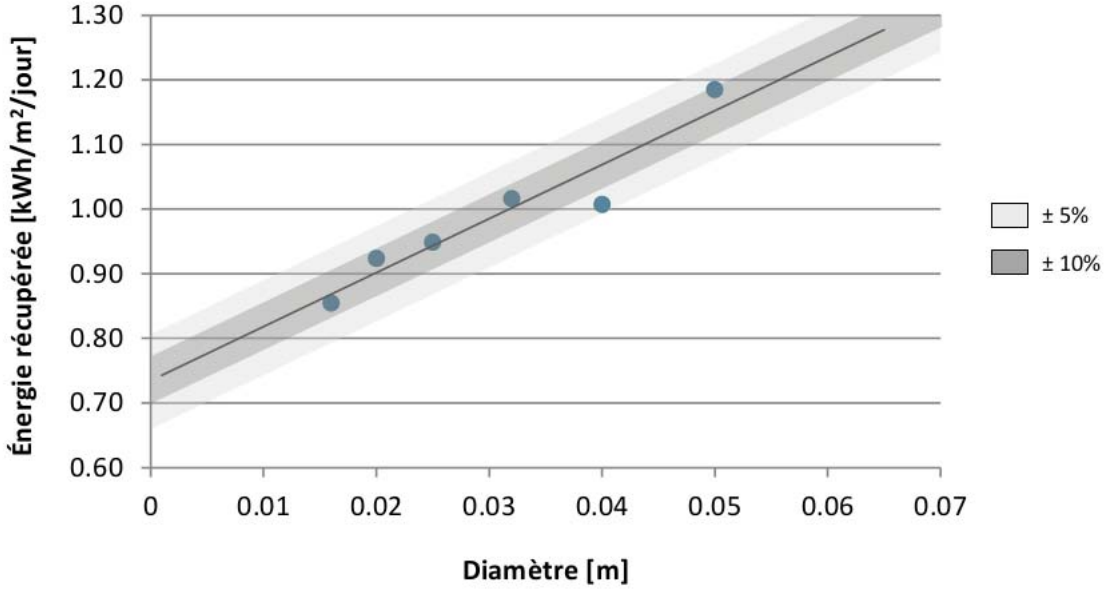


Figure 2.19: Effet du diamètre des tubes sur l'énergie récupérée [83]

Espacement entre les tubes. En général, plus la densité de la canalisation par zone de collection de l'énergie solaire augmente, plus la capacité de collecte de la chaleur augmente (figure 2.20) [21, 77]. Il est nécessaire de déterminer un espacement minimal entre les tubes qui assure la fonte de neige. Cet espacement dépend du diamètre des tuyaus utilisés et du débit [7]. Des critères économiques doivent également être pris en considération pour le choix d'un espacement de tube [21].

Profondeur des tubes. Un gradient thermique est présent dans le corps de la chaussée résultant de la grande différence entre la température de surface soumise au rayonnement solaire et la température à différentes profondeurs. En raison de la convection entre la chaussée et l'environnement, la profondeur optimale pour placer les tuyaux est de 20 mm par rapport à la surface [80]. Plus la profondeur

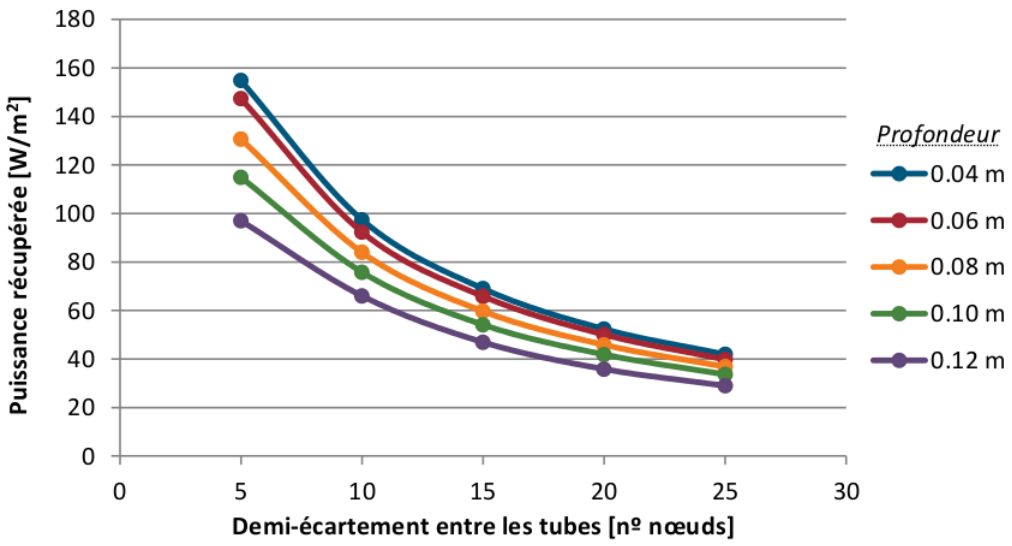


Figure 2.20: Effet de l'espacement entre les tubes sur l'énergie récupérée, en fonction de la profondeur [83]

des tuyaux augmente plus la répartition de la température dans la chaussée devient homogène mais la quantité d'énergie récupérée diminue (voir figure 2.21) [21, 79]. Une distribution plus uniforme de la température peut être réalisée à des profondeurs plus faibles en réduisant l'espacement des tuyaux [21].

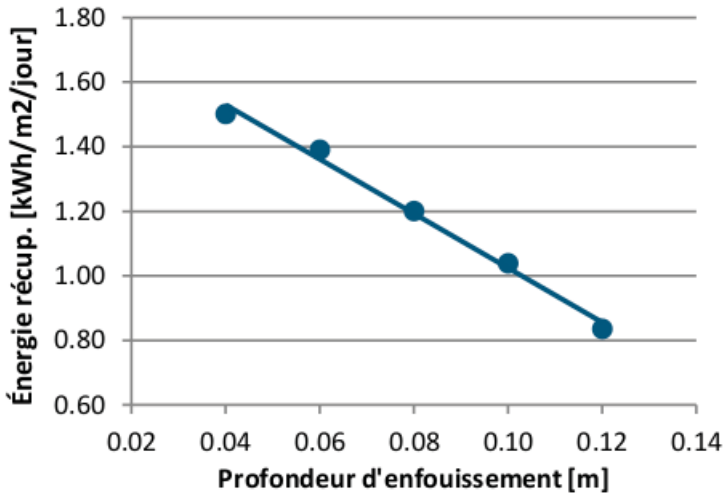


Figure 2.21: Effet de la profondeur des tubes sur l'énergie récupérée [83]

2.4.3 Débit

L'eau est principalement utilisée dans les systèmes hydrauliques (comme fluide caloporteur). L'eau glycolée est généralement utilisée pour éviter le gel de l'eau. D'après les études expérimentales et numériques menées dans [7, 48], la température d'injection est fixée entre 25 ^{o}C et 50 ^{o}C pour le chauffage de la chaussée, alors que la température d'injection pour la récupération de l'énergie varie entre 15 ^{o}C et 25 ^{o}C [7, 19]. Comme mentionné dans [19], l'augmentation du débit accélère le procédé de transfert de chaleur. Pour un tube déterminé, plus le débit augmente plus le procédé de transfert de chaleur s'accélère et plus le gain d'énergie augmente (figure 2.22). Comme indiqué dans les travaux de Mallick et al [68], l'effet de la vitesse d'écoulement est moins important que l'effet des paramètres de tuyau. Lorsque le débit augmente, la différence entre la température d'entrée et la température de sortie diminue. Il a été conclu que l'augmentation du débit n'induit pas forcément une augmentation de l'efficacité du transfert de chaleur [17].

D'après l'analyse des études faites dans la littérature sur l'influence du débit sur les performances du système hydraulique, on peut conclure que :

- plus le débit augmente, plus la température de surface diminue en été [19] ;
- l'augmentation du débit permet d'augmenter le coefficient de transfert de chaleur et augmenter la quantité d'énergie récupérée [19, 84] ;
- plus le débit augmente, plus le temps nécessaire pour que le capteur solaire atteigne l'état d'équilibre diminue. Ce temps n'est pas influencé par la température d'entrée de l'eau [19].

2.4.4 Quantité énergétique récupérée et de chauffage

Les quantités énergétiques récupérées pendant la période estivale d'un système hydraulique bitumineux/cimentiers dépendent de plusieurs paramètres du système : la puissance du rayonnement solaire, la surface du système collecteur d'énergie, le débit, le diamètre et la profondeur des tubes, l'espacement entre les tubes et la température d'injection du fluide. D'après l'étude biliographique, on peut définir une plage de la puissance thermique gagnée entre 150-250 W/m^2 pour une puissance solaire entre 300-1000 W/m^2 [5, 19, 75, 83]. Par suite l'efficacité de ces systèmes pour récuperer l'énergie solaire est de 30% environ.

Pour la période hivernale, les quantités énergétiques pour maintenir la température de la chaussée positive et pour dégeler la route dépendent du climat en plus des paramètres cités précédemment (figure 2.23) : vitesse du vent, température extérieure, présence de neige ou pas, intensité de la chute de neige, durée de chute de neige et date de déclenchement du système de chauffage ("idling time"). Les

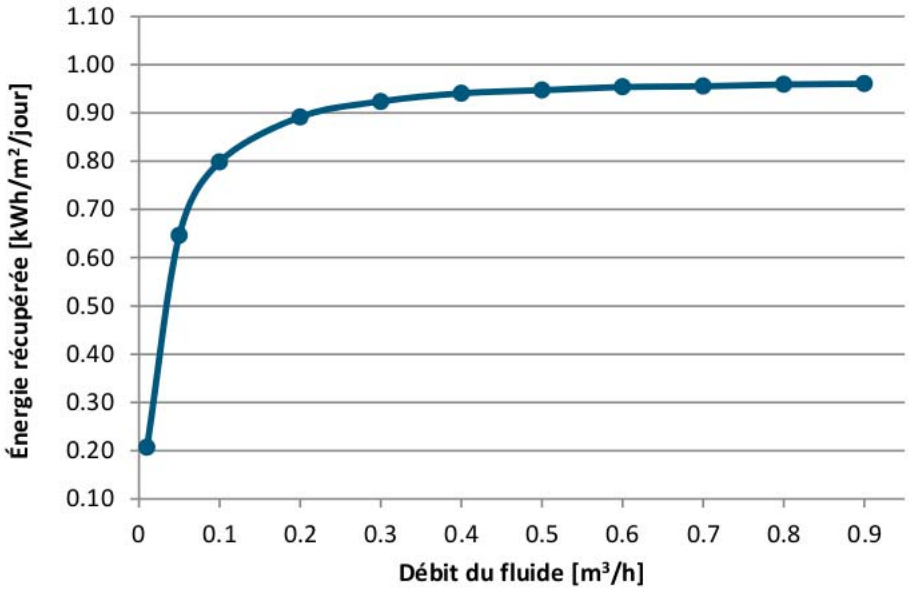


Figure 2.22: Effet du débit sur l'énergie récupérée [83]

données climatiques varient d'un pays à un autre et d'une année à une autre. La détermination des quantités énergétiques est donc relative. D'après l'étude bibliographique, on détermine une plage de puissance de chauffage entre 160 et 1200 W/m^2 [3, 21, 37, 38, 39, 83, 85, 86, 87]. La puissance de chauffage de déverglaçage pour les régions aux États-Unis varie entre 400 et 600 W/m^2 (tableau 2.6) alors que celle pour déneiger et déverglacer la chaussée monte jusqu'à 1200 W/m^2 et plus (tableau 2.7). On peut tirer de ces deux tableaux que plus l'espacement entre les tubes augmente et plus la profondeur d'enfouissement des tubes augmente, plus la puissance de chauffage nécessaire augmente.

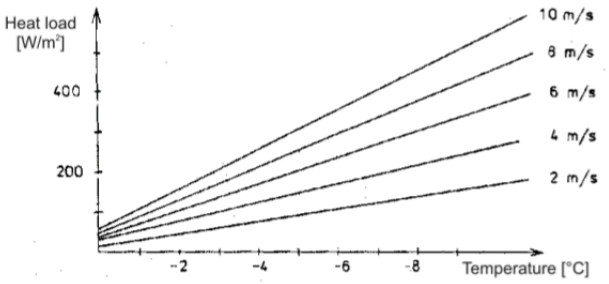


FIGURE 9: Heat load as a function of air temperature and wind velocity (Fjarhitun, 1982)

Figure 2.23: Variation de la puissance énergétique de chauffage en fonction de la température de l'air et la vitesse du vent [39]

profondeur (cm)	espacement (cm)	Spokane (W/m^2)	Reno (W/m^2)	SLC (W/m^2)	Chicago (W/m^2)
5.08	15.24	508	460	400	583
	20.32	609	495	460	656
	30.48	1009	691	634	893
10.16	15.24	997	662	542	735
	20.32	984	672	567	763
	30.48	1009	820	823	911

Tableau 2.6: Variation de la puissance énergétique de chauffage de déverglaçage pour maitenir la température de surface positive en fonction de l'espacement et les profondeurs des tubes pour différentes régions américaines [87]

profondeur (cm)	espacement (cm)	Spokane (W/m^2)	Reno (W/m^2)	SLC (W/m^2)	Chicago (W/m^2)
5.08	15.24	1158	716	460	1079
	20.32	1378	814	495	1256
	30.48	2328	1173	602	1943
10.16	15.24	1650	930	527	1672
	20.32	1889	950	527	1776
	30.48	2694	1114	580	2388

Tableau 2.7: Variation de la puissance énergétique de chauffage pour dégeler le manteau neigeux de la chaussée en fonction de l'espacement et les profondeurs des tubes pour différentes régions américaines [87]

D'après les études sur les systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers utilisant des tubes, on peut conclure que les perfomances de ces systèmes dépendent des différents paramètres que sont le débit, l'espacement entre les tubes, la profondeur et les diamètres des tubes. En plus le rendement énergétique de ces systèmes est de 30%. Afin d'augmenter le rendement de récupération d'énergie solaire, nous proposons dans la suite de ce travail d'utiliser des systèmes hydrauliques bitumineux dans une couche de chaussée drainante.

2.5 Systèmes hydrauliques bitumineux dans une couche de chaussée drainante

2.5.1 Concept du dispositif des systèmes hydrauliques aux travaux d'une couche de chaussée drainante

Le concept du présent travail vise à utiliser une couche drainante avec une porosité élevée de 20% avec un dévers β. Grâce au dévers de la chaussée, un fluide caloporteur

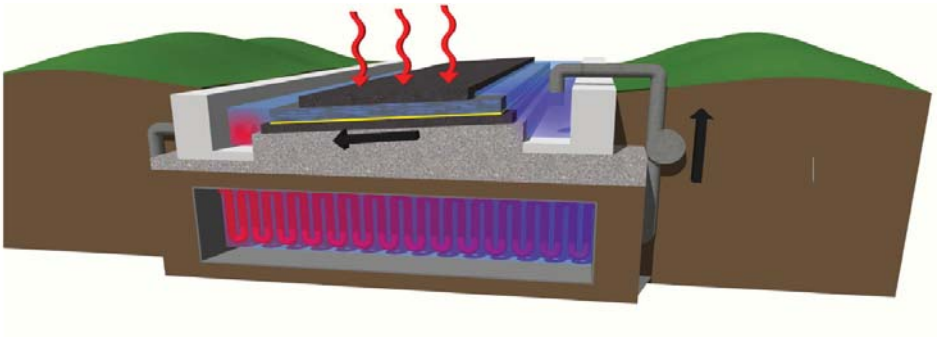


Figure 2.24: Concept de fonctionnement du système hydraulique dans une couche de laison drainante

injecté en partie amont doit pouvoir circuler dans les pores tout au long de la chaussée et sera récupéré en aval (figure 2.24). Ce fluide en circulant récupère l'énergie thermique de la chaussée pendant l'été et apporte de l'énergie pendant l'hiver.

On étudie la fonction d'échangeur thermique et le transfert du chaleur dans le corps de la chaussée. Le fonctionnement de ce dispositif dépend des paramètres thermiques, hydrauliques de la chaussée et de l'environment. L'objectif de notre travail est de maintenir la température de surface de la chaussée positive pendant l'hiver en récupérant l'énergie solaire pendant l'été. On cherche à étudier les performances de ce système et à déterminer son rendement énergétique à l'aide du développement d'un modèle du couplage thermo-hydraulique.

L'étude bibliographique sur les systèmes de chauffage et de récupération d'énergie montre la présence de dispositif utilisant des tuyaux insérés dans le corps de chaussée pour la circulation du fluide. En 2013 et 2014, deux articles [88, 89] que nous décrivons dans les paragraphes 2.5.2 et 2.5.3 ont présenté respectivement des systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers dans une couche de chaussée drainante. À notre connaissance, il s'agit des seuls travaux, publiés à ce jour. Le travail a cependant été limité à une étude expérimentale de la fonction échangeur thermique et à une étude des propriétés mécaniques de la couche drainante.

2.5.2 Travaux sur l'échangeur thermique

2.5.2.1 Introduction

On décrit ici les travaux de [88]. Un prototype de capteur solaire bitumineux à trois couches a été construit en laboratoire. Les dimensions de la dalle sont 40x26x9 cm^3 (longueur x largeur x épaisseur). Deux différents modèles de ce prototype ont été fabriqués, qui diffèrent par la porosité de la couche intermédiaire : 23% et 27% de vides. Cette couche est constituée d'un mélange très poreux d'épaisseur 4 cm et des

granulats de 16 mm de diamètre. La couche supérieure est un enrobé bitumineux très mince (BBTM) de 2 cm d'épaisseur.

Ce dispositif permet au fluide de circuler à travers la couche intermédiaire du prototype de capteur solaire, tout en gardant le gradient hydraulique constant dans le temps. Il est également capable de réguler la charge hydraulique à l'entrée (H_{in}) et à sortie (H_{out}) afin d'établir les différents régimes de charge hydraulique (figure 2.25). Une lampe de simulateur solaire est utilisée comme source de chaleur (W/m^2).

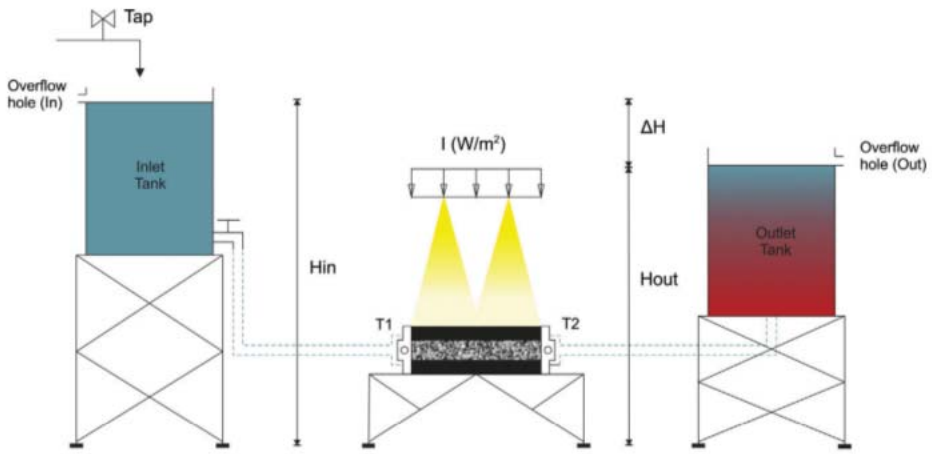


Figure 2.25: Schéma du montage expérimental [88]

Dans l'article, les auteurs étudient l'influence de la porosité de la couche intermédiaire et du rayonnment solaire sur la quantité d'énergie récupérée. Ils ont testé sur 6h, le rendement énergétique des deux prototypes (porosité 23% et 27%) pour trois puissances solaires : 300, 370 et 440 W/m^2. Ces essais sont réalisés en régime permanent.

La figure 2.26 présente l'évolution du gradient thermique $\Delta T = T_{sor-f} - T_{inj}$ pour une puissance de 370 W/m^2 pour les deux prototypes de porosité 23% et 27% (différence de température du fluide entre la sortie et l'injection). La relation entre l'énergie absorbée par la surface du collecteur et l'énergie gagnée par l'eau est illustrée dans la figure 2.27. On a une excellente efficacité thermique (rapport entre l'énergie gagnée par le fluide et l'énergie solaire appliquée) variant entre 75% et 95% pour une porosité de 27% dépendant de l'éclairement de la lampe solaire.

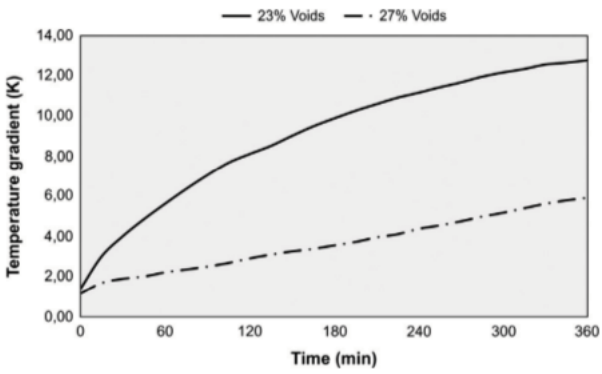


Figure 2.26: Influence de la porosité sur le gradient de température [88]

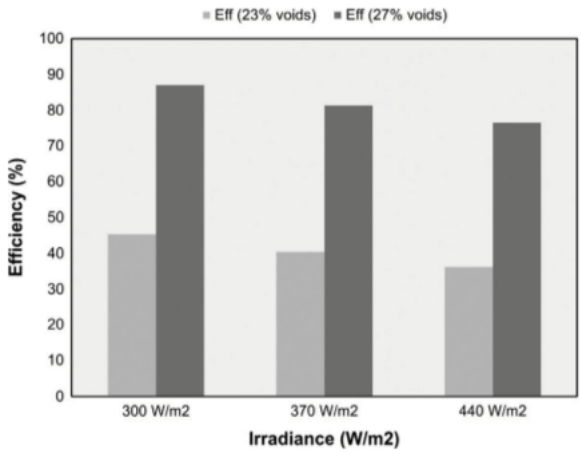


Figure 2.27: Influence de la porosité et de la puissance solaire sur la performance énergétique du système [88]

2.5.3 Travaux sur les aspects mécaniques

On décrit les travaux de [89]. Dans cet article les auteurs étudient une maquette de laboratoire (figure 2.28) la construction de la couche poreuse intermédiaire et sa durabilité, son comportement de déformation, sa perméabilité à l'eau et l'efficacité thermique de ce système.

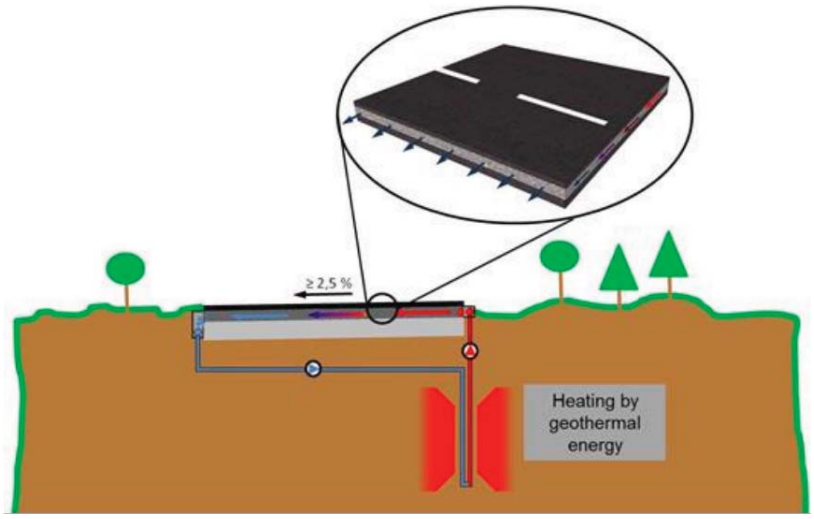


Figure 2.28: Schéma du concept de l'application d'une couche poreuse dans la chaussée [89]

Le concept a été testé sur des prototypes tricouches à une échelle de laboratoire. La couche intermédiaire poreuse a une épaisseur de 40 mm et a été posée sur le dessus d'une couche bitumineuse de 30 mm d'épaisseur. La couche de roulement a une épaisseur de 20 mm. Deux types de couche intermédiaire ont été testés : enrobé avec liant polyuréthane de 30% de porosité (figure 2.29) et enrobé bitumineux de 22.5% de porosité (figure 2.30)

Figure 2.29: Prototype tricouche avec couche intermédiaire au liant en polyuréthane [89]

Figure 2.30: Prototype tricouche avec couche intermédiaire bitumineuse [89]

Le test de perméabilité à l'eau de la couche poreuse montre que les éprouvettes avec intercouche de polyuréthane ont une perméabilité à l'eau plus élevée que les échantillons d'essai avec une couche intermédiaire bitumineuse. D'une part, cela peut être expliqué par les différents contenus des vides (intercouche bitumineuse 22.5% et intercouche polyuréthane 30%). D'autre part, ceci pourrait également être dû à l'épaisseur de la couche inférieure efficace de la couche intermédiaire bitumineuse. Pendant la production une forte déformation a été détectée lorsque la couche superficielle a été appliquée. En revanche, l'intercouche de polyuréthane n'a pas indiqué de tels effets. Ainsi, l'utilisation d'une couche intermédiaire de polyuréthane est recommandée en termes de perméabilité à l'eau.

Le test du comportement à la déformation de la couche poreuse montre que les échantillons d'essai avec une couche intermédiaire de polyuréthane ont un meilleur comportement à la déformation que les éprouvettes avec une couche intermédiaire constituée par un liant bitumineux.

Des essais pour tester l'efficacité thermique faits dans une chambre climatique avec une température ambiante constante de $-5\,^{o}$C montre qu'une température de fluide de $10\,^{o}$C permet de maintenir la température de surface supérieure à $5\,^{o}$C après 13 minutes de la mise en marche du système.

Les travaux restent très sommaires et aucune modélisation n'est proposée.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur les systèmes de récuperation d'énergie dans les chaussées. Plus particulièrement, nous avons presenté dans le paragraphe 2.2 des systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers pour le chauffage et la récupération d'énergie. Premièrement, on a présenté les différentes composants de ces systèmes, et particulièrement les modèles de transfert d'énergie dans la chaussée.

L'étude des performances de systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers utilisant des tuyaux a permis de montrer que leurs performances pour récupérer l'énergie solaire est de 30%, ce qui est beaucoup plus faible que celui utilisant un système hydraulique bitumineux à couche drainante. Les performances de ce dernier varient entre 75% et 95% (section 2.5.2), ce qui met en lumière l'intérêt d'étudier ces nouveaux systèmes plus profondément.

Seuls des travaux récents (2013 et 2014) étudient expérimentalement les systèmes hydrauliques à couche drainante. Les auteurs ont montré que les performances énergétiques des ces systèmes dépendent de la porosité de la couche drainante et du rayonnement solaire. Les quantités d'énergie de chauffage n'ont pas été étudiées. Les travaux de cette thèse abordent toutes ces questions, par la modélisation et des expérimentations. Enfin Sacht et al [89] ont étudié la résistance mécanique de cette nouvelle structure de chaussée.

Dans ce qui suit, on cherche à étudier expérimentalement et en vraie grandeur ce système hydraulique bitumineux innovant et à développer un modèle de simulation afin d'étudier tous les paramètres influents sur ce système et de dégager des quantités énergétiques de chauffage et de récupération d'énergie.

Dans le chapitre qui suit, un modèle thermo-hydraulique est développé.

3 Comportement thermo-hydraulique d'une chaussée avec couche drainante

3.1 Introduction

À la fin du chapitre précédent, nous avons présenté un système de récupération et de chauffage d'une chaussée par circulation d'un fluide dans une couche drainante. Afin de pouvoir évaluer un tel système d'un point de vue énergétique, il est indispensable de développer des modèles thermiques. C'est l'objet du présent chapitre.

Premièrement, un rappel sur l'écoulement dans un milieu poreux est présenté afin de déterminer les caractéristiques de circulation du fluide et de tirer l'équation d'échange énergétique dans ce milieu. Puis, on présente le modèle thermo-hydraulique que l'on étudie dans la suite de ce travail pour la structure de chaussée comportant une couche de liaison drainante. Ensuite, une étude de sensibilité des différents paramètres d'entrée du modèle (thermiques, hydrauliques et de surface) est réalisée pour étudier leur influence sur la température de surface. En effet, la température de surface est la grandeur d'intérêt, au moins pour la mise hors-gel de la surface de la chaussée.

3.2 Milieu poreux

3.2.1 Définition du milieu poreux

Un milieu poreux est constitué d'une matrice solide et de pores. Ces pores peuvent être occupés par de l'air, ou de l'eau (figure 3.1). Lorsque ces pores sont remplis d'eau, on dit que le milieu est saturé. Le milieu non saturé est caractérisé par une saturation comprise entre 0 et 1.

On dit qu'un milieu poreux est homogène si en n'importe quel point, la résistance à l'écoulement d'un fluide dans une direction donnée est la même [90].

Un milieu poreux est dit isotrope si toutes les propriétés caractérisant ce milieu, dont la résistance à l'écoulement d'un fluide, sont identiques dans toutes les directions.

Il faut noter que la plupart des milieux poreux naturels sont anisotropes, autrement dit leurs propriétés dépendent de la direction d'observation [90, 91].

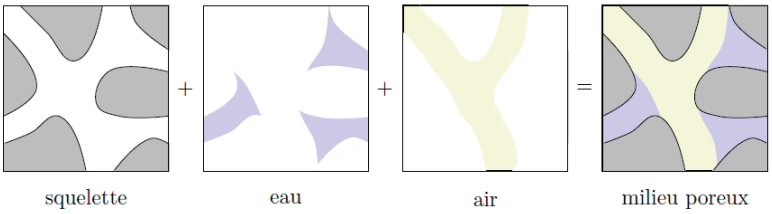


Figure 3.1: Schéma d'un milieu poreux contenant de l'eau et de l'air [91]

Les caractéristiques d'un milieu poreux sont:

- la saturation S [m^3/m^3] d'un fluide. C'est le rapport entre le volume de ce fluide et le volume des pores dans un volume élémentaire représentatif du milieu. Ce paramètre est compris entre 0 et 1.
- La perméabilité intrinsèque k_{int} [m^2] [92]. Elle représente la matrice solide face à un fluide. Elle est en quelque sorte représentative de sa potentialité de frottements. Elle est fonction des caractéristiques du sol comme la granulométrie, la structure du sol, la distribution des pores, la tortuosité, etc. La perméabilité représente les caractéristiques intrinsèques d'un milieu à laisser circuler tout fluide. La perméabilité peut être considérée comme significative de la surface utilisable pour l'écoulement, il s'agit donc d'une caractéristique du sol, qui s'exprime en m^2.
- la perméabilité relative kr [$-$] d'un fluide donné. Elle varie en fonction de la saturation dans le milieu et traduit l'aptitude de ce fluide à s'écouler. La perméabilité relative est une quantité scalaire.
- l'indice des vides à l'échelle d'un volume élementaire e [$-$]. C'est le rapport entre le volume des vides v_v et le volume des grains dans ce milieu v_g :

$$e = \frac{v_v}{v_g}$$

- la porosité ϕ [$-$]. C'est le rapport entre le volume des vides v_v et le volume total du milieu v :

$$v = v_v + v_g$$
$$\phi = \frac{v_v}{v}$$

La simulation numérique directe des flux hydrauliques dans un milieu poreux est difficile à effectuer en raison de son hétérogénéité à moyenne échelle et aussi de la complexité des systèmes dynamiques.

La modélisation d'écoulement peut s'effectuer à deux échelles (figure 3.2):

- échelle microscopique ou échelle des pores ;
- échelle mascroscopique ou échelle de Darcy.

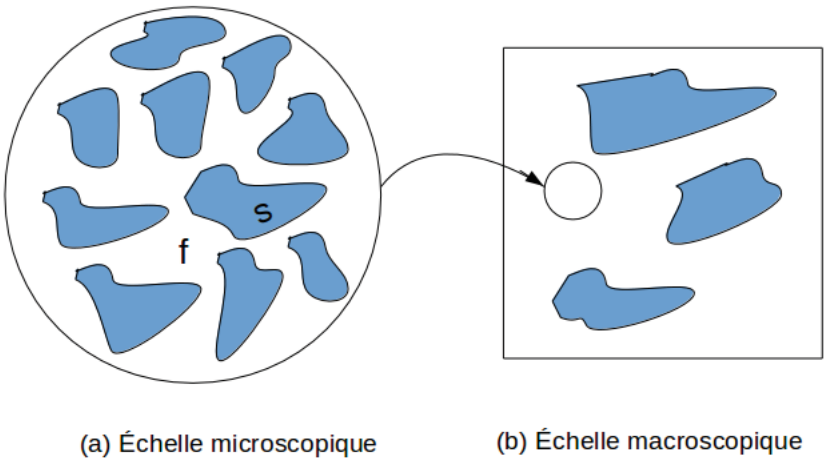


Figure 3.2: Exemple d'un système multi-échelle [93] : l représente la phase liquide et s la phase solide

3.2.2 Échelle microscopique

La description à l'échelle microscopique [93] se concentre sur le comportement d'un grand nombre de molécules représentant les phases (par exemple : la phase solide (s) et la phase liquide (l) représentée dans la figure 3.2 a)). Les équations décrivant leurs transports sont les suivantes :

- les équations de bilan de masse pour tous les composants ;
- les équations de Navier-Stokes décrivant l'équilibre dynamique ;
- l'équation de transfert de chaleur dans le cas de présence de gradient de température dans le système (source de chaleur, excitation thermique, ...).

3.2.3 Échelle macroscopique

La résolution directe des équations microscopiques sur un volume contenant un petit nombre de pores est généralement possible. Dans la pratique, il doit y avoir une

description macroscopique représentant le comportement effectif du milieu poreux destiné à un volume élémentaire representatif (VER) contenant de nombreux pores [93]. De nombreuses techniques ont été utilisées pour passer de l'échelle des pores à l'échelle du VER. L'intégration sur un VER (appelée technique d'étalement du volume) des équations microscopiques de conservation permet d'obtenir des équations macroscopiques qui sont valables pour les variables moyennes appelées variables macroscopiques. À l'échelle macroscopique, la description de l'écoulement de phases introduit des nouvelles équations qui sont les équations macroscopiques de l'équilibre de masse et d'énergie.

Dans la suite, nous présentons le modèle thermo-hydraulique d'écoulement dans une chaussée drainante poreuse. Ce modèle est basé sur les équations de diffusion-convection à l'échelle macroscopique. Nous décrivons le passage des équations de l'échelle microscopique en représentation eulérienne à l'échelle macroscopique afin d'obtenir les équations globales de transfert de chaleur et la loi d'écoulement de Darcy.

3.3 Modèle thermo-hydraulique d'une chaussée drainante poreuse

3.3.1 Mouvement laminaire et mouvement turbulent

La distinction entre les deux types de mouvement qui se produisent dans les fluides réels donne une idée sur les difficultés que soulèvent les analyses théoriques dans le domaine des fluides en mouvement.

En effet, il existe deux types de mouvements des fluides : le mouvement laminaire, où chaque particule décrit une trajectoire bien définie et est animée d'une vitesse uniquement dans le sens de l'écoulement ; le mouvement turbulent où chaque particule est animée d'un mouvement d'agitation avec des vitesses transversales à l'écoulement.

Les expériences réalisées par Reynolds (1883), lors de l'écoulement d'un fluide dans une conduite cylindrique rectiligne, ont montré l'existence de deux régimes d'écoulement : laminaire et turbulent. En utilisant des fluides de viscosités différentes, en faisant varier le débit et le diamètre de la canalisation, Reynolds a montré que le paramètre qui permettait de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent est un nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds Re donné par la relation [90] :

$$Re = \frac{\rho_l V_m D}{\mu_l}$$

V_m est la vitesse moyenne (m/s) ;

D est le diamètre de la conduite (m) ;

μ_l est la viscosité dynamique du fluide (kg/m.s).

L'expérience montre que :

- si $Re < 2000$, le régime est laminaire ;
- si $2000 < Re < 3000$, le régime est intermédiaire ;
- si $Re > 3000$, le régime est turbulent.

3.3.2 Cinématique d'écoulement

La cinématique est l'étude des fluides en mouvement independamment des forces qui les mettent en mouvement. Les différents types d'écoulement sont :

- écoulement à surface libre : lorsqu'un fluide s'écoule en contact avec l'atmosphère ;
- écoulement en charge : lorsque le fluide circule dans un tuyau fermé, à des pressions qui diffèrent de celle de la pression atmosphérique ;
- écoulement en un milieu poreux ou écoulement en filtration.

Si les caractéristiques de l'écoulement en chaque point sont fonction du temps, on parle d'un régime variable, sinon on a un régime permanent dont l'écoulement est indépendant de la variable temporelle.

3.3.3 Conservation de la masse à l'échelle microscopique

L'équation de continuité de l'écoulement de fluide à l'échelle microscopique est déterminée par les équations de Stokes écrites sous la forme [94] :

$$0 = -\nabla p_l + \rho_l \mathbf{g} + \mu_l \nabla^2 \mathbf{V_l} \;\; pour\, la\, phase\, l \tag{3.1}$$

$$\nabla . \mathbf{V_l} = 0 \;\; pour\, la\, phase\, l \tag{3.2}$$

où

p_l est la pression du fluide (Pa) ;

μ_l est la viscosité dynamique du fluide (kg/m.s) ;

$\mathbf{g}$ est l'accélération de la pesanteur (m/s^2) ;

$\mathbf{V_l}$ est la vitesse du fluide à l'échelle microscopique (m/s).

À noter que les grandeurs scientifiques en gras correspondent à des grandeurs vectorielles. En appliquant la méthode de volume moyen sur l'équation (3.2) de l'équilibre dynamique pour un régime laminaire, on obtient l'équation de Darcy décrivant l'écoulement à l'échelle macroscopique.

3.3.4 Conservation de l'énergie à l'échelle microscopique

Nous considérons dans cette étude un fluide circulant à travers un milieu poreux soumis à un gradient thermique. Ce système est illustré dans la figure 3.3, la phase liquide est identifiée comme la phase l tandis que le solide rigide et imperméable est représenté par la phase s. Le transport de l'énergie à l'échelle des pores est décrit par les équations suivantes pour le fluide (phase l) et le solide (phase s) ([93]) :

$$(\rho C_p)_l \frac{\partial T_l}{\partial t} + (\rho C_p)_l \nabla.(T_l \mathbf{V_l}) = \nabla.(\lambda_l \nabla T_l), \ \ pour \ \ la \ \ phase \ \ l \tag{3.3}$$

$$(\rho C_p)_s \frac{\partial T_{ch}}{\partial t} = \nabla.(\lambda_s \nabla T_{ch}), \ \ pour \ \ la \ \ phase \ \ s \tag{3.4}$$

où

$(\rho C_p)_l$ est la capacité thermique volumique du fluide (J/m^{3}K) ;

$(\rho C_p)_s$ est la capacité thermique volumique du solide (J/m^{3}K) ;

T_{ch} est la température du solide (^{o}C) ;

T_l est la température du fluide (^{o}C) ;

λ_l est la conductivité thermique du fluide (W/m.K) ;

λ_s est la conductivité thermique du solide pour un milieu homogène et isotrope (W/m.K) ;

$\mathbf{V_l}$ est la vitesse de circulation de l'eau à l'échelle microscopique (m/s).

Les termes $(\rho C_p)_l \frac{\partial T_l}{\partial t}$ et $\nabla.(\lambda_l \nabla T_l)$ des équations (3.3) et (3.4) représentent l'échange thermique par conduction alors que le terme $(\rho C_p)_l \nabla.(T_l \mathbf{V_l})$ représente l'échange thermique par convection apporté par l'écoulement du fluide.

La thermique d'un milieu est basée sur l'étude des échanges énergétiques qui se font dans ce milieu entre ses différents constituants d'une part et entre ce milieu et le milieu extérieur d'autre part [92]. Le transfert de chaleur se fait sous trois formes : énergie radiative, énergie thermique et chaleur latente. On distingue deux types d'échanges thermiques : l'échange externe et interne. L'échange externe se produit sous toutes les formes d'échanges alors que l'échange interne dans le sol lui même s'effectue sous forme de transfert d'énergie thermique par conduction ou par convection. Les paramètres caractéristiques du milieu permettent de décrire et de caractériser l'échange de chaleur qui se produit dans ce milieu.

L'échange thermique interne $\mathbf{J_T}$ dans un milieu est la somme de deux termes ([92]) :

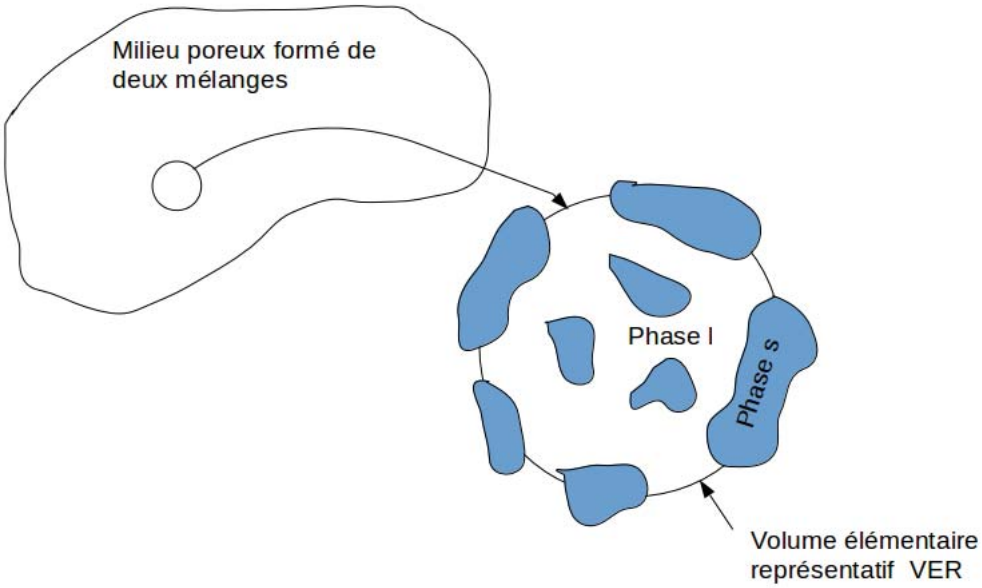


Figure 3.3: Représentation du milieu poreux [93]

$$\mathbf{J_T} = \mathbf{J_D} + \mathbf{J_V} \; [J/m^2 s] \equiv [W/m^2] \tag{3.5}$$

On cherche à expliciter et définir les différents termes des équations d'échange thermique (équations (3.3) et (3.4)).

Transfert par conduction. Le transfert de chaleur par conduction ou diffusion $\mathbf{J_D}$ est un processus de transfert d'énergie qui s'effectue de proche en proche entre les particules d'un milieu. Il se produit une fois qu'il y a un gradient thermique. Par la suite, le transfert d'énergie se fait de la région de haute température vers la région de basse température jusqu'à atteindre l'équilibre thermique. Ce terme de diffusion est exprimé selon la loi de Fourier [92] :

$$\mathbf{J_D} = -\lambda \, \nabla T \tag{3.6}$$

Le coefficient de Fourier ou conductivité thermique λ représente la tolérance du matériau à propager la chaleur par conduction thermique.

Transfert par convection. Le transfert de chaleur par convection s'effectue entre les particules solides et le fluide en mouvement au niveau de la frontière séparant

ces deux constituants. La densité de chaleur interstitielle δ_{Ti} exprime la quantité de transfert de chaleur qui peut être échangée entre le solide et le fluide, par unité de volume du fluide transporteur. Elle s'exprime par [92] :

$$\delta_{Ti} = (\rho C_p)_l (T_{ch} - T_l) \quad [\mathrm{J/m^3}] \tag{3.7}$$

3.3.5 Méthode du volume moyen

Parce que la résolution directe des équations de convection-diffusion (équations (3.3) et (3.4)) est en général impossible en raison de la géométrie complexe du milieu poreux, les équations décrivant les vitesses, les caractéristiques thermiques et hydrauliques moyennes doivent être développées afin de résoudre les équations de convection-diffusion. Le volume moyen associé v, est représenté sur la figure 3.3. Le développement des équations dans un volume moyen local exige la définition de deux types de moyennes en termes de volume moyen : moyenne superficielle et moyenne intrinsèque. Pour toute quantité scalaire ξ_l associée à la phase l, la moyenne superficielle est définie [93] :

$$\langle \xi_l \rangle = \frac{1}{v} \int_{v_l} \xi_l dv \tag{3.8}$$

où

v est le volume total ($\mathrm{m^3}$) ;

v_l est le volume de la phase liquide ($\mathrm{m^3}$) ;

$\langle\ \rangle$ moyenne superficielle.

On définit la seconde moyenne, dite intrinsèque à la phase, définie par:

$$\langle \xi_l \rangle^l = \frac{1}{v_l} \int_{v_l} \xi_l dv \tag{3.9}$$

où

$\langle\ \rangle^l$ désigne l'opérateur de moyenne intrinsèque de la phase l.

Ici, on a utilisé v_l pour représenter le volume de la phase l contenue dans le volume moyen. Ces deux moyennes sont liées par :

$$\langle \xi_l \rangle = \phi_l \langle \xi_l \rangle^l \tag{3.10}$$

où ϕ_l est la fraction volumique de la phase l, définie par $\phi_l = \frac{v_l}{v}$.

D'après le diagramme de la figure 3.3 on peut voir que la somme des fractions de volume des deux phases satisfait :

$$\phi_l + \phi_s = 1 \tag{3.11}$$

où

ϕ_s est la fraction volumique de la phase s ;

$\phi_s = \frac{v_s}{v}$.

Afin de mener à bien les procédures de calcul des moyennes nécessaires pour tirer les équations différentielles régissant les champs moyens intrinsèques, on a besoin d'appliquer le théorème moyen spatial, écrit ici pour toute quantité scalaire ξ_l associée à la phase l [94] :

$$\langle \nabla \xi_l \rangle = \nabla \langle \xi_l \rangle + \frac{1}{v} \int_{A_{ls}} \mathbf{n_{ls}} \xi_l dq \tag{3.12}$$

où

$\mathbf{n_{ls}}$ est le vecteur normal unitaire dirigé de la phase l vers la phase s ;

A est la surface moyenne (m^2) ;

A_{ls} est la surface de l'interface l-s (fluide-solide) (m^2).

Après avoir appliqué la méthode du volume moyen, la forme finale des équations de transport contient des moyennes locales.

3.3.6 Conservation de la masse à l'échelle macroscopique

En utilisant la méthode du volume moyen, on obtient [94] :

$$\langle \nabla . \mathbf{V_l} \rangle = \nabla . \langle \mathbf{V_l} \rangle + \frac{1}{v} \int_{A_{ls}} \mathbf{n_{ls}} . \mathbf{V_l} dq \tag{3.13}$$

Par la suite, on obtient l'équation de continuité à l'échelle macroscopique [94] :

$$\nabla . \langle \mathbf{V_l} \rangle = 0 \tag{3.14}$$

L'équation moyenne superficielle de Stokes peut être écrite sous la forme [94] :

$$0 = -\langle \nabla p_l \rangle + \langle \rho_l \mathbf{g} \rangle + \langle \mu_l \nabla . \nabla \mathbf{V_l} \rangle \tag{3.15}$$

Les variations de la densité et de la viscosité en appliquant la méthode du volume moyen peuvent être négligées [94], ce qui donne :

$$0 = -\langle \nabla p_l \rangle + \phi \rho_l \mathbf{g} + \mu_l \langle \nabla . \nabla \mathbf{V_l} \rangle \tag{3.16}$$

Le gradient moyen de la pression peut être écrit par [94] :

$$\langle \nabla p_l \rangle = \nabla \langle p_l \rangle + \frac{1}{v} \int_{A_{ls}} \mathbf{n_{ls}} p_l dq \tag{3.17}$$

Pour obtenir la pression moyenne intrinsèque, on utilise [94] :

$$\langle p_l \rangle = \phi_l \langle p_l \rangle^l \tag{3.18}$$

Par la suite le gradient de pression moyen peut être écrit par [94] :

$$\langle p_l \rangle \langle \nabla p_l \rangle = \phi_l \nabla \langle p_l \rangle^l + \langle p_l \rangle^l \nabla \phi_l + \frac{1}{v} \int_{A_{ls}} \mathbf{n_{ls}} p_l dq \tag{3.19}$$

La pression et la vitesse peuvent être décomposées sous cette forme [94] :

$$p_l = \langle p_l \rangle^l + \widetilde{p}_l, \;\; \mathbf{V_l} =< \mathbf{V_l} >^l + \widetilde{\mathbf{V_l}} \tag{3.20}$$

On aura ensuite [94] :

$$0 = -\phi_l \nabla \langle p_l \rangle^l + \phi_l \rho_l \mathbf{g} + \mu_l \langle \nabla . \nabla \mathbf{V_l} \rangle - \frac{1}{v} \int_{A_{ls}} \mathbf{n_{ls}} \widetilde{p}_l dq \tag{3.21}$$

Finalement, on obtient l'équation de Stokes appliquée à un volume moyen [94] :

$$0 = -\nabla \langle p_l \rangle^l + \rho_l \mathbf{g} + \mu_l \nabla^2 \langle \mathbf{V_l} \rangle^l + \frac{1}{v_l} \int_{A_{ls}} \mathbf{n_{ls}} . \left(-\mathbf{I} \widetilde{p}_l + \mu_l \nabla \widetilde{\mathbf{V_l}} \right) dq \tag{3.22}$$

Cette équation d'après [94] peut être écrite sous la forme :

$$0 = -\nabla\langle p_l\rangle + \rho_l \mathbf{g} + \mu_l \nabla^2 \langle \mathbf{V_l}\rangle^l + \mu_l \left\{ \frac{1}{v_l} \int_{A_{ls}} \mathbf{n_{ls}}.\left(-\mathbf{I}\,\mathbf{b_l} + \nabla \mathbf{B_l}\right)\, dq \right\}.\langle \mathbf{V_l}\rangle^l \quad (3.23)$$

où $\widetilde{\mathbf{V_l}} = \mathbf{B_l}.\langle \mathbf{V_l}\rangle^l$ et $\widetilde{p_l} = \mu_l \mathbf{b_l}.\langle \mathbf{V_l}\rangle^l$

$$\frac{1}{v_l} \int_{A_{ls}} \mathbf{n_{ls}}.\left(-\mathbf{I}\,\mathbf{b_l} + \nabla \mathbf{B_l}\right) dq = -\phi_l \mathbf{K_l^{-1}} \quad (3.24)$$

où $\mathbf{K^{-1}}$ est le tenseur de perméabilité.

Par la suite, la vitesse superficielle apparente est exprimée par [94]:

$$\langle \mathbf{V_l}\rangle = -\frac{\mathbf{K_l}}{\mu_l}.\left(\nabla\langle p_l\rangle^l - \rho_l \mathbf{g}\right) + \mathbf{K_l}.\nabla^2 \langle \mathbf{V_l}\rangle^{\mathbf{l}} \quad (3.25)$$

Cette vitesse est la vitesse de Darcy avec la correction de Brinkman. Ce terme est négligeable devant les autres grandeurs [94]. Par suite, on obtient la vitesse de Darcy :

$$\langle \mathbf{V_l}\rangle = -\frac{\mathbf{K_l}}{\mu_l}.\left(\nabla\langle p_l\rangle^l - \rho_l \mathbf{g}\right) \quad (3.26)$$

3.3.7 Equation de diffusion-convection : l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique

La méthode de la moyenne volumique commence par former la moyenne superficielle des équations (3.3) et (3.4), dans le cas d'un milieu homogène pour la phase l [93] :

$$\left\langle (\rho C_p)_l \frac{\partial T_l}{\partial t}\rangle + \langle (\rho C_p)_l \nabla (T_l \mathbf{V_l}) \right\rangle = \langle \nabla(\lambda_l \nabla T_l)\rangle, \ \textit{pour la phase } l \quad (3.27)$$

$$(\rho C_p)_l \frac{\partial}{\partial t}\langle T_l\rangle + (\rho C_p)_l \nabla\langle \mathbf{V_l} T_l\rangle + \frac{1}{v}\int_{A_{ls}} \mathbf{n_{ls}} \mathbf{V_l} T_l dq = \nabla\langle \lambda_l \nabla T_l\rangle + \frac{1}{v}\int_{A_{ls}} \mathbf{n_{ls}} \lambda_l \nabla T_l dq \quad (3.28)$$

Et, avec la décomposition spatiale de la température et de la vitesse pour la phase l

$$\tilde{T_l} = T_l - \langle T_l \rangle^l, \;\; \tilde{\mathbf{V_l}} = \mathbf{V_l} - \langle \mathbf{V_l} \rangle^l, \;\; \langle \tilde{\mathbf{V_l}} \rangle = 0, \;\; \langle \tilde{T_l} \rangle = 0 \tag{3.29}$$

où

$\langle T_l \rangle^l$ est la température moyenne intrinsèque dans la phase l (^{o}C) ;

$\tilde{T_l}$ est la déviation spatiale de la température dans la phase l (^{o}C) ;

$\langle \mathbf{V_l} \rangle^l$ est la vitesse moyenne intrinsèque dans la phase l (m/s) ;

$\tilde{\mathbf{V_l}}$ est la déviation spatiale de la vitesse dans la phase l (m/s).

On obtient:

$$\phi_l(\rho C_p)_l \frac{\partial}{\partial t}\langle T_l \rangle^l + \phi_l(\rho C_p)_l \langle \mathbf{V_l} \rangle^l \nabla \langle T_l \rangle^l + (\rho C_p)_l \nabla \langle \widetilde{T_l}\widetilde{\mathbf{V_l}} \rangle = \nabla(\lambda_l(\phi_l \nabla \langle T_l \rangle^l + \frac{1}{\nu}\int_{A_{ls}} \mathbf{n_{ls}}\widetilde{T_l}dq)) + \frac{1}{\nu}\int_{A_{ls}} \mathbf{n_{ls}}\lambda_l \nabla T_l dq \tag{3.30}$$

L'équation de transport de la phase s est analogue à l'équation 3.30 sans le terme de convection [93] :

$$\phi_s(\rho C_p)_s \frac{\partial}{\partial t}\langle T_{ch} \rangle^s = \nabla(\lambda_s(\phi_s \nabla \langle T_{ch} \rangle^s + \frac{1}{\nu}\int_{A_{sl}} n_{sl}\widetilde{T_{ch}}dq)) + \frac{1}{\nu}\int_{A_{sl}} \mathbf{n_{sl}}\lambda_s \nabla T_{ch} dq \tag{3.31}$$

où

v_s est le volume de la phase solide (m^3) ;

$\langle \; \rangle^s$ moyenne intrinsèque de la phase s ;

$\mathbf{n_{sl}}$ est le vecteur normal unitaire dirigé de la phase-s vers la phase l ;

A est la surface moyenne (m^2) ;

A_{sl} est la surface de l'interface s-l (m^2) ;

$\langle T_{ch} \rangle^s$ est la température moyenne intrinsèque dans la phase s (^{o}C) ;

$\tilde{T_{ch}}$ est la déviation spatiale de la température dans la phase s (^{o}C) ;

$\langle V_s \rangle^s$ est la vitesse moyenne intrinsèque dans la phase s (m/s) ;

$\tilde{V_s}$ est la déviation spatiale de la vitesse dans la phase s (m/s).

Équation globale d'équilibre thermique. L'équation du modèle d'équilibre se compose d'une seule équation de transport pour les régions l et s. Quand les deux températures dans les deux régions sont suffisamment proches, les équations de transport qui représentent les deux équations du modèle peuvent être ajoutées pour produire ce modèle. On peut dire que le principe de l'équilibre thermique local est valable. Quintard et al. (1993) ont examiné le processus transitoire de conduction de chaleur pour une à deux phases en utilisant la méthode du volume moyen. L'équation du modèle d'équilibre est obtenue directement de l'équation à deux modèles.

Le modèle d'équilibre local obtenu quand il y a un échange rapide entre les différentes régions se caractérise par [93, 94] :

$$\langle T \rangle = \langle T_l \rangle^l = \langle T_{ch} \rangle^s \tag{3.32}$$

Pour des températures de deux régions proches, les équations (3.30) et (3.31) peuvent être ajoutées pour obtenir :

$$\begin{aligned}(\phi_l(\rho C_p)_l + \phi_s(\rho C_p)_s)\frac{\partial}{\partial t}\langle T \rangle + \phi_l(\rho C_p)_l \langle \mathbf{V_l} \rangle^l \nabla \langle T \rangle = \nabla(\phi_l \lambda_l + \phi_s \lambda_s)\nabla \langle T \rangle \\ + \nabla(\frac{\lambda_l}{v}\int_{A_{ls}} \mathbf{n_{ls}} \widetilde{T_l} dq) + \nabla(\frac{\lambda_s}{v}\int_{A_{ls}} \mathbf{n_{sl}} \widetilde{T_{ch}} dq) - (\rho C_p)_s \nabla \langle \widetilde{T_{ch}} \widetilde{\mathbf{V_l}} \rangle\end{aligned} \tag{3.33}$$

Les trois derniers termes de l'équation (3.33) peuvent être négligés d'après [95, 94] et on obtient l'équation de conservation d'énergie macroscopique suivante:

$$(\phi_l(\rho C_p)_l + \phi_s(\rho C_p)_s)\frac{\partial}{\partial t}\langle T \rangle + \phi_l(\rho C_p)_l \langle \mathbf{V_l} \rangle^l \nabla \langle T \rangle = \nabla((\phi_l \lambda_l + \phi_s \lambda_s)\nabla \langle T \rangle) \tag{3.34}$$

Finalement le modèle thermo-hydraulique à résoudre à l'échelle macroscopique est le suivant :

$$\begin{cases} (\phi_l(\rho C_p)_l + \phi_s(\rho C_p)_s)\frac{\partial}{\partial t}\langle T \rangle + \phi_s(\rho C_p)_l \langle \mathbf{V_l} \rangle^l \nabla \langle T \rangle = \nabla((\phi_l \lambda_l + \phi_s \lambda_s)\nabla \langle T \rangle) \\ div(V_l) = 0 \\ \langle \mathbf{V_l} \rangle^l = -\frac{\lambda_l}{\mu_l}.\left(\nabla \langle \mathbf{p_l} \rangle^l - \rho_l \mathbf{g}\right) = -\frac{\lambda_l}{\mu_l}.\nabla \mathbf{H} \end{cases} \tag{3.35}$$

Dans la suite, nous nous intéressons à expliciter les variables intervenant dans l'expression de la vitesse de Darcy (charge hydraulique et conductivité hydraulique) et cette vitesse de Darcy. Nous nous intéressons à définir cette loi afin de la valider expérimentalement sur une maquette de laboratoire que nous présentons dans le chapitre 4.

3.4 Écoulement macroscopique dans un milieu poreux

3.4.1 Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique K (m/s) [92] est un coefficient dépendant des propriétés du milieu poreux et de celles du fluide y circulant. Elle exprime la capacité d'un milieu poreux à laisser circuler tout fluide. Elle prend en compte les interactions entre le fluide et le milieu poreux. La conductivité hydraulique est une mesure de vitesse.

Conductivité hydraulique en milieu non saturé. La plupart des phénomènes de transfert d'eau dans les milieux poreux se déroulent dans des conditions où la teneur en eau est inférieure à celle à saturation. La description de cette dynamique revient à la généralisation des principes développés dans le cas des écoulements saturés.

L'étude de l'écoulement dans des milieux non saturés présente de la complexité du fait que le taux de saturation varie avec le temps.

En conditions saturées, la conductivité hydraulique est alors constante à sa valeur maximale, la conductivité hydraulique à saturation. En conditions non saturées, la teneur en eau θ et la charge de pression h diminuent à mesure que l'on s'éloigne de la saturation. Lors de l'augmentation de la tortuosité et avec la diminution des vitesses, la conductivité hydraulique diminue rapidement. Les relations liant la conductivité à la charge de pression ou à la teneur en eau sont complexes et dépendent du type de milieu poreux considéré. La conductivité hydraulique dans un milieu homogène isotrope s'ajuste à partir des valeurs expérimentales sur des lois mathématiques empiriques, telle que [92] :

- Gardner : a,b et m sont des constantes empiriques

$$K(h) = \frac{a}{b + (-h)^m} \tag{3.36}$$

- Brooks & Corey : c est un paramètre reflétant la porosité du sol

$$K(\theta) = K_s(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r})^{3+\frac{2}{c}} \tag{3.37}$$

- Van Genuchten : m est une constante empirique

$$K(\theta) = K_s(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r})^{\frac{1}{2}}[1 - (1 - (\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r})^{\frac{1}{m}})^m]^2 \tag{3.38}$$

où

K_s est la conductivité hydraulique à saturation (m/s) ;

θ est la teneur en eau ;

θ_r est la teneur en eau résiduelle ;

θ_s est la teneur en eau à saturation.

Conductivité hydraulique à saturation. La conductivité hydraulique à saturation [92] est une manifestation de la résistance à l'écoulement que provoquent les forces de frottement. La conductivité hydraulique est fonction de la perméabilité intrinsèque du sol k_{in} caractérisant la matrice solide, de la masse volumique du fluide ρ_l, de la viscosité dynamique du fluide μ_l et de la gravité comme le montre l'équation suivante [92] :

$$\mathbf{K_s} = k_{in}\frac{\rho_l \mathbf{g}}{\mu_l} \tag{3.39}$$

3.4.2 Vitesse de Darcy dans un milieu poreux

L'eau qui s'écoule dans un milieu poreux circule dans les interstices entre les grains qui forment des canaux de tailles variables. Les fluides circulent réellement selon des trajectoires assez tortueuses d'où la difficulté de définir les vitesses réelles de l'eau qui circule. Comme on s'interesse surtout au mouvement global du fluide, on définit des trajectoires fictives et des vitesses moyennes.

Soit Q le débit de l'eau s'écoulant dans un tube de sol au travers d'une surface d'aire totale S (grains+ vides) (figure 3.4).

Par définition, la vitesse de décharge de l'eau dans le milieu poreux, notée V, est égale au rapport :

$$V = \frac{Q}{A} \tag{3.40}$$

En pratique, c'est la vitesse de décharge V (appelée aussi vitesse de percolation) qui est utilisée dans les calculs de débits. C'est une vitesse fictive, apparente.

En considérant que l'eau ne circule que dans les vides, on peut définir la vitesse moyenne réelle, notée V_m, definie par [96]:

$$V_m = \frac{Q}{A_v}$$

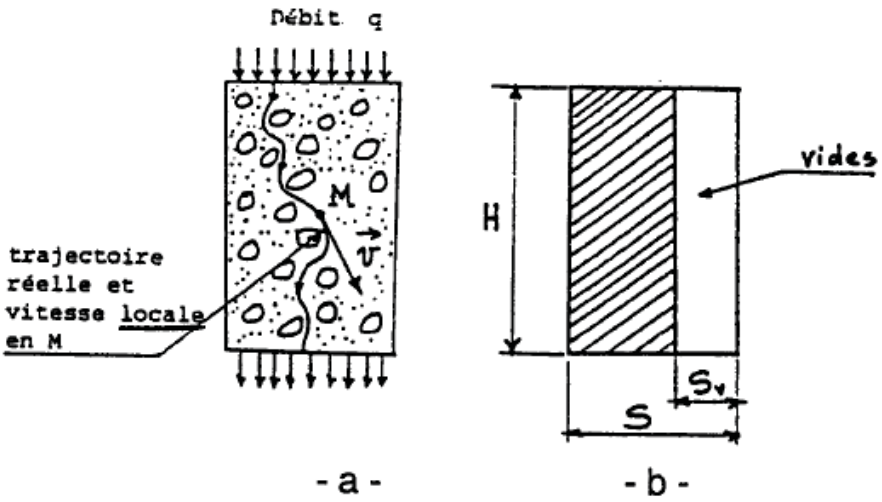


Figure 3.4: Circulation de l'eau dans un milieu poreux [96]

où A_v est l'aire occupée par les vides.

Pour un cylindre de section A et de hauteur h, on a :

$$v_v = A_v h = \phi A\, h \Rightarrow A_v = \phi A$$

La vitesse réelle moyenne a donc pour valeur :

$$V_m = \frac{Q}{A_v} = \frac{Q}{\phi.A}$$

d'où:

$$V_m = \frac{V}{\phi}$$

3.4.3 Charge hydraulique - Perte de charge

Dans l'étude de l'écoulement d'un fluide sous l'action de la pesanteur, on appelle charge hydraulique en un point M , en prenant $\overrightarrow{Oz}$ vertical descendant, la quantité H_m décrite par l'équation de Bernoulli [90] :

$$H_M = \frac{V_M^2}{2g} + \frac{U_M}{\gamma_l} + z_M \tag{3.41}$$

H_M est la charge hydraulique au point M (m) ;

V_M est la vitesse de l'eau au point M (m/s) ;

U_M est la pression de l'eau en M (en prenant pour origine des pressions, la pression atmosphérique), appelée pression interstitielle (m/s) ;

z_M est l'altitude du point M par rapport à un plan de référence arbitraire (m) ;

γ_l est le poids spécifique de l'eau (N/m^3) avec $\gamma_l = \rho_l g$.

La charge hydraulique représente l'énergie d'une particule fluide de masse unité, $\frac{V_M^2}{2g}$ correspond à l'énergie cinétique et $(\frac{U_M}{\gamma_l} + z_M)$ à l'énergie potentielle. Elle est exprimée en mètres.

En mécanique des milieux poreux, le terme $\frac{V_M^2}{2g}$ peut être négligé par rapport aux autres termes [92]. Pour une vitesse de 10 cm/s, qui n'est j'amais atteinte en pratique, $(\frac{V_M^2}{2g} \approx 0.5\,\text{mm})$. Par la suite pour une charge hydraulique de l'ordre du cm, ce terme sera néligé. On peut donc écrire :

$$H_M = \frac{U_M}{\gamma_l} + z_M \tag{3.42}$$

La variation de charge dH subie par l'eau dans un mouvement du point M au point N (dans le sens de l'écoulement) est égale à $H_N - H_M$.

La pression interstitielle U est mesurée par la hauteur d'eau dans un tube piézométriqiue pénétrant dans le sol jusqu'au point considéré.

On appelle perte de charge la quantité dH :

$$dH = H_N - H_M. \tag{3.43}$$

Après ces définitions des variables caractérisant l'écoulement dans un milieu poreux, nous présentons la loi de Darcy qui définit expérimentalement le comportement d'écoulement d'un fluide.

3.4.4 Loi de Darcy

Les expériences de Darcy écrites dans son célèbre ouvrage [97] "*Les fontaines publiques de la ville de Dijon*", qui sont à la base de l'hydraulique souterraine, étaient relatives à l'écoulement de l'eau dans une conduite verticale remplie de sable en régime permanent.

Henry Darcy fut le premier à étudier en 1856 la relation entre le débit à travers le sable et la perte de charge qui lui était associée.

Le débit à travers un matériau poreux présenté à la figure 3.5 s'exprime selon :

$$Q = -K\frac{\triangle H}{\triangle L}A \tag{3.44}$$

où :

Q est le débit (m^3/s) ;

K est la conductivité hydraulique à saturation du sol (m/s) ;

$\triangle H$ est la perte de la charge hydraulique (m) ;

$\triangle L$ est la longueur de l'écoulement (m) ;

A est la section de l'écoulement (m^2).

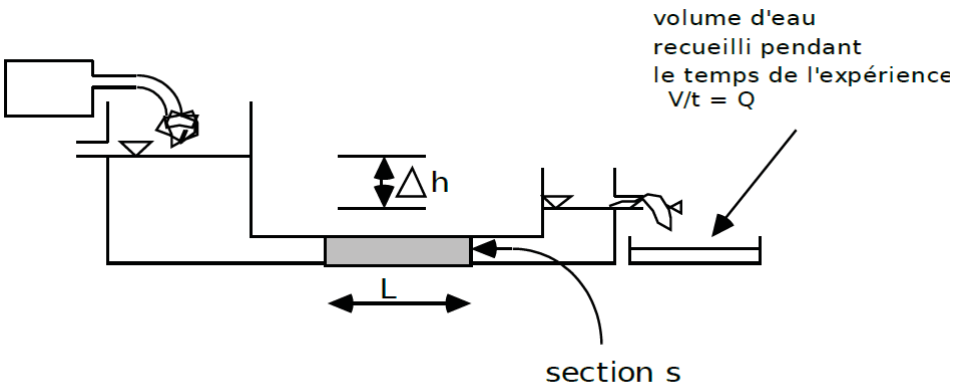


Figure 3.5: Schéma réprésentant l'écoulement au travers d'un matériel poreux [91]

Le rapport de la perte de charge ou de potentiel par unité de longueur est appelé gradient hydraulique "i":

$$i = \frac{\triangle H}{\triangle L} \tag{3.45}$$

3.4.4.1 Loi de Darcy dans un milieu non saturé

En milieu non saturé, la relation entre la vitesse fictive de l'écoulement et les diverses forces qui la conditionnent, s'exprime de manière analogue à la loi de Darcy en milieu saturé. La conductivité hydraulique est exprimée sous la forme d'une fonction de la teneur en eau, puisque ces deux grandeurs sont liées [92] :

$$\mathbf{V} = -K(\theta)\,\nabla\,H \tag{3.46}$$

où θ est la teneur en eau.

En milieu non saturé, la conductivité hydraulique K diminue avec la teneur en eau car la section d'écoulement rétrécit et la tortuosité augmente.

3.4.4.2 Loi de Darcy dans un milieu saturé

Dans un milieu homogène et anisotrope, les vecteurs gradient hydraulique et vitesse de décharge ne sont pas colinéaires. Ils se déduisent l'un de l'autre par un opérateur linéaire [92] : le tenseur de perméabilité (K) indépendant de x, y et z, symétrique et diagonalisable.

$$K = \begin{pmatrix} K_x & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_y & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{yy} & K_z \end{pmatrix} \tag{3.47}$$

Si les axes de coordonnées utilisés sont les directions principales du tenseur de perméabilité (K), il est ramené à sa forme diagonale et s'écrit :

$$K = \begin{pmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{pmatrix} \tag{3.48}$$

La loi de Darcy s'écrit:

$$\mathbf{V} = -K \nabla H \tag{3.49}$$

Dans un milieu homogène et isotrope, le coefficient de conductivité hydraulique K a la même valeur en tout point et dans toutes les directions.

Dans la suite, nous présentons le modèle thermo-hydraulique issu de l'écoulement dans un milieu poreux homogène, isotrope et saturé. Ce modèle est basé sur la conservation des équations de transfert de chaleur dans ce milieu et sur la conservation des masses. À partir des équations de conservation de masse, nous aboutissons à la loi de Darcy déjà obtenue expérimentalement. À noter que toutes les grandeurs scientifiques décrites dans la suite sont des grandeurs moyennes mais pour simplification d'écriture, nous avons enlevé les crochets.

3.4.5 Présentation du modèle thermo-hydraulique

3.4.5.1 Introduction

Dans cette section, on développe un modèle thermo-hydraulique bidimensionnel général du transfert de chaleur dû à l'écoulement d'un fluide dans une couche

drainante de la chaussée. On prend en considération la présence du dévers dans le sens de circulation du fluide grâce auquel le fluide circule. L'influence de la pente de la structure de la chaussée est négligée grâce à sa faible valeur par rapport au dévers. Ce qui permet d'obtenir un modèle bidimensionnel. Un bac amont d'un volume v alimente la couche drainante par le fluide, dans lequel circule le fluide qui va atteindre un bac aval de volume v. Une pompe est utilisée afin de maintenir constante la hauteur d'eau dans les deux bacs amont et aval (différence de charge constante) (figure 3.6).

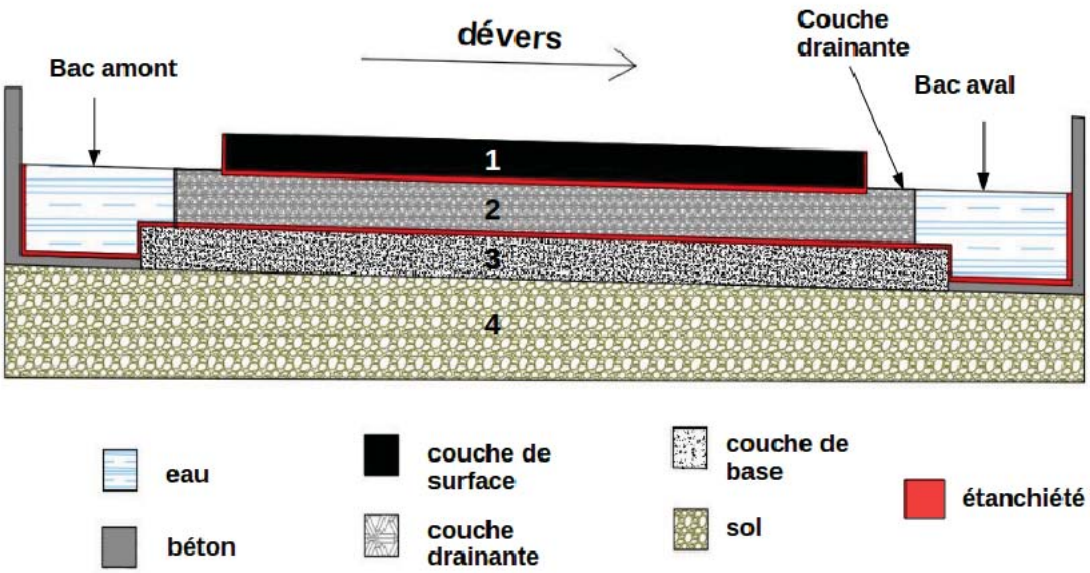


Figure 3.6: Schéma descriptif de la structure de chaussée à modéliser

Ce modèle de simulation est basé sur l'écoulement dans un milieu poreux et le transfert thermique dans la chaussée dû à cet écoulement. Il prend en considération les variations des données météorologiques au cours du temps. Il est basé sur les équations d'écoulement dans un milieu poreux et les équations de conservation de l'énergie. L'écoulement dans un milieu poreux dépend de la vitesse d'écoulement du fluide dans le milieu, qui dépend elle même de la porosité. Cette vitesse est fonction de la différence de charge hydraulique entre l'amont et l'aval de la chaussée. Nous nous intéressons à une chaussée composée de quatre couches dont la deuxième est un enrobé drainant fortement poreux où circule à saturation un fluide par gravité dans le sens du dévers de la chaussée. Les variables d'espace du modèle (figure 3.7) sont la cote y selon la verticale inclinée du dévers et l'abscisse x dans le sens du dévers (la chaussée est supposée infinie dans sa troisième dimension). On notera h la hauteur de la chaussée et L la largeur de la chaussée. Nous supposons un régime hydraulique transitoire et des sollicitations thermiques avec des paramètres hydrauliques indépendants de la température. On souhaite caler les paramètres d'un modèle thermo-hydraulique bidimensionnel. Ce modèle doit prendre en considération l'effet de la circulation de l'eau chauffée à travers une couche poreuse drainante sur les variations du champ de température dans la structure de la chaussée et surtout la température de surface.

Dans notre travail, les transferts thermiques dépendent fortement de la présence de l'écoulement d'eau au sein des pores. La présentation de ce phénomène d'écoulement du point de vue de ses modélisations physiques et numériques, et de son implantation dans un code à différences finies est faite dans la suite du chapitre. Le couplage avec la mécanique du fait des variations de porosité et de l'endommagement du matériau

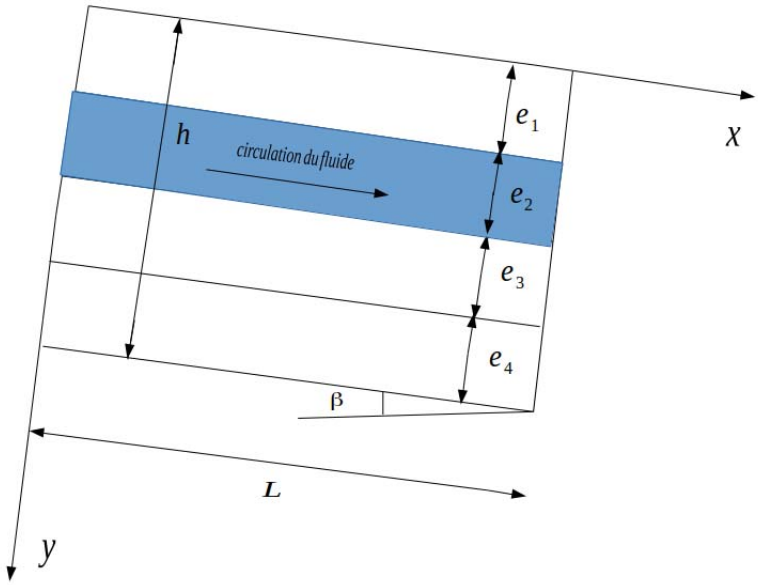


Figure 3.7: Schéma descriptif de la structure de chaussée

de la chaussée n'est pas pris en compte dans ce travail.

3.4.5.2 Équation générale du modèle de couplage thermo-hydraulique

Équation de conservation d'énergie

Le modèle doit prendre en considération l'effet de la circulation de l'eau chauffée à travers la couche poreuse sur la température de surface.

Notre modèle est un modèle bidimensionnel (2D), où la température varie en espace et dans le temps, soit $T(t, x, y)$.

On applique l'équation (3.35) [93, 98] pour obtenir ($1 \leq i \leq 4$, i désigne l'indice de la couche considérée : pour $0 \leq x \leq L$ et $0 \leq y \leq h$) :

$$\begin{cases} (\rho C)_i \dfrac{\partial T}{\partial t}(t, x, y) = \lambda_i \triangle T(t, x, y), \; i = 1, 3, 4 \\ (\rho C)_2 \dfrac{\partial T}{\partial t}(t, x, y) + (\rho C)_l V \dfrac{\partial T}{\partial x}(t, x, y) = \lambda_2 \triangle T(t, x, y) \\ V = -K \dfrac{H_2 - H_1}{L} \end{cases} \tag{3.50}$$

où $(\rho C)_i$, λ_i, ϕ_i, $(\rho C)_l$, λ_l, V et K désignent respectivement la chaleur volumique, la conductivité thermique et la porosité de la couche i, la chaleur volumique et la

conductivité thermique du fluide, la vitesse de Darcy du fluide et la conductivité hydraulique de l'enrobé drainant.

avec $(\rho C)_2 = \phi_l(\rho C_p)_l + \phi_{s2}(\rho C_p)_{s_2}$ et $(\lambda)_2 = \phi_l\lambda_l + \phi_{s2}\lambda_{s2}$

où

ϕ_{s2} est la porosité de la phase solide de la deuxième couche ;

$(\rho C_p)_{s_2}$ est la chaleur volumique de la phase solide de la deuxième couche ;

λ_{s2} est la conductivité thermique de la phase solide de la deuxième couche ;

Les champs T et H sont ceux de température dans le corps de chaussée et de charge hydraulique dans la couche d'enrobé drainante (on suppose en tout point l'égalité entre la température du fluide et celle de l'enrobé). H_1 et H_2 sont les charges hydrauliques imposées en amont et en aval de la circulation du fluide dans la couche drainante. On s'intéresse à l'étude de l'écoulement dans un milieu saturé, ce qui se traduit par $H_1 - H_2 \geq \beta L$ avec β= angle de dévers. Aux interfaces des couches, des conditions de continuité de la température et du flux thermique sont imposées. Le modèle est simulé par une discrétisation aux différences finies en espace et par un schéma d'Euler implicite en temps. Le code associé a été implémenté en Fortran 90.

Les hypothèses prises pour la modélisation sont les suivantes :

- la couche poreuse est totalement saturée en eau, les pores sont totalement remplis d'eau et pas de présence de l'air ;
- l'eau ne subit pas de transformation en vapeur ;
- il n'y a pas de source d'énergie à l'extérieur de la chaussée ;
- tous les paramètres sont indépendants de la température.

À partir de l'équation (3.50), on étudie l'évolution de la température dans le corps de la chaussée, tout en introduisant un fluide à une certaine température qui définira une des conditions aux bords.

Conditions aux limites

Pour résoudre cette équation, les conditions auxquelles le modèle de chaussée est soumise sont (figure 3.8) :

- Condition sur la face supérieure : $0 \leq x \leq L$, $y = 0$

$$\lambda_1 \frac{\partial T(t,x,0)}{\partial y} = -\Big[\varepsilon\sigma\left(T_s(t,x,0) + 273.15\right)^4 - R_{atm} \\ - (1-A)\,R_g + h_v\left(T_s(t,x,0) - T_{air}(t)\right)$$

- Condition sur la face inférieure : $0 \leq x \leq L$, $y = h$

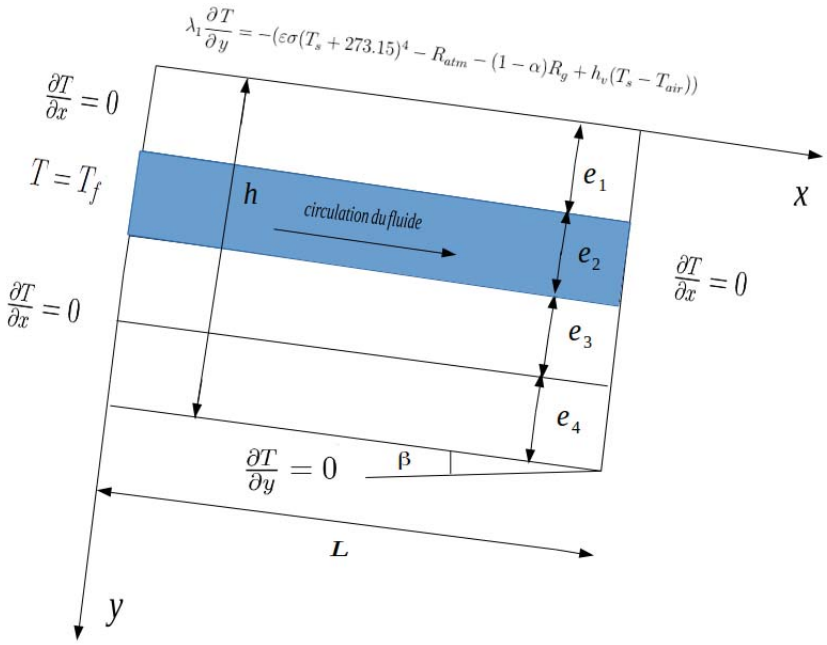


Figure 3.8: Schéma des conditions limites réelles de la structure de chaussée (T_f est la température d'injection du fluide)

$$\lambda_4 \frac{\partial T(t,x,h)}{\partial y} = 0$$

- Condition amont :

  1. première couche : $0 \leq y \leq e_1$, $x = 0$

     $$\lambda_1 \frac{\partial T(t,0,y)}{\partial x} = 0$$

  2. couche poreuse (deuxième couche) : $e_1 \leq y \leq e_1 + e_2$, $x = 0$

     $$T(t,0,y) = T_{inj}$$

  3. troixième couche : : $e_2 \leq y \leq e_2 + e_3$, $x = 0$

     $$\lambda_3 \frac{\partial T(t,0,y)}{\partial x} = 0$$

  4. quatrième couche : $e_3 \leq y \leq e_3 + e_4$, $x = 0$

     $$\lambda_4 \frac{\partial T(t,0,y)}{\partial x} = 0$$

- Condition aval :

  1. première couche : $0 \leq y \leq e_1$, $x = L$

  $$\lambda_1 \frac{\partial T(t, L, y)}{\partial x} = 0$$

  2. couche poreuse (deuxième couche) : $e_1 \leq y \leq e_1 + e_2$

  $$\lambda_2 \frac{\partial T(t, L, y)}{\partial x} = 0$$

  3. troixième couche : $e_2 \leq y \leq e_2 + e_3$, $x = L$

  $$\lambda_3 \frac{\partial T(t, L, y)}{\partial x} = 0$$

  4. quatrième couche : $e_3 \leq y \leq e_3 + e_4$, $x = L$

  $$\lambda_4 \frac{\partial T(t, L, y)}{\partial x} = 0$$

3.4.5.3 Discrétisation spatiale et temporelle

L'équation (3.50) est discrétisée selon un schéma aux différences finies en espace et par un schéma d'Euler implicite en temps. Nous ne détaillons pas ici ces schémas qui sont classiques [99]. La discrétisation en temps est uniforme avec un pas de temps noté dans la suite *pdt*. Nous détaillons le maillage spatial bidimensionnel retenu, inspiré des travaux de [100]. Il s'agit de raffiner le maillage aux interfaces et sur les bords, car ce sont à ces endroits que les non-linéarités et les discontinuités sur les paramètres interviennent. Cela permet de réduire le nombre de points par rapport à un maillage régulier.

Nous présentons la méthode générale de maillage d'un segment $[a, b]$ rappelée dans [100] qui consiste à déterminer le maillage $a = y_1 < y_2 < \cdots < y_{m-1} < y_m = b$ (m étant le nombre de points de maillage) vérifiant pour tout $2 \leq i \leq m - 1$:

$$\int_{y_{i-1}}^{y_i} M(x)dx = \int_{y_i}^{y_{i+1}} M(x)dx = \frac{1}{m} \int_a^b M(x)dx, \tag{3.51}$$

où M est une fonction appelée fonction "monitrice" qu'il faut choisir.

Le choix d'une fonction M constante conduit à un maillage uniforme. Si l'on veut raffiner le maillage au voisinage d'un point r, il suffit de considérer une fonction M présentant un maximum plus ou moins marqué en r. Plusieurs fonctions sont

fournies dans la littérature ([100, 101, 102]). Nous retiendrons dans la suite la fonction proposée dans [102] :

$$M_r(x) = 1 + \frac{\mu_1}{\sqrt{\mu_2^2(x-r)^2+1}}, \tag{3.52}$$

où μ_1 et μ_2 sont deux paramètres réels.

Une telle fonction est intégrable explicitement, sa primitive faisant intervenir la fonction $\sinh^{-1}$. Dans la suite, nous choisirons M comme suit :

$$M = M_a + M_b. \tag{3.53}$$

En remarquant que (3.51) est équivalent à :

$$\forall\, i \in \{1,\dots,m\},\ \int_{y_i}^{b} M(x)dx = \frac{m-i}{m-1}\int_a^b M(x)dx, \tag{3.54}$$

chaque y_i est alors solution, de manière découplée, de l'équation scalaire non linéaire suivante :

$$\begin{aligned} &2(y_i-a) + \frac{\mu_1}{\mu_2}\sinh^{-1}\left(\mu_2(y_i-a)\right) + \sinh^{-1}\left(\mu_2(y_i-b)\right) \\ &- \frac{i-1}{m-1}\left\{\frac{\mu_1}{\mu_2}\sinh^{-1}\left(\mu_2(b-a)\right) + 2(b-a)\right\} \\ &- \left(1-\frac{i-1}{m-1}\right)\frac{\mu_1}{\mu_2}\sinh^{-1}\left(\mu_2(a-b)\right) = 0. \end{aligned} \tag{3.55}$$

On remarque, d'après (3.54) ou (3.55), que $y_1 = a$ et $y_m = b$.

Suite à des expérimentations numériques, nous avons choisi $\mu_1 = \mu_2 = 1000$. Le maillage d'un segment ne dépend donc que de la donnée du nombre de points m du maillage.

A partir de cette méthode, nous discrétisons le rectangle $[0,L]\times[0,h]$ de la manière suivante. On se donne un nombre de points n_x dans la direction x et n_y^1, n_y^2, n_y^3 et n_y^4 dans la direction y pour chacune des quatre couches (du haut vers le bas). En résolvant par une méthode de Newton les équations non linéaires de type (3.55), nous obtenons un maillage $\mathcal{X} = x_1 < \cdots < x_{n_x}$ de $[0,L]$ et un maillage $\mathcal{Y}_i = y_1^i < \cdots < y_{n_y^i}^i$ de la couche i, $1 \le i \le 4$. Le maillage bidimensionnel du rectangle $[0,L]\times[0,h]$ est défini par :

$$\mathcal{M} = \left\{(x,y)\in[0,L]\times[0,h],\ x\in\mathcal{X},\ y\in\bigcup_{i=1}^{4}\mathcal{Y}_i\right\}. \tag{3.56}$$

Principe de fonctionnement du code

Il permet de délivrer le champ de température $T(t,x,y)$ du modèle présenté dans la section 3.4.5.2 tout en imposant des conditions de bords de flux thermique (conditions de Neuman) et de température (condition de Dirichlet) et une condition initiale de température.

Ce code a besoin comme données d'entrée fournies dans un fichier "input":

- du nombre de couche n ;
- de la profondeur de la chaussée h ;
- de la largeur de la chaussée ;
- du type de simulation : dynamique (1) ou stationnaire (0) ;
- des hauteurs de chaque couche y_i ;
- de la durée de simulation et le pas de temps ;
- du nombre de points par couche pour la discrétisation spatiale ;
- des caractéristiques thermiques de chaque couche : conductivités, chaleurs massiques ;
- des caractéristiques hydrauliques de la couche poreuse : conductivité hydraulique, charge hydraulique en amont, charge hydraulique en aval ;
- de la température de fluide à introduire ;
- de la pente de la chaussée ;
- de l'albédo ;
- de l'émissivité.

Dans la suite, nous présentons une étude de sensibilité des paramètres du modèle sur la température de surface. Cette étude est faite à l'aide du modèle 2D en régime stationnaire en période hivernale.

3.5 Étude de sensibilité

L'évolution des performances numériques des machines de calcul a poussé à considérer des modèles de plus en plus complexes, dans le but de se rapprocher au mieux de la réalité physique. Cette complexité se traduit par un nombre très important d'entrées/sorties mais aussi par des interactions et des dépendances qui peuvent exister entre les paramètres ou les variables. Un modèle trop complexe peut engendrer un certain nombre de problèmes qu'il convient de résoudre pour sa bonne utilisation :

- les paramètres d'entrée peuvent être sujets à de nombreuses sources d'incertitude, attribuées le plus souvent aux erreurs de mesure, ou à une absence d'information. Cette incertitude génère de la variabilité dans le modèle qui contribue à réduire sa robustesse. Pour augmenter la fiabilité des prédictions du modèle, il est essentiel d'établir l'origine de cette variabilité dans le but de la réduire.
- un nombre de paramètres très élevé peut rendre le modèle quasi inutilisable en pratique, en particulier si son étude nécessite un grand nombre d'évaluations. Cette complexité peut également rendre le modèle difficilement interprétable et donc sans intérêt pour l'utilisateur.

Répondre à ce compromis en offrant des solutions aux problèmes posés fait l'objet de l'analyse de sensibilité. Plus précisément, dans le modèle entrées-sortie du type $Y = f(X)$, où X est l'entrée et Y est la sortie.

Le premier but de l'analyse de sensibilité est de comprendre comment les variations des paramètres d'entrée impactent la sortie du modèle. De cette étude, nous pouvons ainsi détecter les variables qui contribuent le plus à l'incertitude dans le modèle, et par conséquence les variables les moins influentes, qui peuvent être fixées à une valeur nominale.

Les méthodes d'analyse de sensibilité sont nombreuses. On s'intéresse ici à la méthode globale qui repose sur le fait que les entrées et la sortie ne sont plus déterministes, mais aléatoires. Cette classe de méthodes est la plus générale et permet de considérer les plages de variation des paramètres. Nous considérons que les entrées-sorties sont des variables aléatoires (X, Y) à valeurs dans R $\times$ R. Nous nous intéressons ici à la sous-classe de techniques basées sur la variance, qui se révèle être très exploitée.

L'analyse de sensibilité globale étudie comment la variabilité des entrées se répercute sur celle de la sortie, en déterminant quelle part de variance de la sortie est due à telle entrée ou tel ensemble d'entrées [103]. Si l'analyse de sensibilité locale s'intéresse plus à la valeur de la variable réponse, l'analyse de sensibilité globale s'intéresse quant à elle à sa variabilité.

L'analyse de sensibilité globale (AS) permet d'analyser un modèle mathématique en étudiant l'impact de la variabilité des facteurs d'entrée du modèle sur la variable de sortie. Déterminant les entrées responsables de cette variabilité à l'aide d'indices de sensibilité, l'AS permet de prendre les mesures nécessaires pour diminuer la variance de la sortie si celle-ci est synonyme d'imprécision, ou encore d'alléger le modèle en fixant les entrées dont la variabilité n'influe pas la variable de sortie.

Un modèle mathématique qui, à un ensemble de variables d'entrée aléatoires X, fait correspondre, via une fonction f déterministe, une variable de sortie Y (ou réponse) aléatoire peut s'écrire sous la forme:

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$$

$$X \rightarrow Y = f(X)$$

La fonction f du modèle peut être très complexe (système d'équations différentielles...), et est en pratique évaluée à l'aide d'un code informatique, plus ou moins onéreux en temps de calcul. L'ensemble des variables d'entrée $X = (X_1, ..., X_p)$ regroupe toutes les entités considérées comme aléatoires dans le modèle.

3.5.1 Les indices de Sobol

Plaçons nous désormais dans le cas d'une fonction f dont la forme analytique n'est pas connue. Pour apprécier l'importance d'une variable d'entrée X_i sur la variance de la sortie Y, nous étudions comment la variance de la sortie Y décroît si on fixe la variable X_i à une valeur x_i^*: $Var(Y|X_i = x_i^*)$. Il s'agit de variance conditionnelle qui est une variable aléatoire. Le problème de cet indicateur est le choix de la valeur x_i^* de X_i , que l'on résout en considèrant l'espérance de cette quantité pour toutes les valeurs possibles de x_i^* : $E[Var(Y|Xi)]$. Etant donné la formule de la variance totale $Var(Y) = Var(E[Y|Xi]) + E[Var(Y|Xi)]$, nous pouvons utiliser de façon équivalente la quantité $Var(E[Y|X_i])$ qui sera d'autant plus grande que la variable X_i sera importante vis-à-vis de la variance de Y. Afin d'utiliser un indicateur normalisé (à valeur dans [0,1]), nous définissons l'indice de sensibilité de Y à X_i :

$$S_i = \frac{Var(E[Y|X_i])}{Var(Y)} \tag{3.57}$$

Cet indice [103] est appelé indice de sensibilité de premier ordre par Sobol [104]. Il quantifie la sensibilité de la sortie Y à la variable d'entrée X_i, ou encore la part de variance de Y due à la variable X_i.

Sobol [104] a introduit cet indice de sensibilité en décomposant la fonction f du modèle en somme de fonctions :

$$Y = f(X_1, ..., X_p) = f_0 + \sum_{i=1}^{p} f_i(X_i) + \sum_{1<i<j\leq p} f_{ij}(X_i, X_j) + ... + f_{1,...,p}(X_1, ..., X_p). \tag{3.58}$$

où

$f_0 = E[Y]$;

$f_i(X_i) = E[Y|X_i] - E[Y]$;

$f_{i,j}(X_i, X_j) = E[Y|X_i, X_j] - E[Y|X_i] - E[Y|X_j] - E[Y]$;

$f_{i,j,k}(X_i, X_j, X_k) = E[Y|X_i, X_j, X_k] - E[Y|X_i, X_j] - E[Y|X_i, X_k] - E[Y|X_j, X_k] - E[Y]$;

.....

$f_{1,...,p}(X_1, ..., X_p) = E[Y|X_1, ..., X_p] - ... - E[Y]$.

La variance du modèle à entrées indépendantes se décompose en :

$$Var = \sum_{i=1}^{p} Var_i + \sum_{1<i<j\leq p} Var_{ij} + ... + Var_{1,...,p} \tag{3.59}$$

où

$Var = Var(Y)$;

$Var_i = Var\left(E\left[Y|X_i\right]\right)$;

$Var_{ij} = Var\left(E\left[Y|X_i, X_j\right]\right) - Var_i - Var_j$;

$Var_{ijk} = Var\left(E\left[Y|X_i, X_j, X_k\right]\right) - Var_{ij} - Var_{ik} - Var_{jk} - Var_i - Var_j - Var_k$;

.....

$Var_{1,...,p} = Var - \sum_{i=1}^{p} Var_i - \sum_{1<i<j\leq p} Var_{ij} - .... - \sum_{1<i_1<...<i_{p-1}\leq p} Var_{i,...,i_{p-1}}$.

De l'équation (3.59), on déduit :

$$1 = \sum_{i=1}^{p} S_i + \frac{1}{Var\,Y}\left(\sum_{1<i<j\leq p} Var_i + \sum_{1<i<j\leq p} Var_{ij} + ... + Var_{1,...,p}\right) \tag{3.60}$$

Il est souvent d'usage de se limiter au calcul des indices du premier ordre S_i. En pratique, on vérifie si $1 \simeq \sum_{i=1}^{p} S_i$, justifiant le choix de négliger le deuxième terme $(\frac{1}{Var\,Y}\left(\sum_{1<i<j\leq p} Var_i + \sum_{1<i<j\leq p} Var_{ij} + ... + Var_{1,...,p}\right))$.

Dans la suite nous présentons la méthode de Monte-Carlo utilisée pour calculer les indices équation (3.57).

3.5.2 Estimation des indices de Sobol par des simulations Monte-Carlo

Considérons un N-échantillon $\tilde{X}_{(N)} = (x_{k1}, ..., x_{kp})_{k=1...N}$ de réalisations des variables d'entrée $(X_1, ..., X_p)$. L'espérance de Y, $E[Y] = f_0$, et sa variance, $V(Y) = V$, sont estimées par :

$$\hat{f}_0 = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} f\left(x_{k1}, ..., x_{kp}\right) \tag{3.61}$$

et

$$\hat{Var} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} f^2\left(x_{k1}, ..., x_{kp}\right) - \hat{f}_0^2 \tag{3.62}$$

L'estimation des indices de sensibilité nécessite l'estimation d'espérance de variance conditionnelle. L'estimation des indices de sensibilité de premier ordre consiste à estimer la quantité [103] :

$$Var_i = Var(E[Y|X_i]) = E[E[Y|X_i]^2] - E[E[Y|X_i]]^2 = U_i - E[Y]^2, \tag{3.63}$$

Sobol [104] propose d'estimer la quantité U_i , c'est-à-dire l'espérance du carré de l'espérance de Y conditionnellement à X_i , comme une espérance classique, mais en tenant compte du conditionnement à X_i en faisant varier entre les deux appels à la fonction f toutes les variables sauf la variable X_i. Ceci nécessite deux échantillons de réalisations des variables d'entrée, noter $\tilde{X^1}_{(N)}$ et $\tilde{X^2}_{(N)}$:

$$\hat{U}_i = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} f\left(x_{k1}^{(1)}, ..., x_{k(i-1)}^{(1)}, x_{k(i)}^{(1)}, x_{k(i+1)}^{(1)}, ...x_{kp}^{(1)}\right) f\left(x_{k1}^{(2)}, ..., x_{k(i-1)}^{(2)}, x_{k(i)}^{(2)}, x_{k(i+1)}^{(2)}, ...x_{kp}^{(2)}\right)$$

Les indices de sensibilité de premier ordre sont alors estimés par ([105, 106, 107, 108]):

$$\hat{S}_i = \frac{\hat{V}_i}{\hat{V}} = \frac{\hat{U}_i - \hat{f}_0^2}{\hat{V}} \tag{3.64}$$

3.5.3 Analyse de sensibilité de la température de surface du modèle

3.5.3.1 Méthode

Le modèle décrit dans la section 3.4.5.2 nous a permis d'étudier la réponse thermique de la chaussée et sa sensibilité par rapport à un certain nombre de paramètres : la température de l'air extérieur T_{air}, le coefficient d'échange convectif en surface h_v, les chaleurs volumiques $(\rho C)_i$ et conductivités thermiques λ_i des couches de chaussée, la conductivité hydraulique K, le dévers β, l'épaisseur de la couche drainante e_2, la température d'injection du fluide T_{inj}, la chaleur volumique du fluide (eau) $(\rho C)_{eau}$ et la conductivité thermique du fluide (eau) λ_{eau}. On a fait cette étude dans un

régime stationnaire pour les trois premières couches de chaussée. Comme condition de limite supérieure, on a juste pris le phénomème de convection (figure 3.9) car on s'intéresse à étudier l'influence de ces paramètres pendant la période hivernale sur la température de la chaussée. En effet, il s'agit d'étudier la fonction de chauffage en période hivernale : il n'y a pas de rayonnement solaire et le rayonnement atmosphérique infrarouge reçu par la chaussée est à peu près équilibré par le rayonnement de la surface de la chaussée. Ces trois termes ne sont donc pas pris en compte. On peut écrire formellement en tout point x de la surface :

$$T_s(x) = f_x(p_1, ..., p_n)$$

où $T_s(x)$ est la température de surface au point x et $p_1, ..., p_n$ sont les paramètres d'entrées du modèle. En affectant une loi de probabilité uniforme à chacun des paramètres $p_1, ..., p_n$ que l'on suppose indépendants, on calcule les indices de Sobol de chaque paramètre p_i par :

$$S_i = \frac{Var(E(T_s(x)/p_i))}{Var(T_s(x))}$$

3.5.3.2 Données expérimentales

Les valeurs moyennes des paramètres à étudier sont fournies dans les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 et sont extraites des références [98, 103, 109, 110], à l'exception de la conductivité hydraulique qui correspond à la valeur mesurée expérimentalement sur la maquette de laboratoire présentée dans la section 4.5 du chapitre 4 et au coefficient d'échange par convection h_v obtenu par la relation [111] :

$$\begin{cases} h_v = 5.6 + 4V_{vent}, \quad si\, V_{vent} \leq 5\, m/s \\ h_v = 7.2V^{0.78}, \quad si\, V_{vent} \geq 5\, m/s \end{cases} \tag{3.65}$$

où V_{vent} est la vitesse du vent à 10 m au dessus de la surface. On a utilisé les données météorologiques de la réglementation thermique francaise RT2012 définie en Europe [112] dans le but de définir une valeur significative de la vitesse de vent. Les données météorologiques sont des données moyennes obtenues à partir des fichiers de mesure annuelles énergétiques donnés par Météo France sur la période de janvier 1994 à décembre 2008. Après traitement statistique de ces données, on trouve une valeur médiane de V_{vent} égale à 3.1 m/s qui correspond à un h_v égale à 18 W/m^{2}K ([113]).

Le fluide utilisé est de l'eau pure. Les paramètres correspondant sont presentés dans le tableau 3.4

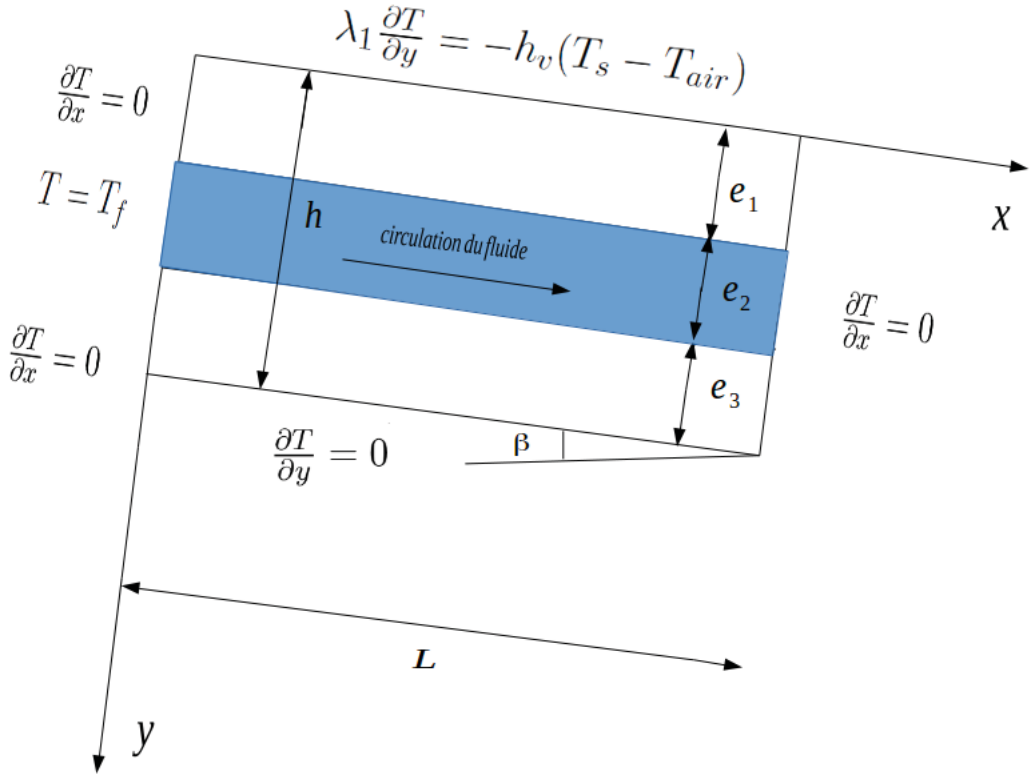


Figure 3.9: Schéma des conditions limites de la structure de chaussée (T_f est la température d'injection du fluide)

Paramètres	$\lambda_{1,3}$ (W/m.K)	λ_2 (W/m.K)	$(\rho C)_{1,3}$ (J/m^{3}K)	$(\rho C)_2$ (J/m^{3}K)
Valeur	1.4	1.03	2254000	1840000

Tableau 3.1: Valeurs moyennes des paramètres thermohydriques (a)

Paramètre	K (m/s)	h_v W/m^{2}K)	T_{air} (^{o}C)
Valeur	0.0218	18	-10

Tableau 3.2: Valeurs moyennes des paramètres thermohydriques (b)

Paramètre	L (m)	e_1 (m)	e_2 (m)	e_3 (m)	β (−)	ϕ_2 (−)
Valeur	4	0.06	0.08	0.05	0.01	0.2

Tableau 3.3: Valeurs géométriques des paramètres de la chaussée

Paramètre	λ_{eau} (W/m.K)	$(\rho C)_{eau}$ (J/m^{3}K)	T_{inj} (^oC) (^{o}C)
Valeur	0.6	4181000	22

Tableau 3.4: Paramètres du fluide

Les valeurs des paramètres du tableau 3.3 correspondent aux valeurs expérimentales de la maquette décrite dans la section 4.5, à l'exception du paramètre L, qui est égal à 4 m (chaussée réelle) au lieu de 1 m.

3.5.3.3 Résultats numériques

Dans cette section, on présente les indices de Sobol calculés à partir des valeurs numériques définies dans la section 3.5.3.2. Les résultats présentent l'influence des paramètres sur la température de surface pour un écart type de 10% (cas 1, figure 3.10) et 20% (cas 2, figure 3.10). L'étude montre une cohérence entre les résultats. Le résultat le plus important correspond à l'influence de ces paramètres sur la température de surface pour $x = L$. À ce point, comme le montrent les figures 3.10 et 3.11, l'indice de sobol est très sensible à la température extérieure T_{air} (sensibilité de 27% pour les 2 cas), au coefficient de convection h_v (sensibilité de 24% pour les 2 cas) et à la température d'injection du fluide T_{inj} (sensibilité de 18% pour le cas 1 et 17% pour le cas 2). Après il a la même sensibilité (sensibilité de 7% pour le cas 1 et 8% pour le cas 2) par rapport à la conductivité hydraulique K, le dévers β et la capacité thermique du fluide $(\rho C)_{eau}$. La sensibilité totale de tous les autres paramètres est de 10% pour le cas 1 et 8% pour le cas 2. D'une part, les paramètres environnementaux T_{air} et h_v representent 51% de la sensibilité, mais malheureusement, ils ne sont pas contrôlables. D'autre part, la température d'injection du fluide T_{inj}, la conductivité hydraulique K, le dévers β et la capacité thermique du fluide $(\rho C)_{eau}$ représentant 39% de la sensibilité pour le cas 1 et 41% de la sensibilité pour le cas 2. Ces paramètres sont contrôlables pour maintenir la température de surface positive.

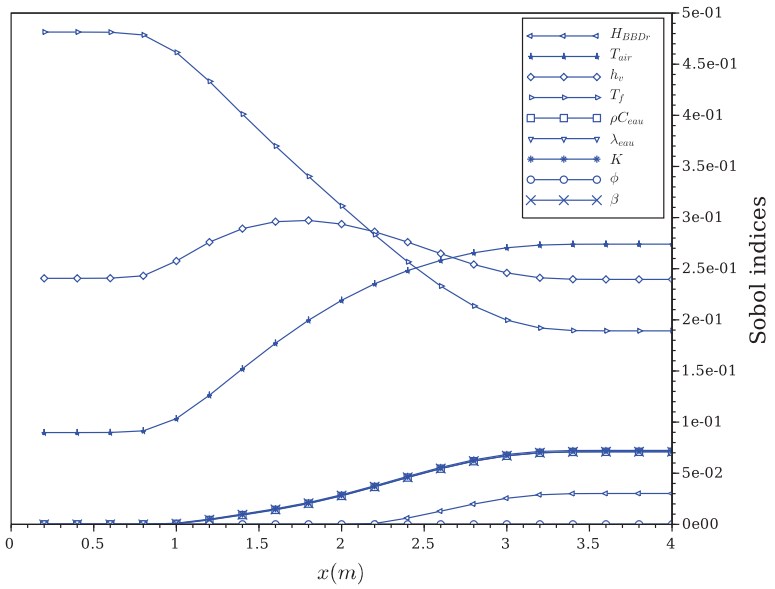


Figure 3.10: Indices de Sobol pour un écart type de 10% (T_f est la température d'injection de l'eau)

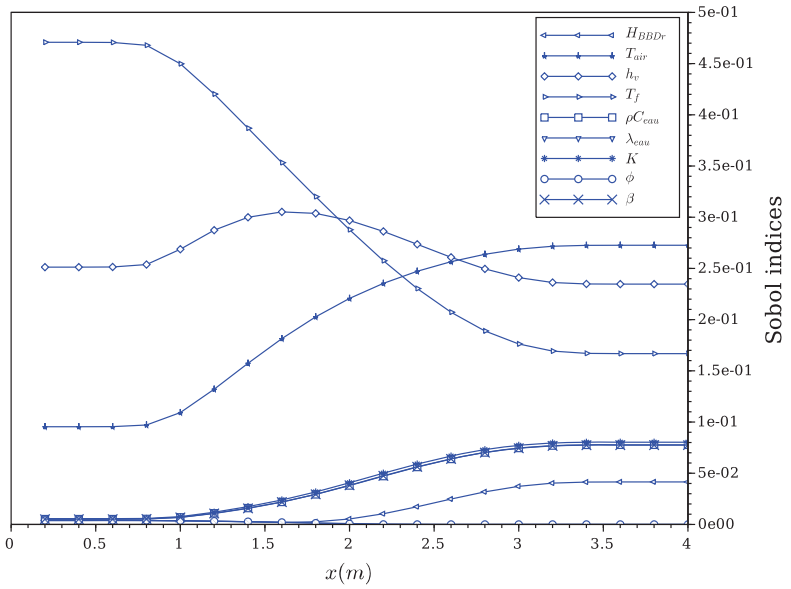


Figure 3.11: Indices de Sobol pour un écart type de 20% (T_f est la température d'injection de l'eau)

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe d'écoulement et le transfert thermiqe dans un milieu poreux à partir desquels, nous avons dégagé l'équation d'équilibre thermique. Ensuite nous avons présenté le modèle thermo-hydraulique transitoire bidimensionnel basé sur cette équation de la chaleur, pour le dispositif de chaussée drainante.

Nous avons pris des hypothèses afin de définir le modèle thermo-hydraulique :

- la couche poreuse est totalement saturée en eau ;
- l'eau ne se transforme pas en vapeur ;
- il n'y a pas de source d'énergie à l'intérieur de la chaussée ;
- tous les paramètres sont indépendants de la température.

Nous avons étudié la sensibilité des paramètres d'entrées de ce modèle sur la température de surface. Nous avons défini les indices de Sobol afin de déterminer cette sensibilité. Nous nous sommes intéressés à l'influence de ces paramètres sur la température de surface pour $x = L$, comme c'est la position critique de la température de surface pendant l'hiver.

Les résultats de cette étude montrent que la température de surface pour $x = 4\ m$ ($L = 4\ m$) est fortement influencée par les paramètres environnementaux T_{air} et h_v qui sont des paramètres non contrôlables. Les paramètres contrôlables et les plus influents, sur lesquels on peut agir pour maintenir cette température positive, sont : T_{inj}, K, β et $(\rho C)_{eau}$.

4 Validation expérimentale du modèle thermo-hydraulique

4.1 Présentation du système expérimental

4.1.1 Description

Dans le cadre d'une convention entre l'EATP (École d'Application des Travaux Publics) et le Cerema Centre-Est (Centre d'études et d'éxpertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement Centre-Est), une chaussée a été construite et instrumentée sur le site de l'EATP à Egletons. Elle est placée en extérieur et est soumise aux conditions climatiques naturelles mais non soumise au trafic (figure 4.1). Elle a été construite afin de valider expérimentalement la fonction d'échangeur thermique de récupération d'énergie solaire pendant l'été et de maintien hors-gel la surface pendant l'hiver. Ce site instrumenté sert à récolter des données météorologiques et à identifier les paramètres thermiques et hydrauliques du modèle 2D développé dans le chapitre précédent.

Ce demonstrateur a été construit en 2014 à Egletons. La chaussée instrumentée est composée de trois couches principales et comporte deux zones (chaussée témoin et chaussée présentant la fonction d'échangeur thermique). Elle fait au total 50 m de longueur et 4 m de largeur avec un dévers de 2% et une pente longitudinale de 0.5%. La maquette dans laquelle circule le fluide est de 4 m de longueur et 4 m de largeur. Grâce à ce dévers de 2%, qui crée une différence de charge hydraulique entre la partie amont et aval de la chaussée, l'eau circule dans la couche de liaison drainante. En partie amont, l'eau est introduite dans un bac à température ambiante ou régulée

Figure 4.1: Démonstrateur d'Égletons

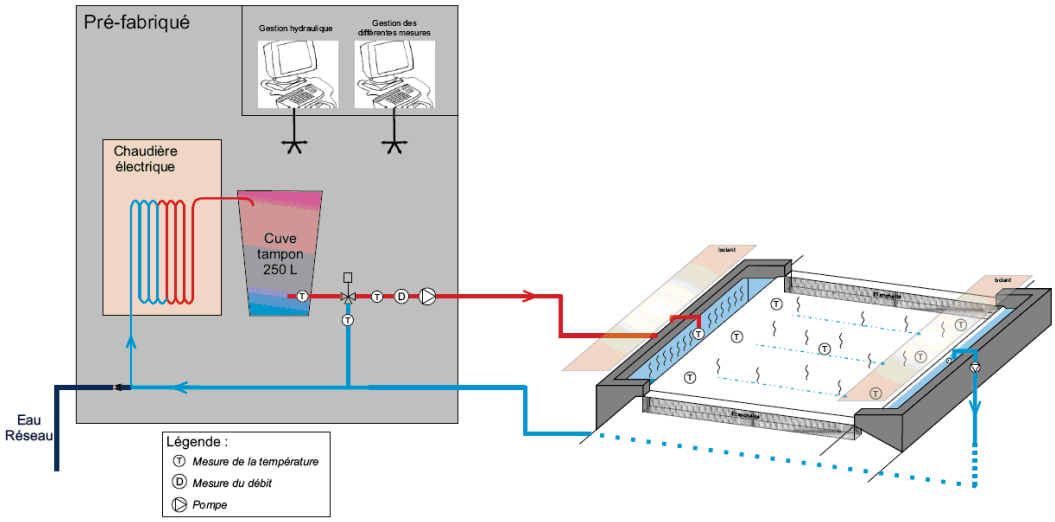


Figure 4.2: Schéma de principe de la gestion hydraulique

pour la fonction de chauffage. Cette eau est récupérée par la partie aval, grâce à un deuxième bac (figure 4.2). On a créé un circuit fermé pour la circulation de l'eau et on impose un régime hydraulique permanent. L'eau circule exclusivement dans la couche drainante. Une étanchéité a donc été placée sous la couche drainante.

Le système hydraulique installé par les techniciens du DLCF (figure 4.2) consiste à assurer l'écoulement du fluide caloporteur (eau) à l'intérieur de la couche de liaison drainante. Le bac en béton en amont du dévers est alimenté en eau à l'aide d'un circulateur assurant une charge hydraulique dans le bac amont. L'eau circule par gravité dans la couche drainante et s'écoule dans le bac en aval. Une pompe de relevage installée dans ce bac permet de relever le fluide vers l'amont et le système hydraulique fonctionne ainsi en circuit fermé. Pour une fonction de chauffage de l'échangeur thermique fluide-chaussée, le fluide est chauffé en amont par une chaudière électrique (ce dispositif sera remplacé par un système géothermique). Pour une fonction de récupération d'énergie (été), la chaudière électrique est inactive. L'ensemble du système est piloté par un logiciel de régulation hydraulique et thermique opérable à distance (figure 4.3) : les charges hydrauliques peuvent être fixées par l'utilisateur via des sondes de niveau du liquide dans les bacs amont et avl, ainsi que la température d'injection du fluide du bac amont (température de la chaudière et thermoplongeurs placés dans le bac amont).

Les figures 4.4 et 4.5 représentent les deux logiciels d'acquisition des capteurs météorologiques et de mesure de températures du corps de chaussée.

Le démonstrateur est composé de deux parties :

- une chaussée témoin sans dispositif de circulation de fluide (zone B) ;

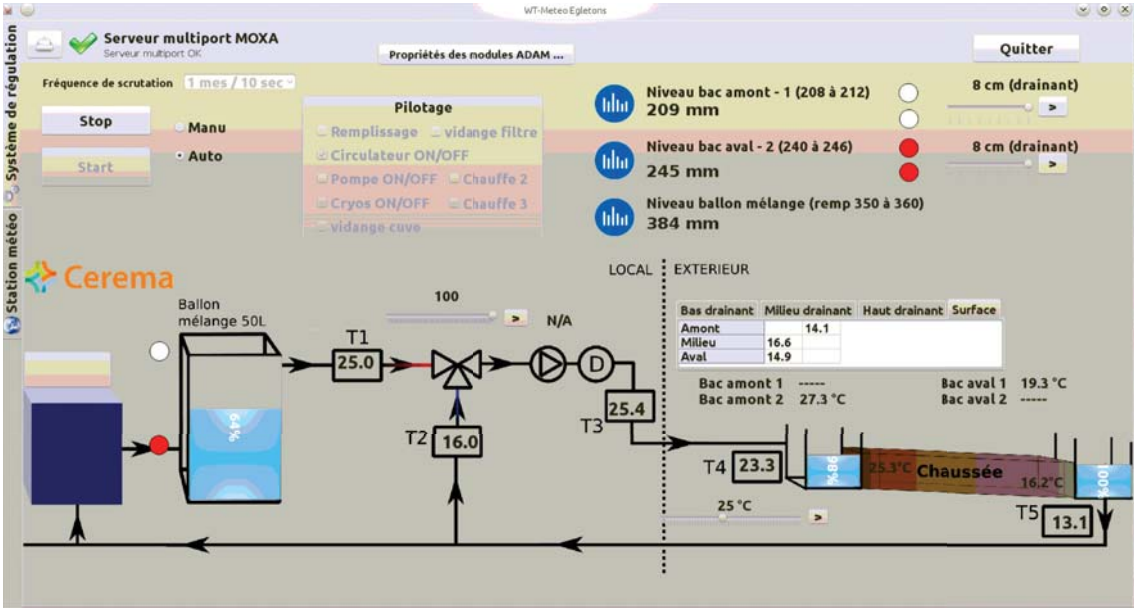


Figure 4.3: Logiciel de régulation thermo-hydraulique

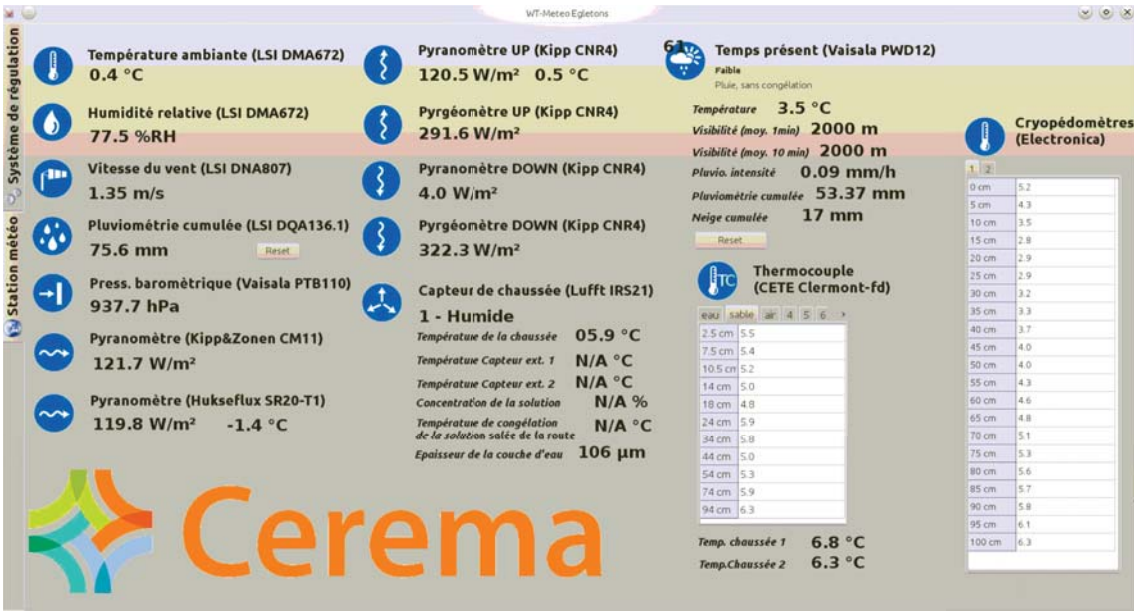


Figure 4.4: Premier logiciel d'acquisition des capteurs (modules ADAM)

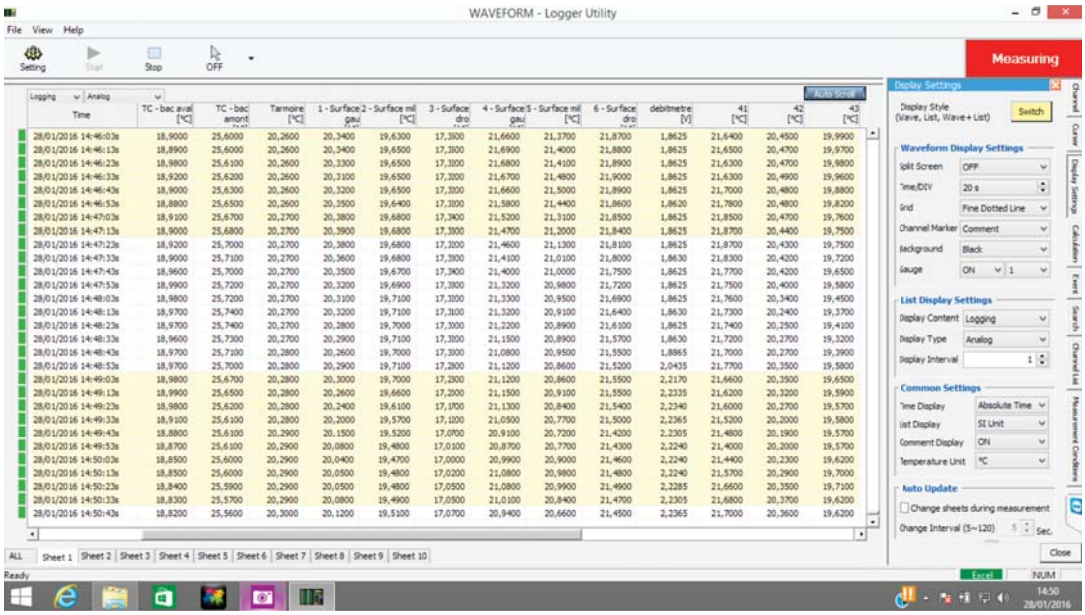


Figure 4.5: Deuxième logiciel d'acquisition des capteurs (module Hioki)

Figure 4.6: Vue de la chaudière, de l'ordinateur de pilotage et de la cuve tampon

Figure 4.7: Vue de de la cuve tampon, de la vanne « 3 voies », du débitmètre, du circulateur et du filtre

- une chaussée présentant la fonction échangeur thermique (zone A).

La partie témoin est la partie dans laquelle l'eau ne circule pas. Elle sert à étudier l'effet de l'absence de circulation d'un fluide caloporteur sur la température de surface et la répartition du champ de température dans le corps de chaussée par comparaison avec la zone de circulation du fluide. De plus, cette chaussée témoin sert à identifier les paramètres thermiques de la chaussée (hors paramètres hydrauliques).

En plus de la chaussée et du système de circulation de fluide, le site a été instrumenté pour mesurer :

- le champ thermique dans le corps de la chaussée sur une profondeur d'un mètre à l'aide de cannes cryopédométriques (à base de thermocouples et des sondes PT100 pour la zone A) et des thermocouples dans la zone B ;
- l'état de surface de la chaussée témoin (section 4.1.5) ;
- les paramètres météorologiques (section 4.1.5).

4.1.2 Schéma en plan

Un schéma en plan de la construction est donné sur la figure 4.8. Il incorpore le positionnement des capteurs de température de surface, des cannes cryopédomètriques (2 cannes avec sondes PT100 et trois cannes avec thermocouples) et des capteurs météorologiques (section 4.1.5) dans la zone B.

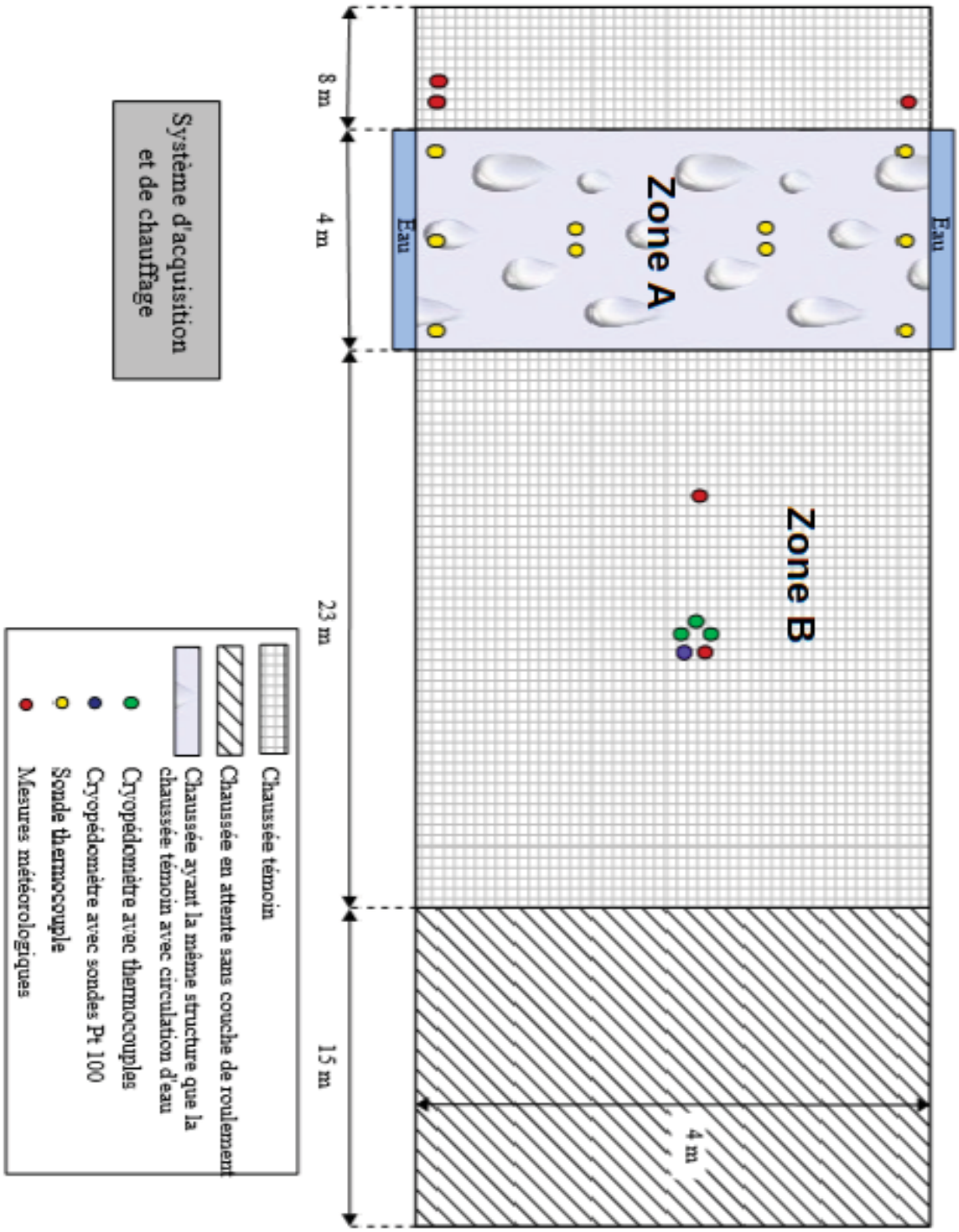


Figure 4.8: Vue de dessus de l'expérimentation

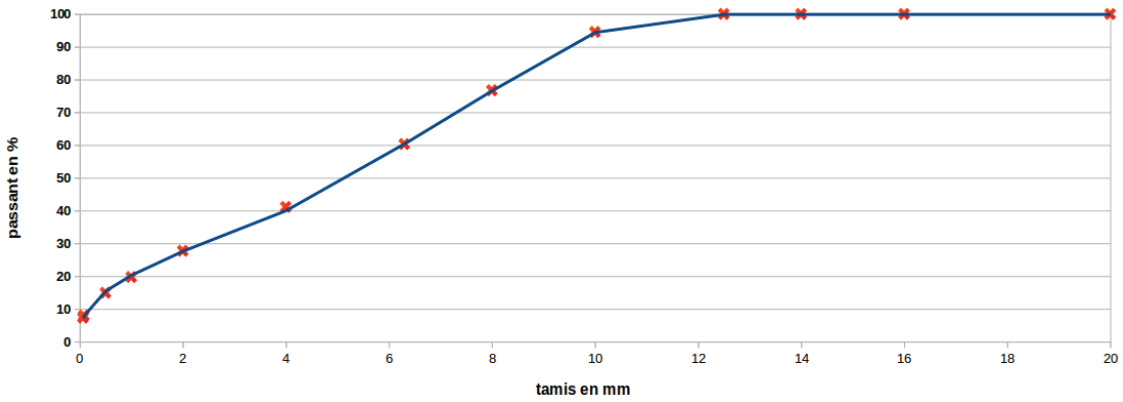


Figure 4.9: Répartition granulométrique dans la couche BBSG

4.1.3 Profils en travers de la chaussée : zone A et B

La chaussée avec un dévers de 2% et une pente longitudinale de 0.5% est constituée du haut vers le bas de:

- béton bitumineux semi grenu (BBSG) 0/10 (NF EN 13108-1) de 6 cm d'épaisseur ;
- béton bitumineux drainant (BBDR) 0/14 (NF EN 13108-7) de 8 cm d'épaisseur ;
- enrobé à module élevé (EME) 0/14 (NF EN 13108-1) de 5 cm d'épaisseur ;
- plate-forme de niveau de portance PF2 (50 MPa minimum).

La répartition granulométrique pour chacune de ces trois couches est illustrée dans les figures 4.9, 4.10 et 4.11 et résumée dans le tableau 4.1. La description en détail se trouve dans l'annexe A.

BBSG	granulats	0/2	0/4	4/6	6/10	10/14	aggrégats	liant	filler d'apport
	% passant	-	24	14	34.1	-	20	5.4	2.5
BBDR	granulats	0/2	0/4	4/6	6/10	10/14	aggrégats	liant	filler d'apport
	% passant	14	-	-	32	47.1	-	4.9	2
EME	granulats	0/2	0/4	4/6	6/10	10/14	aggrégats	liant	filler d'apport
	% passant	-	43.5	12.5	13.5	23.4	-	5.6	1.5

Tableau 4.1: Distribution de % passants à travers les tamis

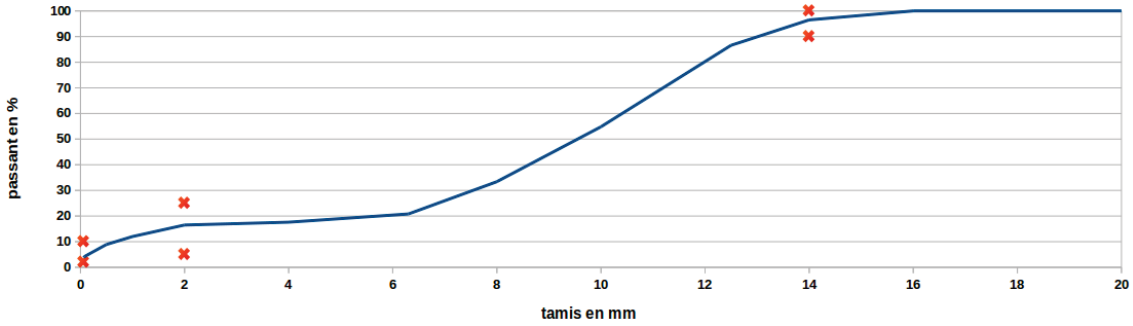


Figure 4.10: Répartition granulométrique dans la couche BBDR

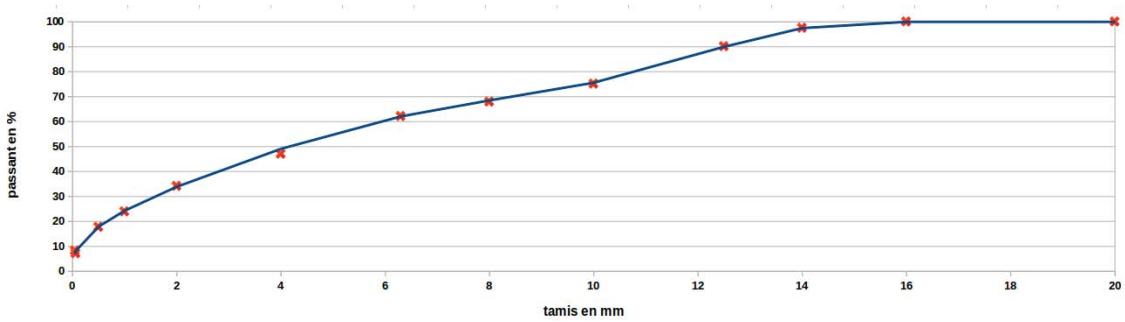


Figure 4.11: Répartition granulométrique dans la couche EME

Les profils en travers d'ensemble de la zone A sont représentés sur les figures 4.12, 4.13 et 4.14. Ces profils correspondent aux profils en travers de la zone B mais sans la présence des deux bacs et de l'étanchéité. Des thermocouples sont positionnés sur la zone A, afin qu'on puisse déterminer les valeurs de la température dans le corps de la chaussée et les comparer avec les valeurs données par un modèle de simulation thermo-hydraulique bidimensionnel que l'on développe. Le positionnement des thermocouples dans le corps de chaussée en zone A est indiqué sur la figure 4.15.

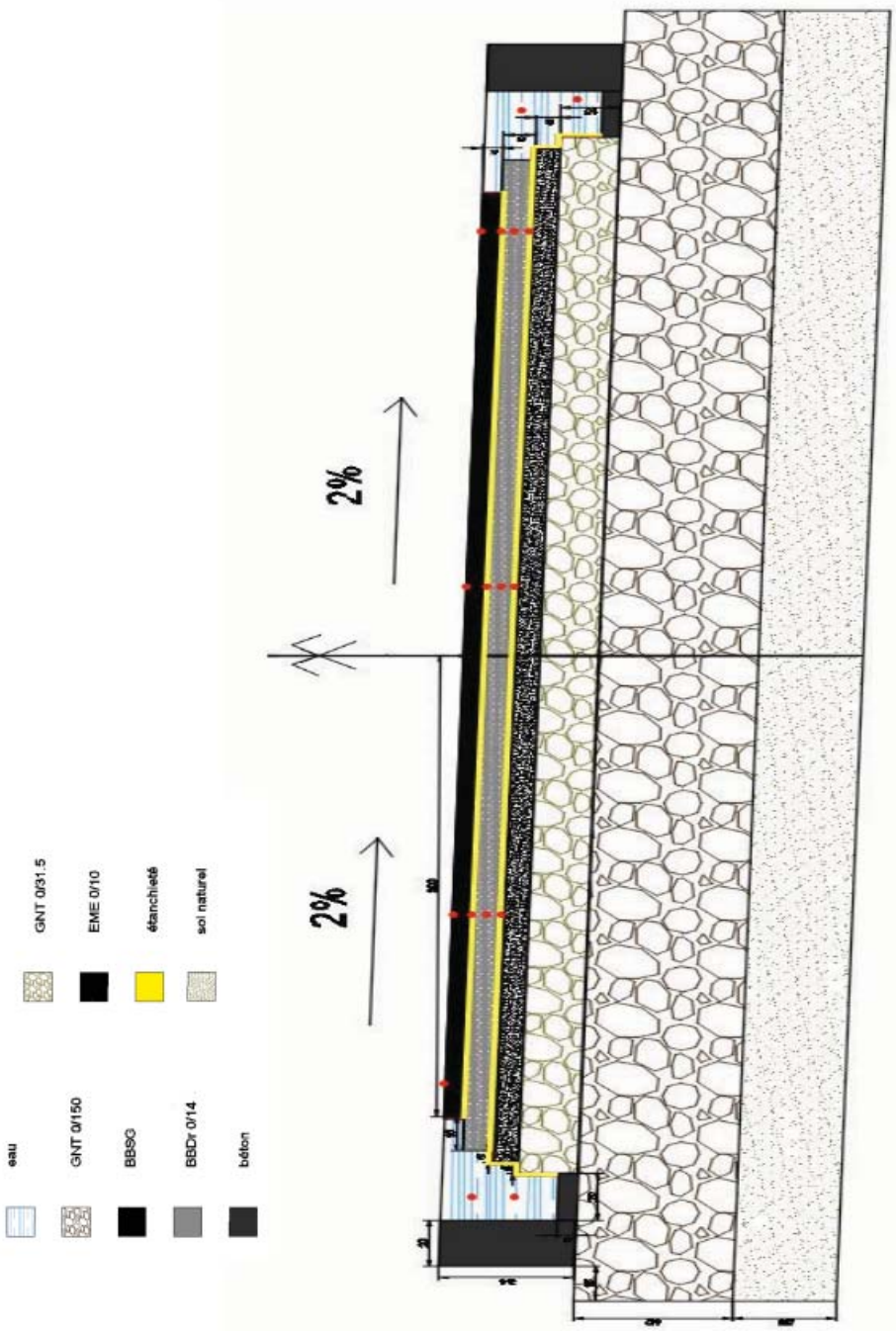


Figure 4.12: Profil en travers d'ensemble de la chaussée avec les réservoirs en béton pour l'alimentation et la récupération de l'eau

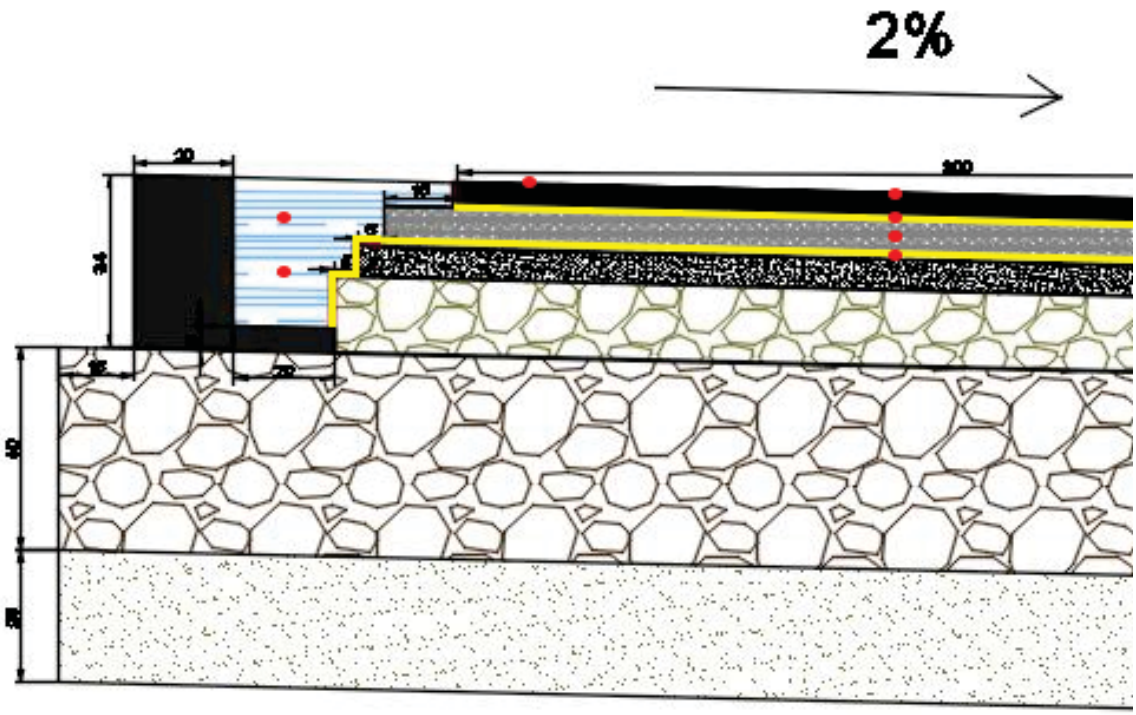


Figure 4.13: Profil en travers amont avec le réservoir en béton pour l'alimentation de l'eau (le cas échéant)

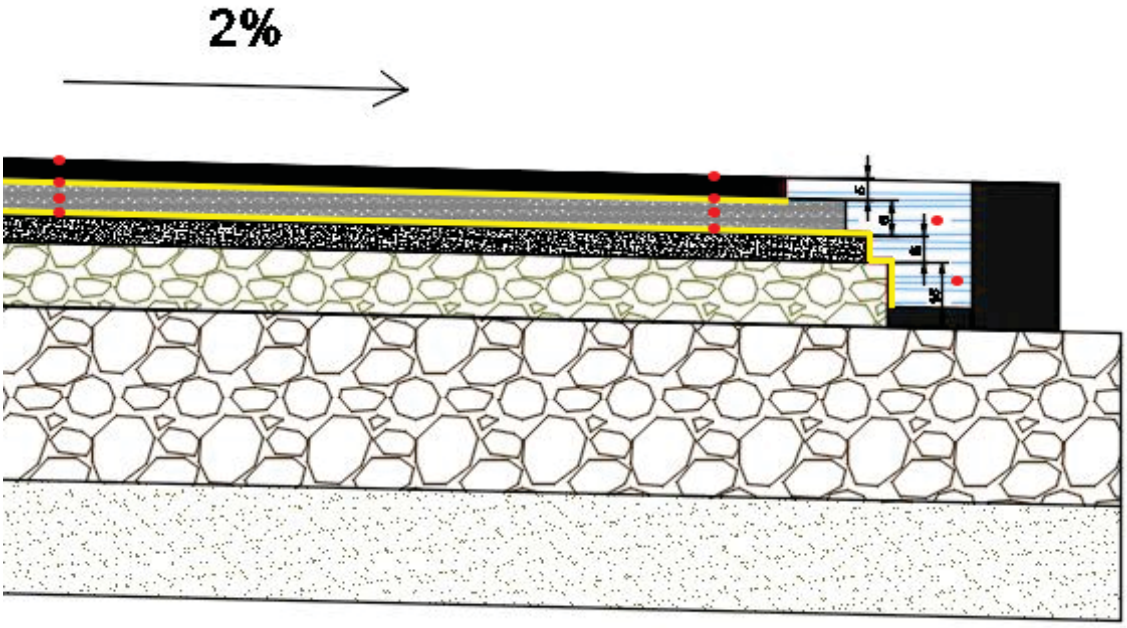


Figure 4.14: Profil en travers aval avec le réservoir en béton pour la récupération de l'eau (le cas échéant)

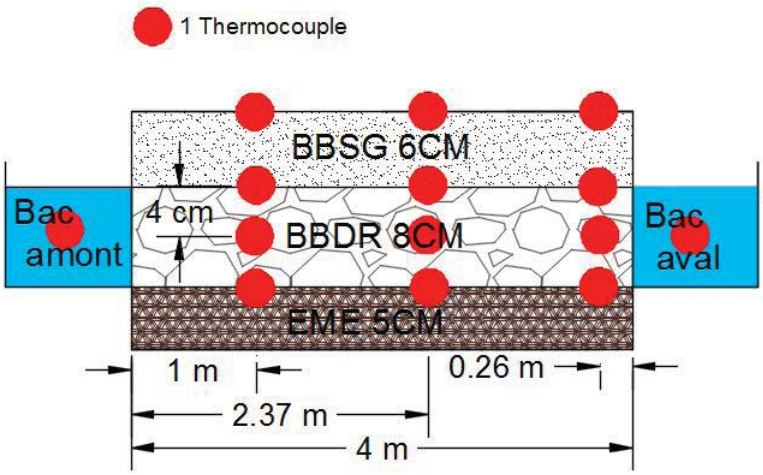


Figure 4.15: Position des thermocouples dans la zone A

4.1.4 Travaux entrepris

Il faut bien étancher la couche drainante (BBDR) pour assurer la circulation de l'eau exclusivement dans cette couche et éviter les infiltrations d'eau de pluie provenant de la couche du dessus (BBSG) (figures 4.16 et 4.17). Pour cette raison, on a utilisé des feuilles d'étanchéité à base d'asphalte utilisées pour les étanchéités des ouvrages d'art. Les travaux ont consisté à :

- poser une couche de BBSG de reprofilage au niveau de la zone B du dispositif de circulation du fluide, afin d'obtenir une surface saine comme support de l'étanchéité ;
- poser une étanchéité sur la couche de reprofilage et à l'intérieur des bacs amont et aval ;
- poser une couche d'accrochage sur la zone A qui est la totalité du démonstrateur hormis la zone B ;
- poser un enrobé drainant sur l'ensemble des 50 m, hormis 14 m laissés en attente (pour l'éventualité de tests sur d'autres dispositifs de récupération d'énergie) ;
- poser une étanchéité sur la couche d'enrobé drainant au niveau de la zone B (pour éviter l'infiltration d'eau de pluie qui viendrait contaminer le fluide caloporteur) avec une descente d'étanchéité rejoignant l'étanchéité inférieure (pour canaliser la circulation du fluide caloporteur entre les deux bacs) ;
- poser une couche de BBSG (couche de roulement) sur les zones A et B hormis la zone de 14 m laissée en attente.

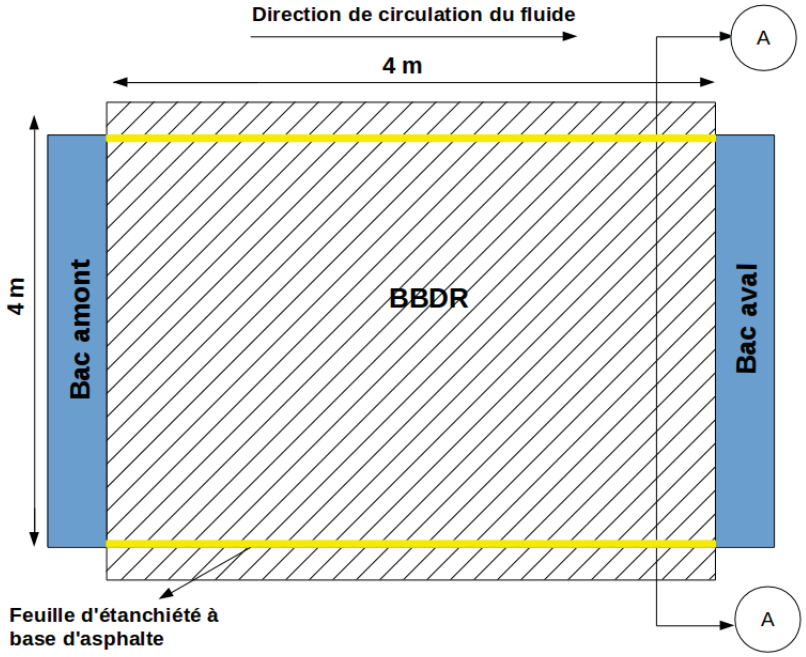


Figure 4.16: Vue de dessus (coupe BB)

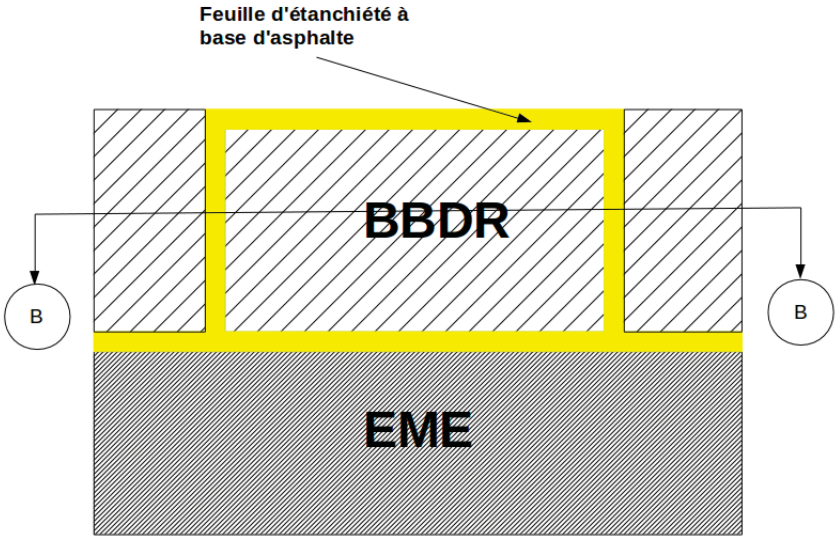


Figure 4.17: Vue en travers de la coupe AA

Figure 4.18: Photographies de l'étanchéité inférieure en zone A après la pose de l'enrobé de reprofilage

L'ensemble de ces différentes étapes est illustré sur les figures 4.18, 4.19, 4.20 et 4.21.

Figure 4.19: Photographies de la pose du BBDR

Figure 4.20: Photographies de la pose de l'étanchéité supérieure en zone A

Figure 4.21: Photographies après la pose du BBSG en couche de roulement

4.1.5 Capteurs de mesure des variables météorologiques

Les différentes variables mesurées et les capteurs associés sont répertoriés dans le tableau 4.2. Les capteurs sont représentés sur les figures 4.22 à 4.25. Les spécifications techniques des capteurs et des modules d'acquisition sont fournies en annexe B.

Dans la suite, nous présentons le modèle thermique 1D duquel on cherchera à identifier les paramètres.

Variable mesurée	**Capteur associé**
Température et humidité de l'air Vitesse du vent	Sonde hygrothermique et anémomètre à coupelle (figure 4.22-a))
Pluviométrie	Pluviomètre chauffant à augets basculants avec une surface de collecte de 1000 cm2 (figure 4.22-b))
Rayonnement dans le visible	2 pyranomètres « tête-bêche » pour la mesure du flux incident (venant du ciel) et du flux réfléchi de la chaussée. Mesure de l'albedo de la chaussée ainsi possible. 2 pyranomètres supplémentaires pour la mesure du flux incident (figure 4.23).
Rayonnement infrarouge	2 pyrgéomètres « tête-bêche » pour la mesure du flux incident (venant du ciel) et du flux émis par la chaussée. Mesure de l'émissivité de la chaussée ainsi possible (figure 4.24)
Temps présent	Capteur temps présent (figure 4.22-c)) permettant de : • caractériser le temps qu'il fait (beau temps, pluie, neige, bruine, brouillard, etc.) ; • mesurer la pluviométrie
État de la chaussée	Capteur intrusif installé en surface de chaussée (figure 4.25) permettant de : • caractériser l'état de la chaussée (sec, humide, mouillée, salée, verglacée) ; • mesurer la température de surface de la chaussée ; • la hauteur d'eau sur la chaussée.

Tableau 4.2: Variables météorologiques et de chaussée mesurées et capteurs associés

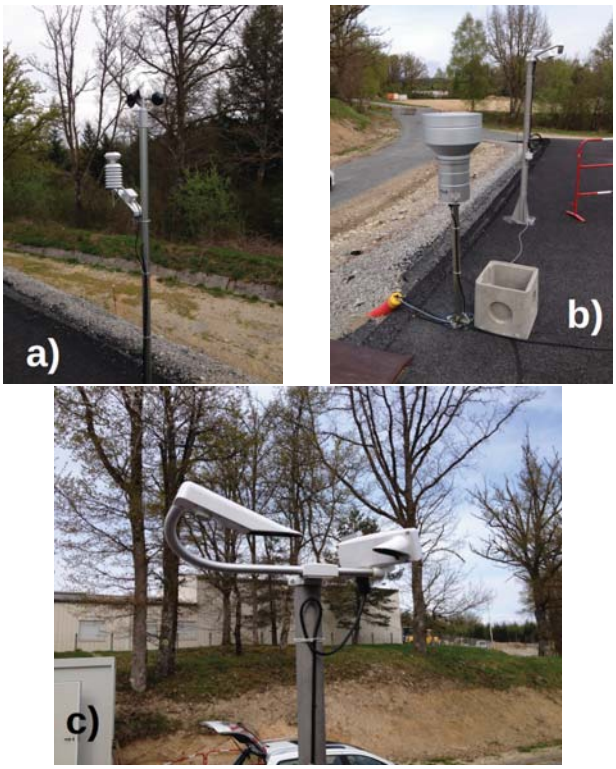


Figure 4.22: Sonde hygrothermique, anémomètre a), pluviomètre b) et capteur temps présent c)

Figure 4.23: Pyranomètres pour la mesure du flux visible incident

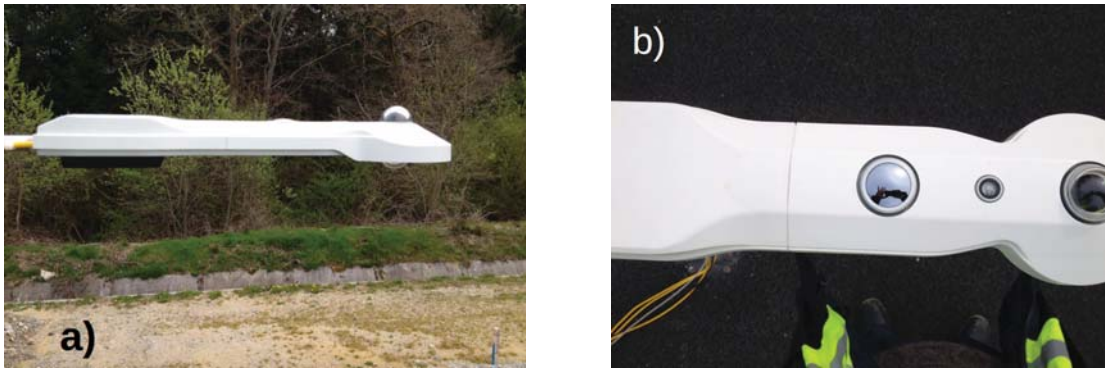


Figure 4.24: a) et b) représentent le même capteur qui a, à la fois, pyranomètres et pyrgéomètres

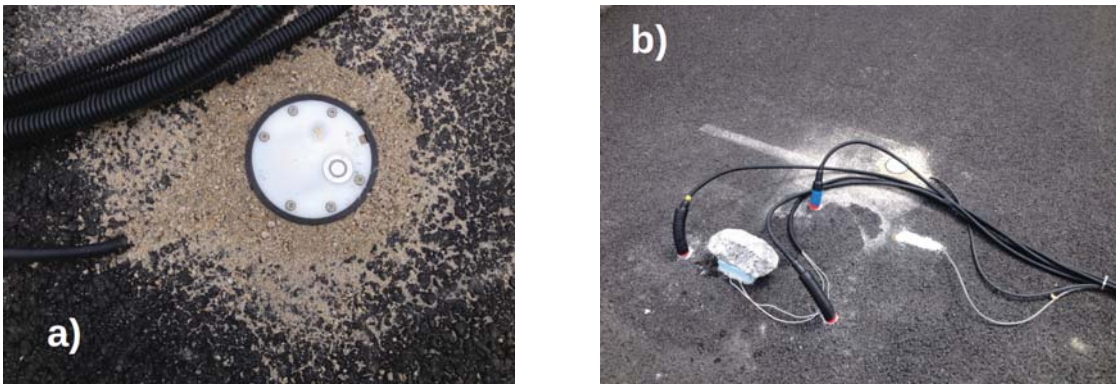


Figure 4.25: Cryopédomètres pour la température dans le corps de chaussée de la zone A a) et capteur d'état de surface b)

4.2 Présentation du modèle thermique 1D

Le modèle thermique présenté est un modèle unidimensionnel, avec lequel on peut simuler la distribution du champ de température $T(t, y)$ en fonction du temps et de la profondeur dans la chaussée y. Ce modèle est appliqué à une chaussée de 4 couches. On note h la hauteur de la chaussée et e_i l'epaisseur de chaque couche. On obtient ainsi le modèle suivant (Reddy et al (2010)), où i désigne l'indice de la couche considérée ($i = 1$ à 4) . Pour $0 \leq y \leq h$:

$$(\rho C)_i \frac{\partial T}{\partial t}(t, y) = \lambda_i \triangle T(t, y) \tag{4.1}$$

Comme on a déjà décrit dans la section 4.1, on a implanté sur la chaussée témoin deux cannes de cryopédomètres très proches. Chaque canne est formée de 21 capteurs espacés de 5 cm. Par la suite, on obtient 42 capteurs qui mesurent 42 valeurs de températures espacés entre eux de 2.5 cm (le deuxième cryopédomètre est décalé de 2.5 cm en hauteur). Le deuxième capteur mesure la température de surface, alors que le 42 ème capteur mesure la température au bout de 1 m (le premier capteur est situé à 2.5 cm au dessus de la surface et n'est pas utilisé).

Le modèle est simulé par une discrétisation aux différences finies en espace y et par un schéma d'Euler implicite en temps. Le code associé a été implémenté en Fortran 90. On a utilisé un maillage régulier de 41 points dans les quatre couches qui correspondent aux positions des 41 capteurs de cryopédomètres espacés de 2.5 *cm* depuis la surface jusqu'à 1 m de profondeur. On a fait des simulations journalières avec un pas de temps (*pdt*) de 600 sec sur une hauteur h de 1 m. On a étudié l'influence de *pdt* et du nombre de points de maillage *pmail* sur l'erreur entre la température simulée dans les trois premières couches de la chaussée et celle calculée à l'aide d'une fonction explicite dans un cas particulier.

Influence du pas de temps et nombre de points de maillage sur l'erreur entre la température simulée et celle de la fonction explicite. La température du sol est exprimée en fonction de la profondeur (y) et du temps (t) sous la forme $T(t, y)$. On se place dans un cas où $T(t, 0)$ est une fonction sinusoïdale caractérisée par une température moyenne T_{moy}, par une amplitude T_0 et par une pulsation ω :

$$T(t, 0) = T_{moy} + T_0 cos(\omega t) \tag{4.2}$$

avec $\omega = \frac{2\pi}{T_p}$

où T_p est la période (s)

La propagation de l'onde thermique dans le sol obéit aux lois générales décrivant les transferts de chaleur dans le sol. On considère pour cette étude sur l'influence des pas de temps et d'espace, un sol de trois couches :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} = \frac{1}{a_i}\frac{\partial T}{\partial t} \tag{4.3}$$

où a_i est la diffusivité thermique dans chaque couche i (m^2/s), pour $1 \leq i \leq 3$.

Les conditions aux limites à prendre en compte sont les suivantes :

- $T(t,0) = T_{moy} + T_0 cos(\omega\, t)$;
- $T(t,\infty) = T_{moy}$.

On cherche alors une solution sous la forme $\bar{T}(t,y) - T_{moy} = exp(iwt)f(y)$, où $\bar{T}(t,y)$ est la température complexe vérifiant $\mathrm{Re}(\bar{T}(t,y)) = T(t,y)$. La fonction complexe f est solution de l'équation (4.3) :

$$\frac{d^2 f}{dy^2} - i\frac{w}{a}f = 0 \tag{4.4}$$

Posons la variable $\Theta(t,y) = exp(iwt)f(y)$

- pour $y < y_1$,

$$\Theta(t,y) = \left[A_1\, exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{a}}y\right) + B_1\, exp\left(+\sqrt{\frac{i\omega}{a}}y\right)\right] exp(iwt) \tag{4.5}$$

- pour $y_1 < y < y_1$,

$$\Theta(t,y) = \left[A_2\, exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{a}}y\right) + B_2\, exp\left(+\sqrt{\frac{i\omega}{a}}y\right)\right] exp(iwt) \tag{4.6}$$

- pour $y > y_2$,

$$\Theta(t,y) = \left[A_3\, exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{a}}y\right) + B_3\, exp\left(+\sqrt{\frac{i\omega}{a}}y\right)\right] exp(iwt) \tag{4.7}$$

Lorsque $y \to \infty$, $\Theta(t,y)$ reste borné d'où $B_3 = 0$, et par suite :

$$\Theta(t,y) = \left[A_3\, exp\left(-\sqrt{\frac{i\omega}{a}}y\right)\right] exp(iwt) \tag{4.8}$$

Il reste à déterminer les constantes A_1, B_1, A_2, B_2 et A_3 afin de déterminer l'équation de température dans chaque couche. Pour cela le champ de température doit vérifier les conditions suivantes :

- condition à la surface :

$$\Theta(0,0) = T_0 \tag{4.9}$$

- la loi de continuité de température :

$$\Theta(t, y_1^-) = \Theta(t, y_1^+) \Leftrightarrow f(y_1^-) = f(y_1^+) \tag{4.10}$$

$$\Theta(t, y_2^-) = \Theta(t, y_2^+) \Leftrightarrow f(y_2^-) = f(y_2^+) \tag{4.11}$$

- la loi de continuité de flux thermique :

$$\lambda_1 \frac{\partial \Theta}{\partial y}(t, y_1^-) = \lambda_2 \frac{\partial \Theta}{\partial y}(t, y_1^+) \Leftrightarrow \lambda_1 f'(y_1^-) = \lambda_2 f'(y_1^+) \tag{4.12}$$

$$\lambda_2 \frac{\partial \Theta}{\partial y}(t, y_2^-) = \lambda_3 \frac{\partial \Theta}{\partial y}(t, y_2^+) \Leftrightarrow \lambda_2 f'(y_2^-) = \lambda_2 f'(y_2^+) \tag{4.13}$$

Le dévéloppement et le calcul de la fonction explicite ont été établis dans [114].

On a fait les simulations sur une chaussée de trois couches identiques de 1 m de profondeur (tableau 4.3) .

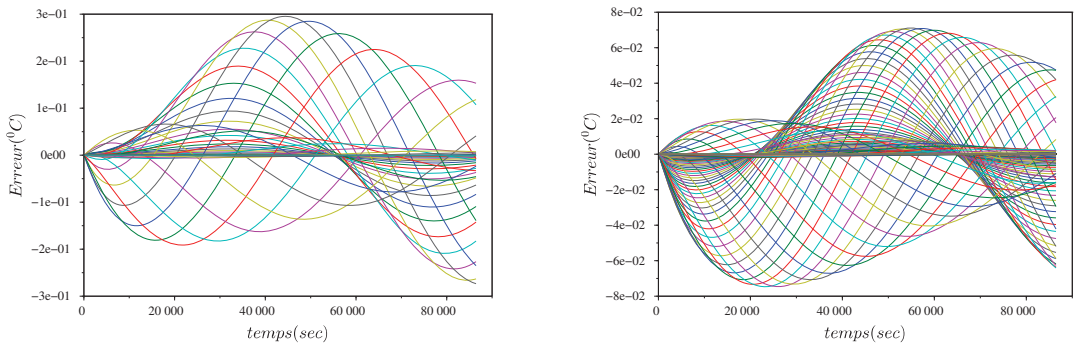
On a testé deux valeurs de pas de temps 60 et 600 *sec* et deux maillages différents ($pmail = 40$ et $pmail = 100$). Les résultats sont illustrés dans les figures 4.26 et 4.27. On remarque que plus le pas de temps diminue et plus le nombre de points de maillage augmente, plus l'erreur diminue. On a choisi de prendre un pas de temps de 600 s et un nombre de points de maillage de 40 points, conduisant à une erreur maximale de 0.8 ^{o}C qui est comparable aux erreurs de capteurs.

On retient un pas de temps de 600 sec car c'est de l'ordre de grandeur des erreurs de capteurs.

On présente désormais les conditions limites pour notre modèle 1D de résolution de l'équation de chaleur d'une chaussée soumise à la météorologie.

T_0	$25\,^oC$
T_{moy}	$5\,^oC$
T_p	$1 jour$
$\lambda_{1,2,3}$	$2\,W/m.k$
$(\rho_C)1,2,3$	$2.10^6\,J/m^3.k$
e_1	$6\,cm$
e_2	$8\,cm$
e_3	$86\,cm$

Tableau 4.3: Données d'entrées pour le code de simulation



(a) *pmail* 40 **(b)** *pmail* 100

Figure 4.26: Comparaison entre la température simulée et la température calculée par la fonction explicite pour $pdt = 60\,s$

Conditions limites. Le bilan énergetique à la surface de la chaussée s'exprime par (figure 4.28) :

$$(1-\alpha)\,R_g + R_{at} - R_{surf} - h_v(T_s - T_{air}) - q = 0 \tag{4.14}$$

où

α est l'albédo ;

R_g est le rayonnement global (W/m^2) ;

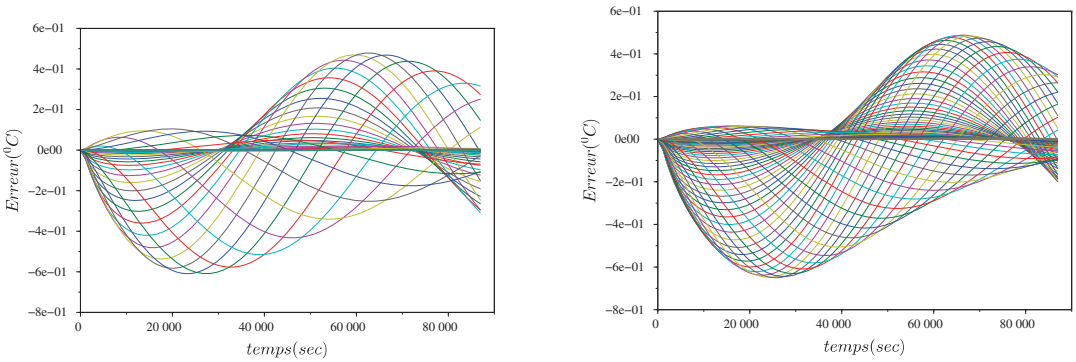
R_{atm} est le rayonnement atmosphérique (W/m^2) ;

R_{surf} est le rayonnement émis par la surface (W/m^2) ;

h_v est le coefficient d'échange convective en surface ($W/m^2.K$) ;

T_s est la température de surface de la chaussée (^oC) ;

T_{air} est la température de l'air (^oC) ;



(a) *pmail* 40 **(b)** *pmail* 100

Figure 4.27: Comparaison entre la température simulée et la température calculée par la fonction explicite pour *pdt* de 600 s

q est le flux de conduction (W/m^2).

Le rayonnment atmosphérique R_{atm} est mesuré à l'aide des capteurs sur le démonstrateur.

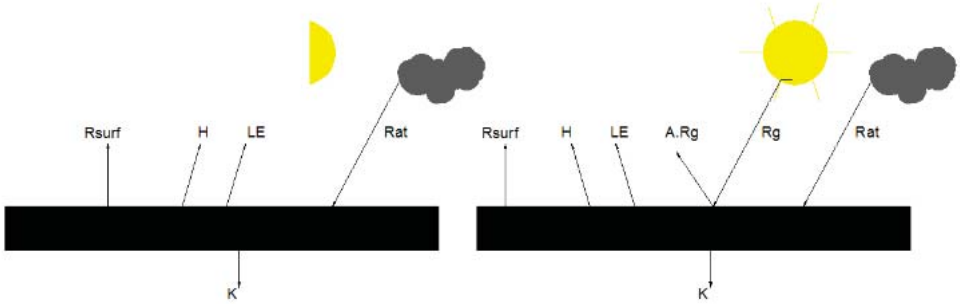


Figure 4.28: Réprésentation schématique des bilans d'énergie de jour et de nuit au niveau de la surface du sol

Dans la littérature, de nombreuses fonctions H_v sont utilisées pour le phénomène de convection en surface [115] :

$$H_v = Cp_a \times \rho_a(V_{vent}C_d\,(u(t,0) - Tair) + C_{d_1}) \tag{4.15}$$

où

Cp_a est la capacité thermique de l'air (J/kg.K) ;

ρ_a est la masse volumique de l'air (kg/m^3).

Aux interfaces des couches, les conditions de continuité de température et de flux thermique sont imposées. Les conditions aux limites retenues dans l'étude sont les suivantes :

- condition en surface : $y = 0$

$$\lambda_1 \frac{\partial T(t,y)}{\partial y} = -(\varepsilon\sigma(T_s(t,0) + 273.15)^4 - R_{atm} - (1-\alpha)R_g + H_v) \quad (4.16)$$

- condition au bord inférieur : $y = 1$

$$\lambda_4 \frac{\partial T(t,y)}{\partial y} = 0 \quad (4.17)$$

On a pris comme condition initiale de température $T\,(0,y)$ celle mesurée dans le corps de la chaussée à $t = 0$.

4.3 Identification des paramètres thermiques et de surface

4.3.1 Introduction

Dans cette partie, on cherche à identifier les paramètres thermiques et les paramètres de surface de la chaussée afin de caler le modèle thermique unidimensionnel présenté ci-dessus dans la section 4.2. On utilise ensuite ces paramètres identifiés afin de caler un modèle thermo-hydraulique bidimensionnel. Pour l'identification, on a utilisé la méthode de gradient conjugué. Cette méthode cherche à minimiser l'erreur quadratique entre les valeurs de températures mesurées et simulées. On a appliqué cette méthode sur les données expérimentales récupérées sur le démonstateur de la chaussée témoin à Égletons du 11 juillet au 28 juillet 2015. Sur cette période de juillet on a des mesures de la température d'air T_{air}, de la vitesse du vent V_{vent}, des rayonnements atmosphériques incident R_{atm} et émis par la chaussée R_{surf} et des rayonnements globaux incident R_g et réfléchi R_g^r. Ces mesures sont utilisées comme des valeurs d'entrées pour le modèle d'identification. À l'aide de ces mesures de rayonnement on a calculé la valeur d'albédo α et d'émissivité ε.

Le premier travail consiste à identifier les chaleurs volumiques $(\rho C)_{1,2,3,4}$ et les conductivités thermiques $(\lambda)_{1,2,3,4}$ des quatre couches de la chaussée, ainsi que l'albédo α, l'émissivité ε et les deux coefficients de convection C_d et C_{d_1}. Dans un premier

temps, on définit comme données d'entrée pour le code de simulation : la géométrie de la chaussée (tableau 4.4), les points de maillage dans chaque couche (41 points espacée de 2.5 cm), le pas de temps (600 s), la période de simulation (1 jour), le nombre de jours de simulation (11 juillet au 28 juillet), le nombre des paramètres à identifier (12 paramètres), les valeurs initiales des paramètres $(\lambda)_{1,2,3,4}$ et $(\rho C)_{1,2,3,4}$ (tableau 4.4), α, ε, C_d et C_{d_1}, le nombre de capteurs (pour comparer les valeurs de températures mesurées par les capteurs et celles simulées), la position de chaque capteur et le nombre d'itérations pour la méthode d'identification. On a besoin aussi comme données d'entrée de la température extérieure T_{air}, de la vitesse du vent V_{vent}, du rayonnement atmosphérique R_{atm} et du rayonnment globale R_g pour un pas de temps de 600 s. En testant cette méthode pour différents nombres de capteurs, le code diverge et ne permettait pas d'identifier l'albédo α et l'émissivité ε. Pour cette raison, on fixe dans la suite la valeur α et ε aux valeurs moyennes calculées à partir des mesures expérimentales sur la période (11 au 28 juillet) dans la section 4.1.5. Le nombre des paramètres à identifier est donc 10.

Dans ce qui suit, nous présentons les mesures expérimentales de la température extérieure, de la vitesse du vent, des rayonnements atmosphériques, des rayonnements globaux sur la période du 11 au 28 juillet.

Ensuite, on présente la méthode utilisée pour l'identification et la stratégie adoptée afin d'identifier les 10 paramètres thermiques et de surface de la chaussée qui seront ensuite utilisés pour le modèle thermo-hydraulique 2D.

profondeur de chaque couche	e_1	e_2	e_3	e_4
valeurs (cm)	6	8	5	100
λ_i (W/m.K)	1	1	1	1
$(\rho C)_i$ (J/m^{-3}K)	2.10^6	2.10^6	2.10^6	2.10^6

Tableau 4.4: Géométrie et caractéristiques thermiques de la chaussée

4.3.2 Données météorologiques utilisées

Dans cette partie, on présente les mesures météorologiques du 11 au 28 juillet des données d'entrée au code de simulation : la température d'air T_{air} (figure 4.29), la vitesse du vent V_{vent} (figure 4.30), les rayonnements atmosphériques incident R_{atm} et émis par la surface R_{surf} (figure 4.31) et les rayonnements globaux incident R_g et réfléchi R_g^r (figure 4.32), la température de surface T_s (figure 4.33) et la température dans le corps de la chaussée mesurée par les cryopédomètres (figure 4.34).

La valeur moyenne d'albédo est calculée à partir des mesures du rayonnement global :

$$\alpha = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{R_g^r\left(t(i)\right)}{R_g(t(i))}\right) \backsimeq 0.08 \tag{4.18}$$

où

N est le nombre de points de mesures temporelles (2592 points).

La valeur moyenne d'émissivité est calculé à partir des mesures du rayonnement atmosphérique et de la température de surface :

$$\varepsilon = \frac{1}{N}\sum_{1}^{N}\left(\frac{R_{surf}\left(t(i)\right)}{\sigma(T_{surf}(t(i)) + 273.15)^4}\right) \backsimeq 0.92 \tag{4.19}$$

où $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ est le constante de Stefan-Boltzmann ;

$T_s(t)$ est la température de surface (^oC).

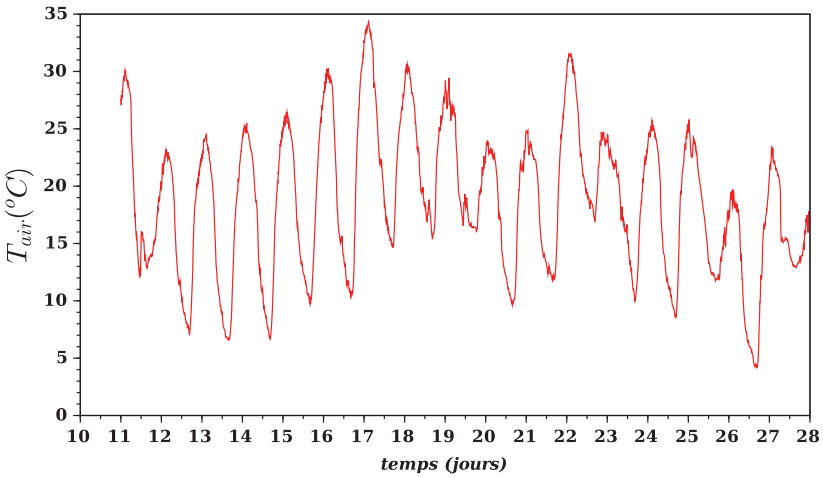


Figure 4.29: Évolution de la température d'air mesurée entre le 10 et 28 juillet

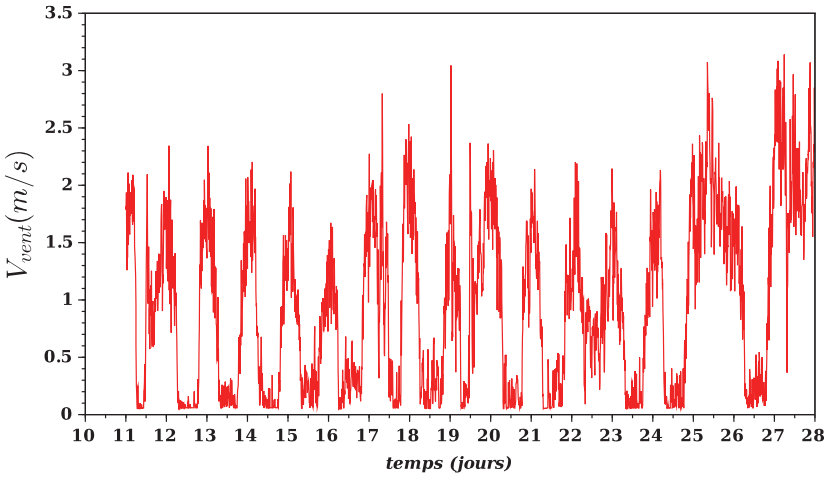


Figure 4.30: Évolution de la vitesse du vent mesurée entre le 10 et 28 juillet

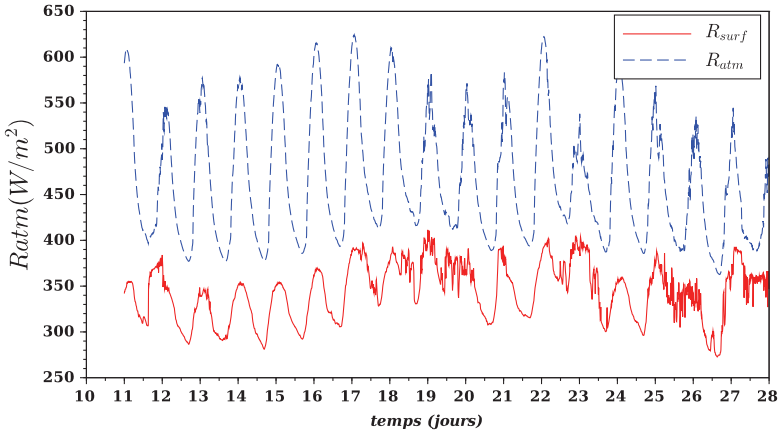


Figure 4.31: Évolution des rayonnements infrarouge atmosphérique incident et émis par la chaussée, mesurés entre le 10 et 28 juillet

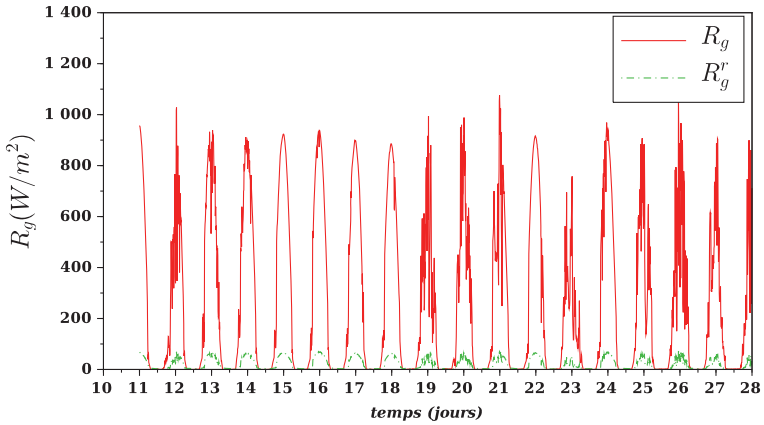


Figure 4.32: Évolution des rayonnements globaux incident et réfléchi mesurés entre le 10 et 28 juillet

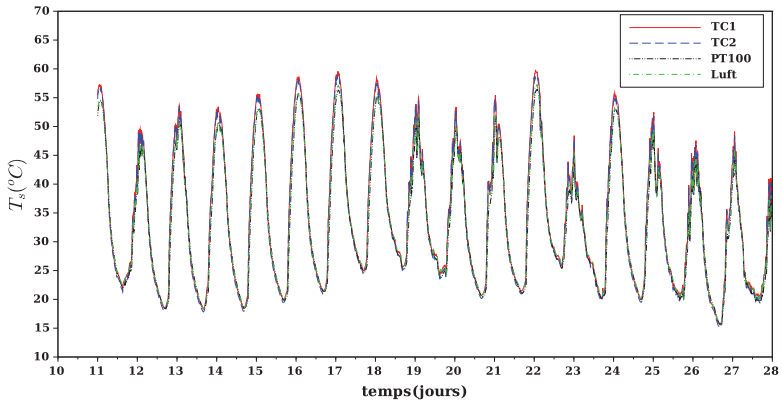


Figure 4.33: Évolution de la température de surface mesurée entre le 10 et 28 juillet

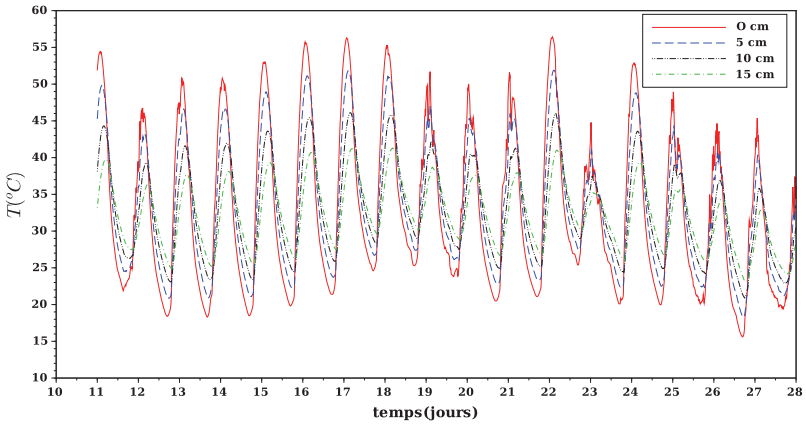


Figure 4.34: Évolution de la température dans le corps de la chaussée mesurée dans la zone B entre le 10 et 28 juillet

4.3.3 Méthode d'identification

4.3.3.1 Introduction

L'identification des paramètres thermiques et physiques, la reconstitution d'une condition aux limites, d'un champ de température ou d'un flux de chaleur est un enjeu

important dans les problèmes de conduction de la chaleur, présents dans de nombreux domaines scientifiques. De nombreux chercheurs ont publié différentes méthodes traitant des problèmes inverses en conduction thermique, souvent notés IHCPs (Inverse Heat Conduction Problems)[116].

Ces problèmes sont donc généralement destinés à déterminer les conductivités thermiques (λ) et chaleurs volumiques (ρC) et à reconstruire un champ de températures. On s'intéresse ici à determiner les caractéristiques thermiques de chaussée en utilisant des données de températures mesurées experimentalement. Il s'agit d'identifier les conductivités thermiques (λ), les chaleurs volumiques (ρC), et les coefficients de convection (C_d et C_{d_1}).

Fonctionnelle à minimiser. Les problèmes d'identification sont en général formulés comme des problèmes d'optimisation, qui consistent à minimiser l'erreur de sortie afin de déterminer les paramètres inconnus.

Un exemple largement répandu de fonctionnelle à minimiser est le critère quadratique ([117]) :

$$J(p) = \sum_{i=1}^{N} \int_{0}^{D} \left(u_p(t, x_i) - T_i(t)\right)^2 dt \tag{4.20}$$

où p désigne le vecteur de paramètres à optimiser, $u_p(t, x_i)$ correspond à la température simulée par le code 1D à la profondeur x_i pour le jeu de paramètres p. $T_i(t)$ correspond à la température relevée par un capteur i à la profondeur x_i, N est le nombre de capteurs présents dans la chaussée et D est la durée de simulation. Ce critère est particulièrement adapté lorsque le nombre de paramètres est grand ou lorsque le modèle est bruité et peut être mis en oeuvre dans des systèmes non linéaires. Il sera utilisé dans la méthode d'identification.

Les méthodes de gradients. Afin de minimiser la fonctionnelle quadratique $J(p)$ (4.20), des méthodes de gradients qui font partie de la famille des algorithmes à direction de descente peuvent être mises en oeuvre. Les méthodes de gradients sont des méthodes de minimisation itératives. Considérant la fonctionnelle à minimiser, il s'agit de déterminer le prochain itéré selon la relation [118] :

$$p^{q+1} = p^q - \delta_q d^q \tag{4.21}$$

où p^q est le paramètre estimé à l'itération q ;

δ_q est la profondeur de descente ;

d^q est la direction de descente.

On distingue alors plusieurs méthodes selon la définition de d^q.

Les directions d^q et d^{q+1} sont conjuguées si l'on pose :

$$d^{q+1} = \nabla J\left(p^q\right) + \beta_q d^q \tag{4.22}$$

où

$$\beta_q = \frac{\|\nabla J\left(p^{q+1}\right)\|^2}{\|\nabla J\left(p^q\right)\|^2} \tag{4.23}$$

On cherche à déterminer les paramètres thermiques pour les 4 couches de la structure de chaussée et les paramètres de surface.

Comme on peut le voir sur les équations (4.21) et (4.23), la méthode nécessite de calculer le gradient ∇J de J. Considérons un incrément δ_k dans la direction k apporté à p, et notons $(e_1, \ldots, e_n)$ une base de l'espace eulidien dans lequel évolue le vecteur p. On peut écrire :

$$\begin{aligned} J(p+\delta_k e_k) - J(p) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\int_0^D (u_{p+\delta_k e_k}(t,x_i) - u_p(t,x_i))^2 dt \\ + \sum_{i=1}^{N}\int_0^D (u_{p+\delta_k e_k}(t,x_i) - u_p(t,x_i))(u_p(t,x_i) - T_i(t))dt, \end{aligned}$$

ce qui conduit à :

$$\begin{aligned} \nabla_k J(p) &= \lim_{\delta_k \to 0} \frac{J(p+\delta_k e_k) - J(p)}{\delta_k} \\ &= \sum_{i=1}^{N}\int_0^D \left(\lim_{\delta_k \to 0} \frac{\theta_\delta^k(t,x_i)}{\delta_k}\right)(u_p(t,x_i) - T_i(t))dt, \end{aligned} \tag{4.24}$$

où $\theta_\delta^k = u_{p+\delta_k e_k} - u_p$, ayant posé $\delta = (\delta_1, \ldots, \delta_n)$.

Intéressons-nous aux fonctions de sensibilité θ_δ^k. On écrit formellement notre système différentiel sous la forme :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u_p}{\partial t}(t,x) = g(p)\dfrac{\partial^2 u_p}{\partial x^2}(t,x) \quad \text{où} \quad g(p) = \dfrac{\lambda}{(\rho C)} \\ \dfrac{\partial u_p}{\partial t}(t,0) = f\left(t,p,u_p(t,0)\right) \\ u_p(t,L) = u_L(t) \\ u_p(0,x) = u_0(x) \end{cases} \tag{4.25}$$

où

- $p = (p_1, \ldots, p_n)$ est le vecteur paramètre à optimiser ;
- $u_p(t,x)$ est la température simulée par le code 1D pour le jeu de paramètre p.

Il en découle que $u_{p+\delta}$ vérifie :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u_{p+\delta}}{\partial t}(t,x) = g(p+\delta)\dfrac{\partial^2 u_{p+\delta}}{\partial x^2}(t,x) \\ \dfrac{\partial u_{p+\delta}}{\partial t}(t,0) = f\left(t, p+\delta, u_{p+\delta}(t,0)\right) \\ u_{p+\delta}(t,L) = u_L(t) \\ u_{p+\delta}(0,x) = u_0(x) \end{cases} \tag{4.26}$$

Par différence de (4.26) et (4.25), on obtient alors :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u_{p+\delta}}{\partial t}(t,x) - \dfrac{\partial u_p}{\partial t}(t,x) = g(p+\delta)\dfrac{\partial^2 u_{p+\delta}}{\partial x^2}(t,x) - g(p)\dfrac{\partial^2 u_p}{\partial x^2}(t,x) \\ \dfrac{\partial u_{p+\delta}}{\partial t}(t,0) - \dfrac{\partial u_p}{\partial t}(t,0) = f\left(t, p+\delta, u_{p+\delta}(t,0)\right) - f\left(t, p, u_p(t,0)\right) \\ u_{p+\delta}(t,L) - u_p(t,L) = 0 \\ u_{p+\delta}(0,x) - u_p(0,x) = 0 \end{cases} \tag{4.27}$$

soit encore, en ne conservant que les termes d'ordre 1 en δ, pour tout $1 \leq k \leq n$:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \theta_\delta^k}{\partial t}(t,x) = g(p)\dfrac{\partial^2 \theta_\delta^k}{\partial x^2}(t,x) + \delta_k \dfrac{\partial g}{\partial p_k}(p)\dfrac{\partial^2 u_p}{\partial x^2}(t,x) \\ \dfrac{\partial \theta_\delta^k}{\partial t}(t,0) = \delta_k \dfrac{\partial f}{\partial p_k}\left(t,p,u_p(t,0)\right) + \theta_\delta^k \dfrac{\partial f}{\partial u}\left(t,p,u_p(t,0)\right) \\ \theta_\delta^k(t,L) = 0 \\ \theta_\delta^k(0,x) = 0 \end{cases} \tag{4.28}$$

On déduit de l'unicité de la solution de (4.28) et de sa linéarité que $\theta_\delta^k = \delta_k \theta_1^k$, où θ_1^k est l'unique solution de (4.28) avec $\delta_k = 1$. L'équation (4.24) peut donc se réécrire :

$$\nabla_k J(p) = \sum_{i=1}^{N} \int_0^D \theta_1^k(t,x_i)(u_p(t,x_i) - T_i(t))dt. \tag{4.29}$$

On pourrait aussi démontrer, en développant (4.27) selon toutes les composantes de δ, que :

$$\theta_\delta = \sum_{k=1}^{n} \theta_\delta^k, \tag{4.30}$$

où l'on a posé $\theta_\delta = u_{p+\delta} - u_p$.

Nous présentons enfin l'algorithme de gradient conjugué retenu dans la suite.

L'algorithme de gradient conjugué.

- fixer p_0, calculer $J(p_0)$ et $\nabla J\left(p_0\right)$ avec $d_0 = \nabla J\left(p_0\right)$.
- puis itérer de l'étape q à l'étape $q+1$ de la façon suivante. On détermine δ_q par la méthode de recherche linéaire :

$$\delta_q = \min_{\alpha \in \mathbb{R}} J\left(p_q + \alpha d_q\right). \tag{4.31}$$

On peut ici mener les calculs, en supposant α petit, et en utilisant (4.30) :

$$\begin{aligned} J(p_q + \alpha d_q) &= \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\int_0^D \left(u_{p_q-\alpha d_q}\left(t,x_i\right) - u_{p_q}\left(t,x_i\right) + u_{p_q}\left(t,x_i\right) - T_i\left(t\right)\right)^2 \\ &= \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\int_0^D \left(\theta_{-\alpha d_q}\left(t,x_i\right) + u_{p_q}\left(t,x_i\right) - T_i\left(t\right)\right)^2 \\ &= \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\int_0^D \left(-\sum_{k=1}^{n}\alpha d_{qk}\theta_1^k\left(t,x_i\right) + u_{p_q}\left(t,x_i\right) - T_i\left(t\right)\right)^2 \end{aligned} \tag{4.32}$$

On calcule δ_q défini par (4.31), en annulant la dérivée de la fonction $r : \alpha \to J(p_q + \alpha d_q)$ qui est une fonction polynomiale du second degré d'après (4.32) :

$$r'(\alpha) = \sum_{i=1}^{N}\int_0^D \left(-\sum_{k=1}^{n} d_{qk}\theta_1^k\left(t,x_i\right)\right)\left(-\alpha\sum_{k=1}^{n} d_{qk}\theta_q^k\left(t,x_i\right) + u_{p_q}\left(t,x_i\right) - T_i\left(t\right)\right)dt. \tag{4.33}$$

On obtient donc :

$$\delta_q = -\frac{\sum_{i=1}^{N}\int_0^D \left(\sum_{k=1}^{n} d_{qk}\theta_1^k\left(t,x_i\right)\right)\left(u_{p_{qk}}\left(t,x_i\right) - T_i\left(t\right)\right)dt}{\sum_{i=1}^{N}\int_0^D \left(\sum_{k=1}^{n} d_{qk}\theta_1^k\left(t,x_i\right)\right)^2 dt}. \tag{4.34}$$

- Calculer un nouvel itéré $p_{q+1} = p_q + \delta_q d_q$
- Évaluer le nouveau gradient $\nabla J\left(p_{q+1}\right)$
- Calculer le paramètre β_{q+1} en utilisant la méthode de Fletcher-Reeves :

$$\beta_{q+1} = \frac{\|\nabla J\left(p_{q+1}\right)\|^2}{\|\nabla J\left(p_q\right)\|^2} \tag{4.35}$$

- Construire une nouvelle direction de descente

$$d_{q+1} = -\nabla J\left(p_{q+1}\right) + \beta_{q+1} d_k \tag{4.36}$$

- Incrémenter $q = q + 1$

4.3.4 Stratégie d'identification

On cherche à identifier les 10 paramètres sur le mois de juillet en fixant l'albédo $\alpha = 0.08$ et l'émissivité $\varepsilon = 0.92$ (valeurs calculées dans la section 4.3.2). Les essais numériques nous ont montré la difficulté à identifier les 10 paramètres d'un coup. Nous procédons comme suit : identifier $\lambda_{1,2,3,4}$, C_d et C_{d_1} en fixant les $(\rho C)_{1,2,3,4}$ puis fixer les $\lambda_{1,2,3,4}$, C_d et C_{d_1} afin d'identifier les $(\rho C)_{1,2,3,4}$ puis recommencer un certain nombre de fois. On fait l'identification en testant deux nombres de capteurs différents : 13 capteurs (tableau 4.5) et 41 capteurs présents dans les quatre différentes couches. On a choisi 13 capteurs de tel sorte que l'on ait au moins un capteur dans chaque couche. Les 41 capteurs correspondent au nombre total des capteurs disposés de la surface jusqu'à 1 m de profondeur espacés de 2.5 cm. Pour chaque nombre de capteurs, on teste 3 nombres d'itération de l'algorithme de gradient conjugué : 20, 40 et 100. Au final, les cas à tester sont au nombre de 6. Ils sont décrits dans la figure 4.35.

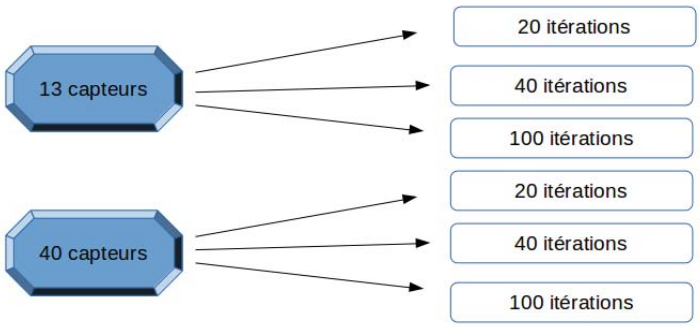


Figure 4.35: Cas testés pour la méthode d'identification

Numéro du capteur	Profondeur du capteur (cm)	Couche concernée
2	0	1ère
3	2.5	1ère
4	5	1ère
5	7.5	2ème
6	10	2ème
7	12.5	2ème
8	15	3ème
9	17.5	3ème
10	20	4ème
18	40	4ème
26	60	4ème
34	80	4ème
42	100	4ème

Tableau 4.5: Numéro du capteur utilisé avec sa profondeur et sa position selon les couches (13 capteurs)

Notons nb_1 est le nombre total d'itérations qui contient les deux sous itérations en fixant $(\rho C)_{1,2,3,4}$ puis $\lambda_{1,2,3,4}$, C_d et C_{d_1} et nb_2 est le même nombre d'itérations en fixant $(\rho C)_{1,2,3,4}$ et en fixant $\lambda_{1,2,3,4}$, C_d et C_{d_1}.

L'algoritme de la méthode employée est le suivant :

pour i de 1 à nb_1

pour j de 1 à nb_2

procéder à une itération du gradient conjugué avec $(\rho C)_1$, $(\rho C)_2$, $(\rho C)_3$, $(\rho C)_4$ fixés

fin pour

pour k de 1 à nb_2

procéder à une itération du gradient conjugué avec λ_1, λ_2, λ_3, λ_4, C_d et C_{d_1}

fin pour

fin pour

À noter que nb_1 est le nombre d'itérations de la boucle i et nb_2 est le nombre d'itérations de la boucle j et k.

Initialement on a défini les 10 paramètres aux valeurs suivantes :

- $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 1$ (W/m.K)
- $(\rho C)_1 = (\rho C)_2 = (\rho C)_3 = (\rho C)_4 = 2.10^6$ J/m^3.K
- $C_d = 0.003$ W/m^2.K et $C_{d_1} = 0$ W/m^2.K

Pour $i = 1$ et dans la boucle j la valeur de $(\rho C)_{1,2,3,4}$ est fixée aux valeurs initiales. Dans la boucle j on fait nb_2 itérations en fixant les $(\rho C)_{1,2,3,4}$ aux valeurs identifiées dans la boucle k afin d'identifier les $(\lambda_{1,2,3,4})$, C_d et C_{d_1}. Puis dans la boucle k on fait nb_2 itérations en fixant les $\lambda_{1,2,3,4}$, C_d et C_{d_1} aux valeurs identifiées dans la boucle j afin d'identifier les $(\rho C)_{1,2,3,4}$. On répète cette méthode nb_1 fois. On a fixé nb_1 à 10 itérations alors que pour nb_2 on a testé 3 valeurs : 20, 40, 100 itérations.

On a fait l'identification sur 18 jours du 11 au 28 juillet 2015. On détermine le jeu de paramètres pour chaque jour. On constate des fluctuations d'un jour à l'autre. Nous testons les différents paramètres de la méthode (nombre d'itérations) pour atteindre une variation minimale.

4.3.5 Résultats

On calcule la moyenne de chacun des paramètres identifiés sur les 18 jours, ainsi que l'écart type $ecart\left(\lambda_n, (\rho C)_n, Cd, Cd_1\right)$ de chaque jeu de paramètre en fonction du nombre d'itérations et du nombre de capteurs. On analyse cet écart type et l'erreur quadratique (4.37).

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_c} \int_{i=1}^{n_{pdt}} \left(T_{sim}\left(t_i, y_j\right) - T_{mes}\left(t_i, y_j\right)\right)^2 \, dt}{n_{pdt}.n_c}} \tag{4.37}$$

où

pdt est le pas de temps (600 s) ;

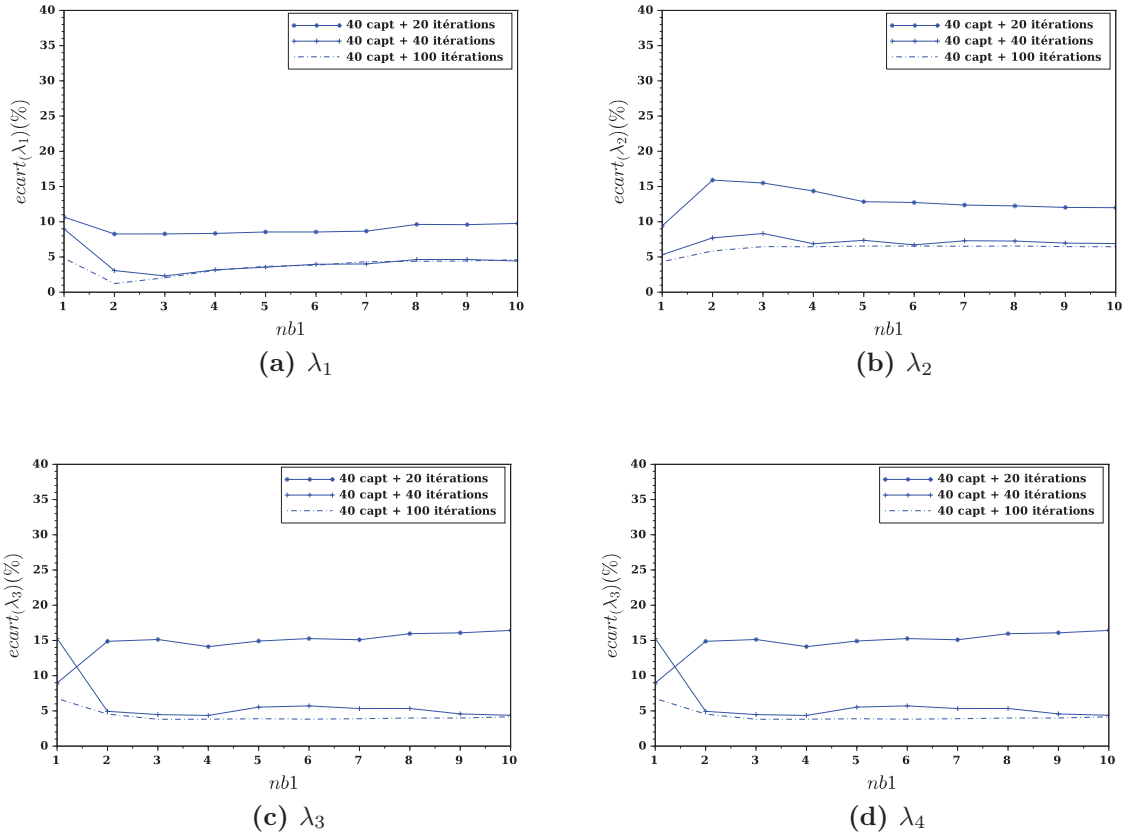
n_{pdt} est le nombre de pas de temps (du 11 à 28 juillet c.à.d 2592 pas de temps) ;

n_c est le nombre de capteurs de mesure de température (41 capteurs) ;

T_{sim} est la température simulée (^{o}C) ;

T_{mes} est la température mesurée (^{o}C).

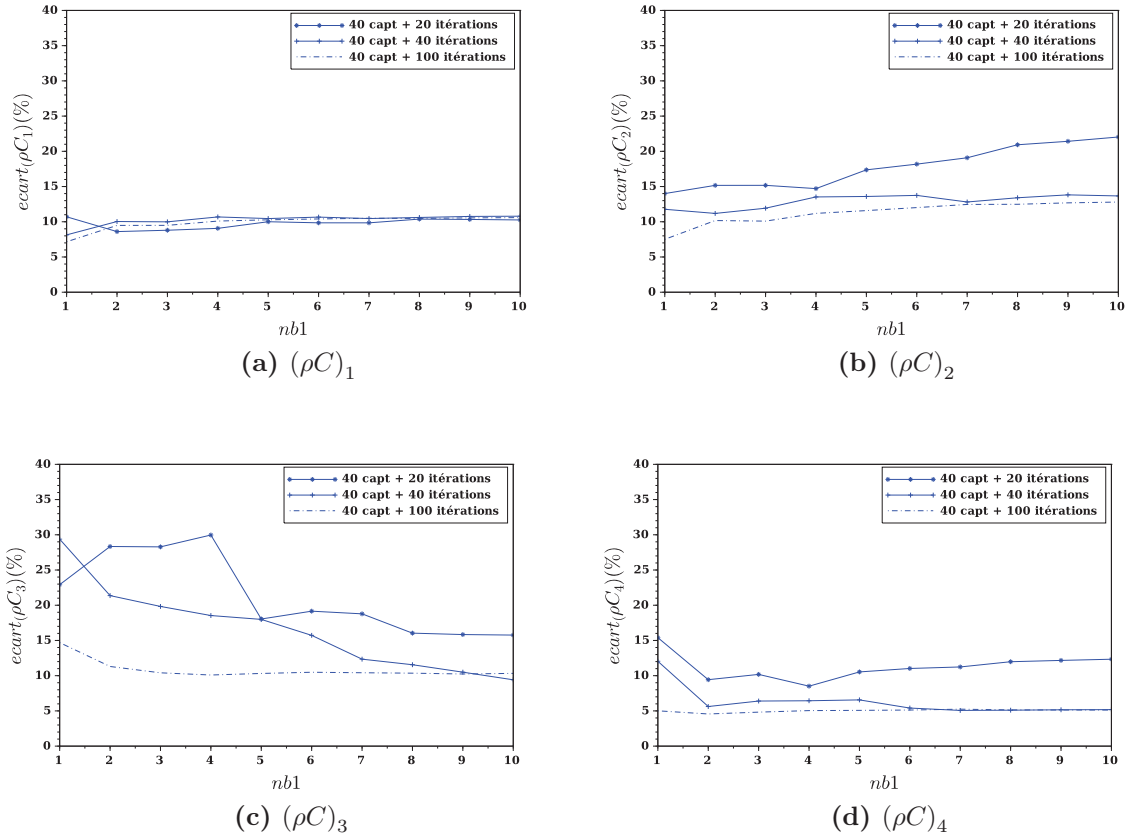
Les résultats d'identification sont présentés par la suite sous forme d'un écart type en fonction du nombre d'itérations nb_1, nb_2 et n_c. Les figures 4.36, 4.37 et 4.38 présentent les résultats d'écart type $\lambda_{1,2,3,4}$, $(\rho C)_{1,2,3,4}$, C_d et C_{d_1} avec $n_c = 13$. Plus le nombre d'itération nb_2 augmente plus l'écart type diminue. Pour nb_2 égal à 100 itérations, l'augmentation du nombre d'itérations nb_1 n'a pas une influence remarquable sur l'écart type. On s'intéresse plutôt au cas qui conduit à l'erreur la plus faible entre la température simulée et mésurée. La figure 4.39 montre que plus le nombre d'itérations nb_2 augmente, plus l'erreur diminue et pour $nb_1 \geq 2$ et nb_2=100, on a l'erreur la plus faible et qui évolue peu avec nb_1.



(a) λ_1 **(b)** λ_2

(c) λ_3 **(d)** λ_4

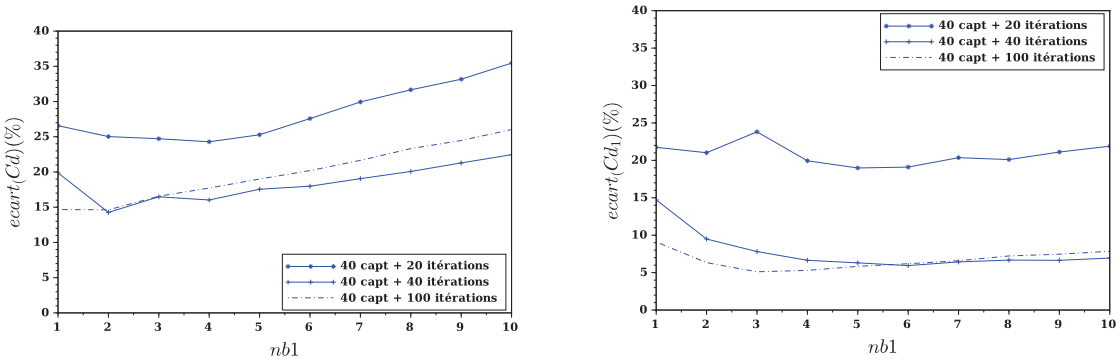
Figure 4.36: Écart type de $\lambda_{1,2,3,4}$ pour 13 capteurs



(a) $(\rho C)_1$ **(b)** $(\rho C)_2$

(c) $(\rho C)_3$ **(d)** $(\rho C)_4$

Figure 4.37: Écart type de $(\rho C)_{1,2,3,4}$ pour 13 capteurs



(a) C_d **(b)** C_{d_1}

Figure 4.38: Écart type de C_d et C_{d_1} pour 13 capteurs

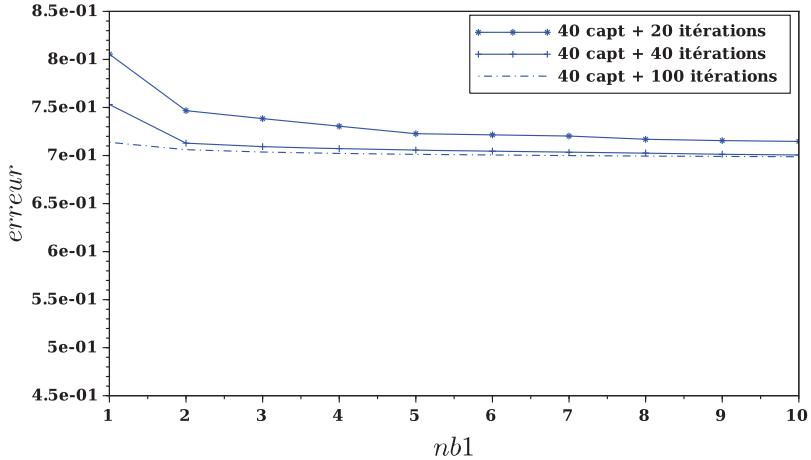


Figure 4.39: Erreur quadratique pour 13 capteurs

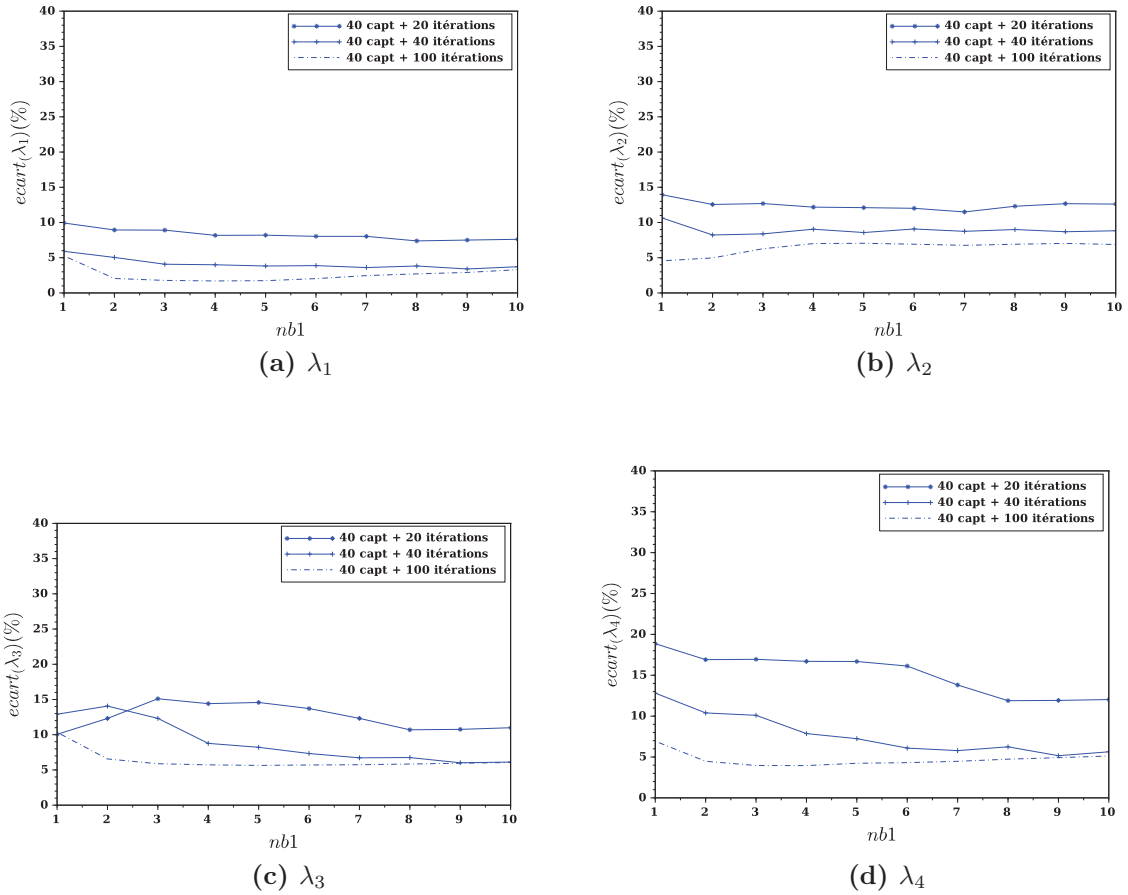
Les figures 4.40, 4.41 et 4.42 montrent les résultats pour $n_c = 41$. On remarque que plus le nombre de capteurs augmente plus l'écart type diminue. La figure 4.43 montre que plus le nombre d'itérations nb_2 augmente plus l'erreur diminue et pour $i \geq 2$ et $nb_2 = 100$ on a l'erreur la plus faible et qui évolue peu avec nb_1. Pour $n_c = 40$ l'erreur est plus faible $(4,72.10^{-2})$ que pour $n_c = 13$ (7.10^{-2}).

Le jeu de paramètres identifiés est donné dans le tableau 4.6:

Paramètres	Valeurs	Écart type (%)
λ_1 (W/m^{3}K)	2.34	2,05
λ_2 (W/m^{3}K)	1.56	4,97
λ_3 (W/m^{3}K)	1.76	6,56
λ_4 (W/m^{3}K)	2.08	4,48
$(\rho C)_1$ (J/m^{3}K)	2144309	7,96
$(\rho C)_2$ (J/m^{3}K)	1769723	5,4
$(\rho C)_3$ (J/m^{3}K)	2676728	10,21
$(\rho C)_4$ (J/m^{3}K)	1947505	3,46
C_d	0.0036	14,04
C_{d_1}	0.00423	7,29
erreur	0.473	-

Tableau 4.6: Jeu de paramètres identifiés

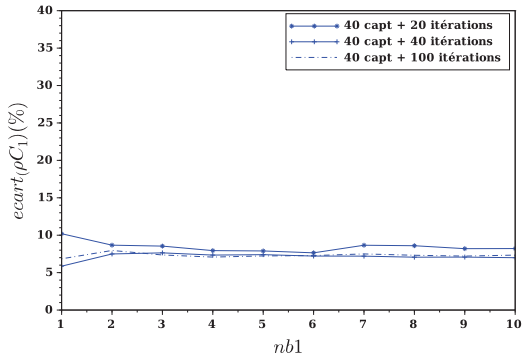
Les valeurs identifiées pour $(\lambda)_{1,2,3,4}$ $(\rho C)_{1,2,3,4}$ dans le tableau 4.6 se trouvent dans l'intervalle des valeurs de la littérature pour un béton bitumineux [98, 103]. On remarque de plus que les valeurs ont un sens physique. Les paramètres $(\lambda)_2$ $(\rho C)_2$ pour le BBDR sont inférieurs aux autres paramètres thermiques des trois couches, ce qui est cohérent puisque le BBDR est une couche poreuse et contient plus de vide que les autres couches. Egalement, le BBSG est la couche la moins poreuse, ce qui correspond aux valeurs thermiques les plus élevées. Les deux paramètres C_d et C_{d_1} identifiés donnent un coefficient de convection h_v de l'ordre de 10^{-3} qui est du même ordre de grandeur que celui donné dans [111].



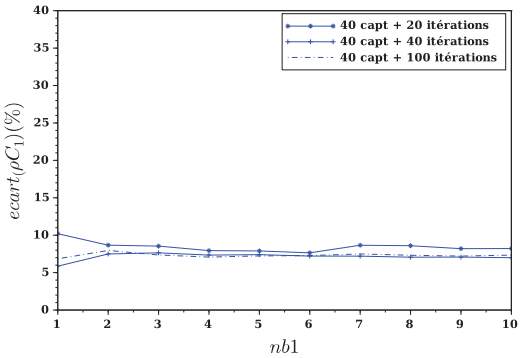
(a) λ_1 **(b)** λ_2

(c) λ_3 **(d)** λ_4

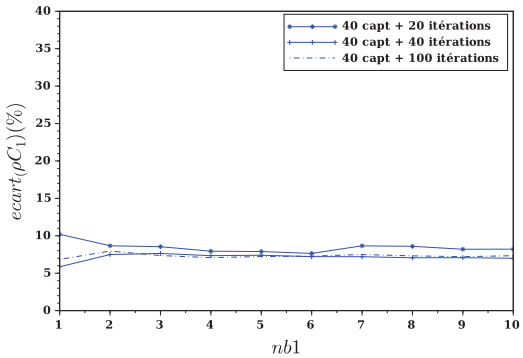
Figure 4.40: Écart type de $\lambda_{1,2,3,4}$ pour 41 capteurs



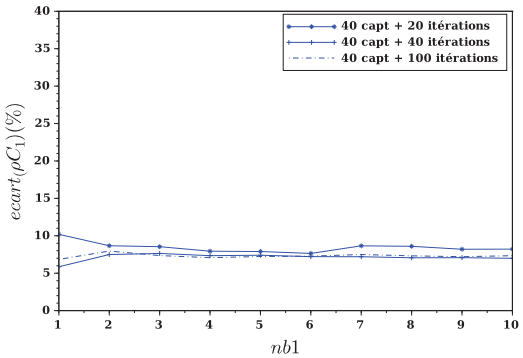
(a) $(\rho C)_1$



(b) $(\rho C)_2$

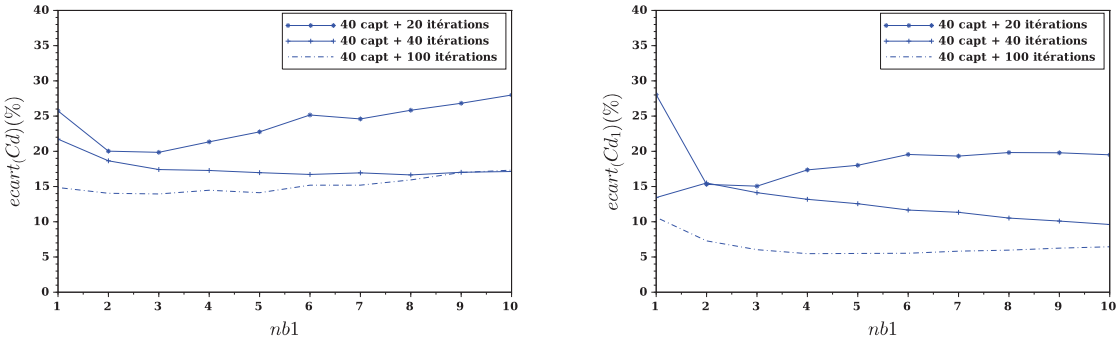


(c) $(\rho C)_3$



(d) $(\rho C)_4$

Figure 4.41: Écart type de $(\rho C)_{1,2,3,4}$ pour 41 capteurs



(a) C_d **(b)** C_{d_1}

Figure 4.42: Écart type de C_d et C_{d_1} pour 41 capteurs

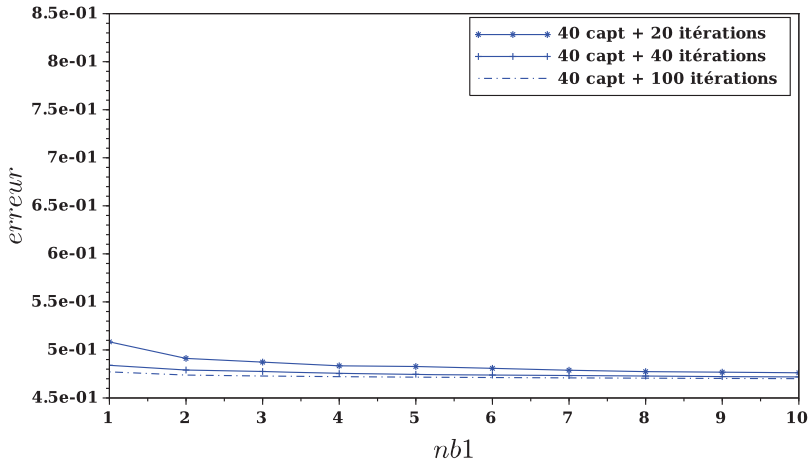
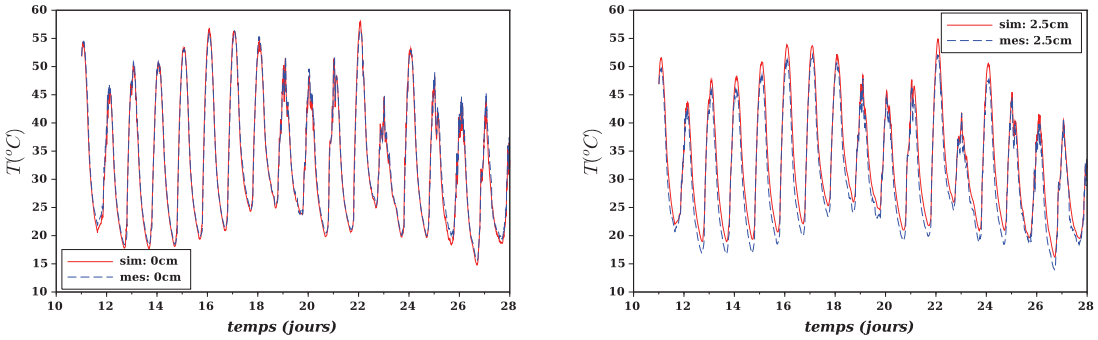


Figure 4.43: Erreur quadratique pour 41 capteurs

4.4 Calage du modèle thermique 1D sur une grande période

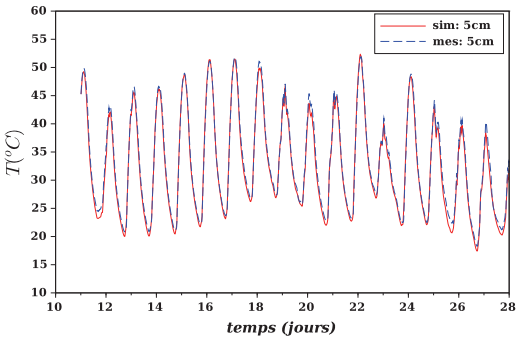
4.4.1 Calage du modèle sur le mois de juillet 2015

On présente les résultats de simulation du modèle thermique unidimensionnel du 11 au 28 juillet 2015. On compare les 41 températures mesurées avec celles simulées. On a trouvé une erreur quadratique $E = 0,7\ ^oC$ qui est une erreur faible au regard de la précision des capteurs qui est environ $\pm 1\ ^oC$. Par suite le jeu de paramètres identifié dans le tableau 4.6 permet de valider le modèle thermique pour le mois de juillet. On présente dans les figures 4.44, 4.45 et 4.46 la comparaison entre la température mesurée et simulée pour 6 points de mesure aux profondeurs suivantes : 0, 2.5, 5, 10, 15 et 20 cm, profondeur où la propagation de l'onde solaire est la plus importante à l'échelle de la journée. Les figures présentées montrent que les températures simulées par le modèle sont très proches des températures mesurées, ce qui montre la validation du modèle thermique pour le mois de juillet 2015.

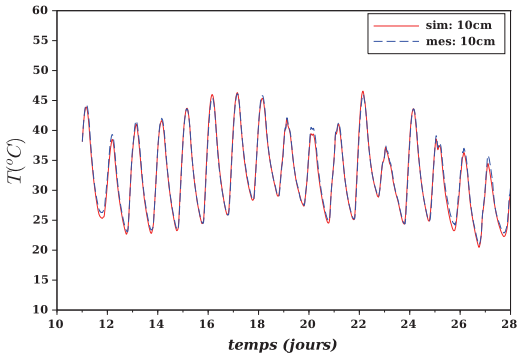


(a) température de surface **(b)** température à 2.5 cm de profondeur

Figure 4.44: Comparaison entre température simulée et mesurée en surface et à 2.5 cm de profondeur pour le mois de juillet

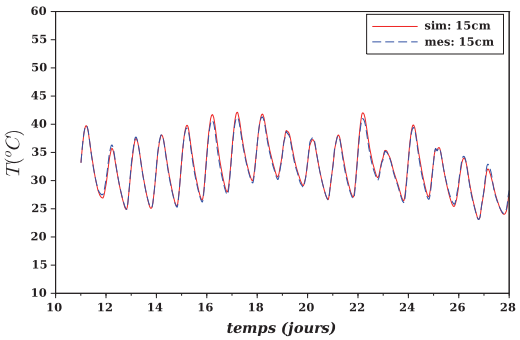


(a) température à 5 cm de profondeur

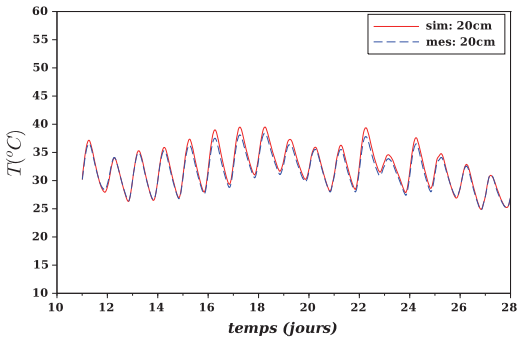


(b) température à 10 cm de profondeur

Figure 4.45: Comparaison entre température simulée et mesurée à 5 et 10 cm de profondeur pour le mois de juillet



(a) température à 15 cm de profondeur



(b) température à 20 cm de profondeur

Figure 4.46: Comparaison entre température simulée et mesurée à 15 et 20 cm de profondeur pour le mois de juillet

Dans la suite, nous cherchons à valider le modèle thermique 1D sur les 8 mois de juillet 2015 à février 2016 en utilisant les paramètres thermiques du tableau 4.6.

4.4.2 Calage du modèle sur huit mois

Dans cette partie, on cherche à valider le modèle thermique 1D à partir des mesures expérimentales sur 8 mois pour la période allant du 11 juillet 2015 à fin février 2016. Les paramètres thermiques et de surface introduits en entrée sont ceux identifiés pour le mois de juillet dans la section 4.3. Le but est de valider l'utilisation de ce même jeu de paramètres pour les 7 mois suivants. Le tableau 4.7 résume les données de terrain utilisées pour la validation (certains jours, il manque des données).

mois	données traitées (numéro du jour)
juillet	11 à 28
aout	1 à 8 et 13 à 20
septembre	4 à 27
octobre	1 à 31
novembre	1 à 30
decembre	1 à 8 et 18 à 30
janvier	1 à 10 et 24.5 à 30
février	1 à 15 et 20 à 29

Tableau 4.7: Traitement des données mensuelles

Les erreurs quadratiques mensuelles sont fournies dans le tableau 4.8:

mois	erreur (^oC)
juillet	0.7
aout	0.82
septembre	1.47
octobre	0.78
novembre	0.93
decembre	1.02
janvier	1.27
février	0.7

Tableau 4.8: Erreur quadratique mensuelle

On représente sur les figures 4.47 et 4.48 les températures journalières simulées et mesurées. Les résultats de ces figures ainsi que ceux du tableau 4.8 montrent que les températures simulées et mesurées sont très proches et l'erreur entre elles est de l'ordre de grandeur de l'erreur de mesure des capteurs. Le jeu de paramètres identifiés sur les mesures de juillet 2015 permet de valider le modèle thermique 1D sur les 8 mois de mesures disponibles. Par la suite, ce jeu de paramètres sera retenu pour alimenter le modèle thermo-hydraulique 2D.

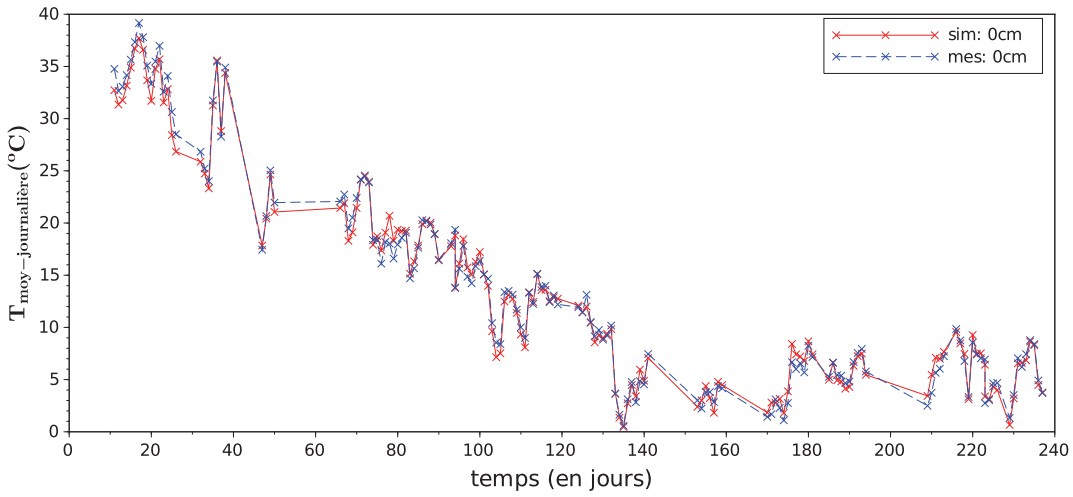


Figure 4.47: Température moyenne journalière de la surface de chaussée du 10 juillet à fin février 2016

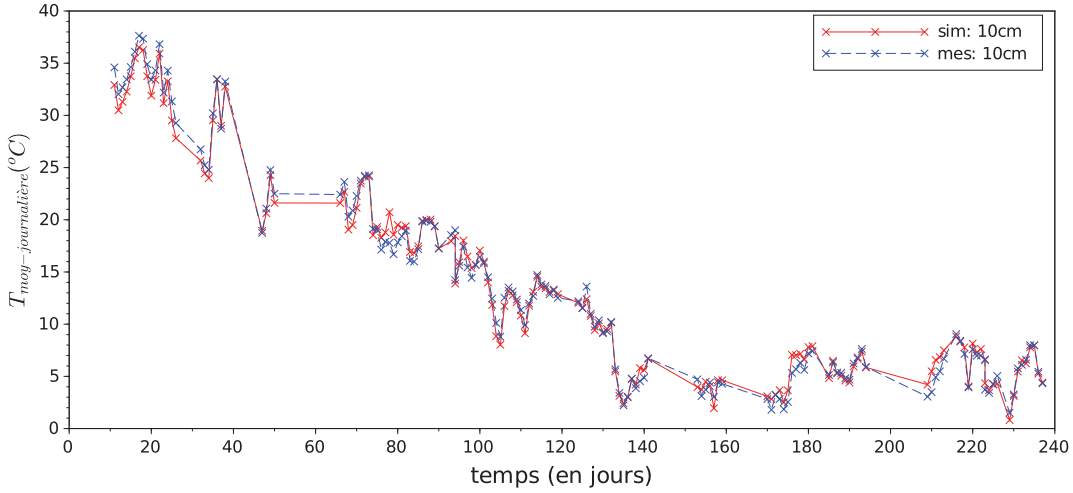


Figure 4.48: Température moyenne journalière à 10 cm de profondeur du 10 juillet à fin février 2016

Dans la suite, nous validons sur une maquette expérimentale de laboratoire le modèle hydraulique afin d'établir le modèle thermo-hydraulique.

4.5 Étude hydraulique sur une maquette de laboratoire [119]

Nous décrivons dans cette partie la maquette de laboratoire mise en place au Département Laboratoire de Clermont-Ferrand du Cerema Centre-Est. La maquette est issue d'un prélèvement du démonstateur d'Egletons de 1 m de largeur (que l'on notera L), $0.8\,m$ de longueur et 0.19 m de hauteur. La chaussée comporte trois couches : une couche de roulement en béton bitumineux semi-grenu (BBSG) d'épaisseur 0.06 m, une couche de liaison d'enrobé drainant (BBDR) 0/14 d'épaisseur 0.08 m et une couche de base d'enrobé à module élevé d'épaisseur(EME) 0.05 m.

Le prélèvement a été déposé sur une plaque en bois imperméabilisé et coffré par des plaques de plexiglas dans le sens de la largeur et positionné pour avoir un dévers de 1%. Deux plaques de plexiglas en amont et en aval ont permis de construire deux réservoirs pour l'alimentation et la récupération du fluide circulant dans la couche de liaison drainante. Une pompe de relevage permet de prélever du fluide du réservoir aval et de le réinjecter dans le réservoir amont. Le réglage de la puissance de la pompe permet d'atteindre des régimes hydrauliques stationnaires correspondant à différentes pertes de charges hydrauliques entre l'amont et l'aval (niveaux du fluide dans les réservoirs). La circulation du fluide est maintenue dans la couche drainante grâce à une étanchéité réalisée entre celle-ci et la couche sous-jacente. Un schéma du dispositif de la maquette est représenté sur la figure 4.49.

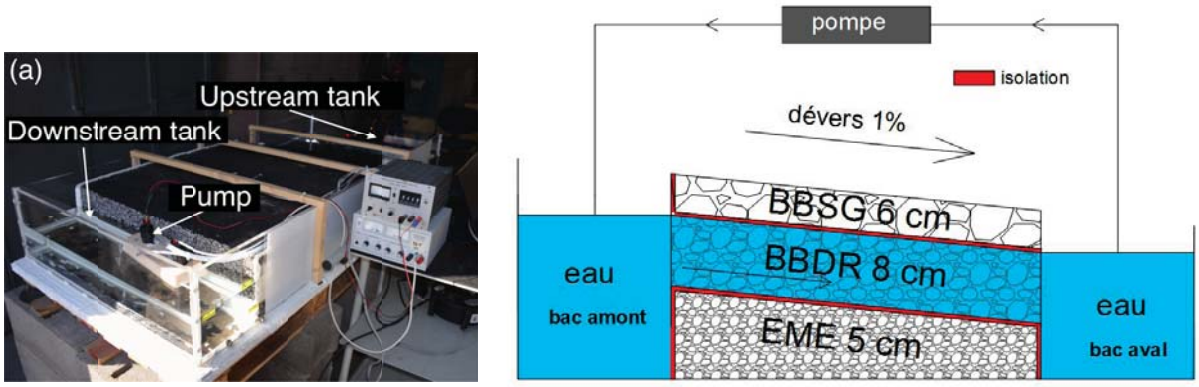


Figure 4.49: Maquette de laboratoire : photographie (a) et schéma de principe (b)

4.5.1 Détermination de la conductivité hydraulique saturée de la couche drainante à saturation

On souhaite mesurer la conductivité hydraulique de la couche drainante en position quasi-horizontale, à partir de la relation liant les débits mesurés expérimentalement aux charges hydrauliques imposées en amont et en aval. Pour assurer la saturation de la couche drainante en totalité, la pompe de relevage est réglée de telle sorte que le fluide se situe respectivement en amont et en aval, au-dessus et à niveau de la face supérieure de la couche drainante. Le fluide circule dans cette couche depuis le réservoir amont jusqu'au réservoir aval par gravité sous l'effet de la pente β de 1%. Des différences de charge entre l'amont et l'aval de +1 cm, +2 cm, +3 cm et +4 cm ont été testées, ce qui compte tenu de la valeur $\beta L = 1$ cm correspond respectivement à un niveau de fluide h_e dans le réservoir amont par rapport à la face supérieure de la couche drainante de 0 cm, +1 cm, +2 cm et +3 cm (figure 4.50).

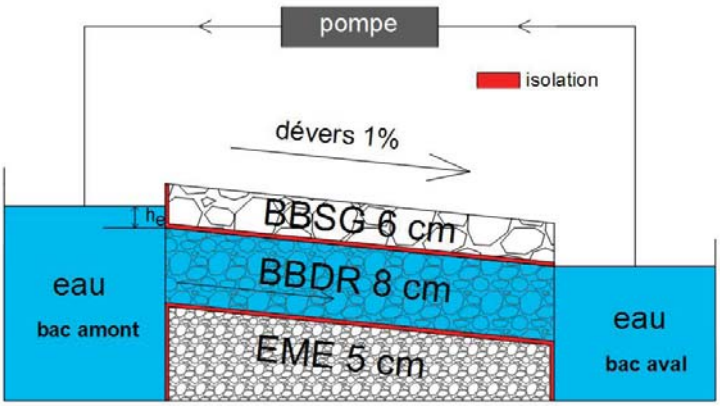


Figure 4.50: Schéma de la circulation du fluide à saturation

Les débits de la pompe en régime stationnaire ont été mesurés dans chacun des cas et sont fournis dans la tableau 4.9.

L'expression de la loi de Darcy dans un milieu saturé homogène et isotrope est donnée par :

$$Q = K\,A\frac{\triangle H}{L} \tag{4.38}$$

où

Q est le débit (m^3/s), $L = 1\ m$ est la distance d'écoulement et $A = 0.8 \times 0.08 = 0.064\ m^2$ est la surface de la section du BBDr à travers laquelle circule le fluide.

La figure 4.51 montre une relation expérimentale linéaire entre Q et $\triangle H$, ce qui est conforme à la loi Darcy. On a obtenu une conductivité hydraulique $K = 2.18$ cm/s qui est compatible avec les valeurs attendues pour une couche bitumineuse fortement poreuse.

$\triangle H = H_1 - H_2$ (m)	0.0	0.01	0.02	0.03	0.04
Q (m^3/s)$\times 10^5$	0.0	1.72	3.04	4.64	5.53

Tableau 4.9: Débits expérimentaux en fonction des différences de charges hydrauliques entre les réservoirs amont et aval, avec saturation de la couche drainante

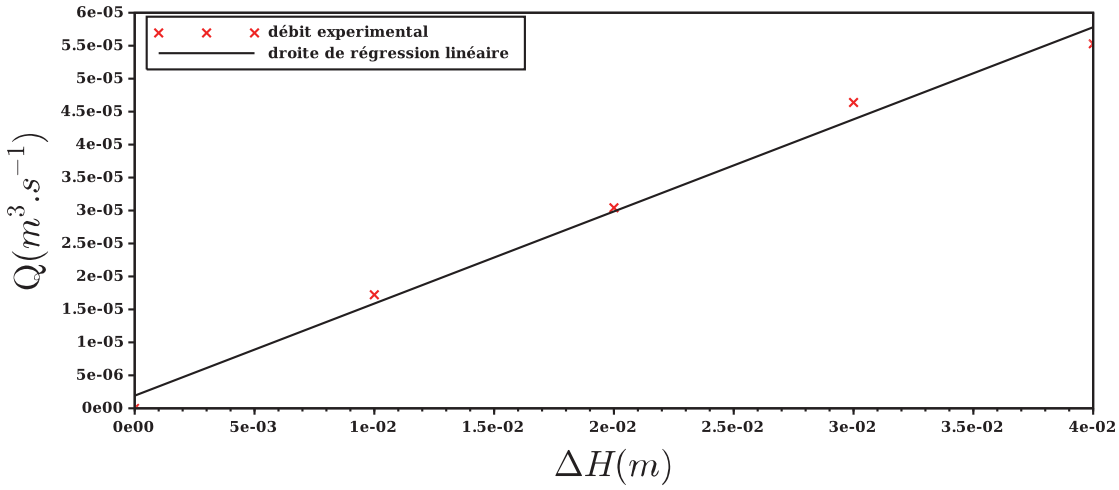


Figure 4.51: Débits expérimentaux en fonction de la différence de charge et droite de régression linéaire associée

4.5.2 Détermination de la conductivité hydraulique par écoulement à surface libre dans la couche drainante

Dans le cas d'un écoulement à saturation la relation entre le débit et la différence de charge hydraulique est linéaire. Dans le cas d'un écoulement à surface libre, il est nécessaire de définir cette relation afin de déterminer la conductivité. Pour cela un modèle de nappe est ajusté afin de mesurer indirectement cette conductivité. Dans ce cas, le niveau du fluide en aval est maintenu au niveau de la face inférieure de la couche drainante et le niveau en amont se situe entre les faces inférieure et supérieure (figure 4.52). On fait varier ce niveau h_e en amont à +2 cm, +4 cm, +6 cm et +8 cm au-dessus de la face inférieure de la couche drainante.

Les résultats de mesure du débit expérimental sont donnés dans le tableau 4.10.

$\triangle H = H_1 - H_2$ (m)	0.03	0.05	0.07	0.09
Q (m^3/s)$\times 10^5$	0.31	1.34	4.06	6.69

Tableau 4.10: Débit expérimental en fonction de la hauteur d'eau en amont avec une circulation à surface libre dans la couche drainante

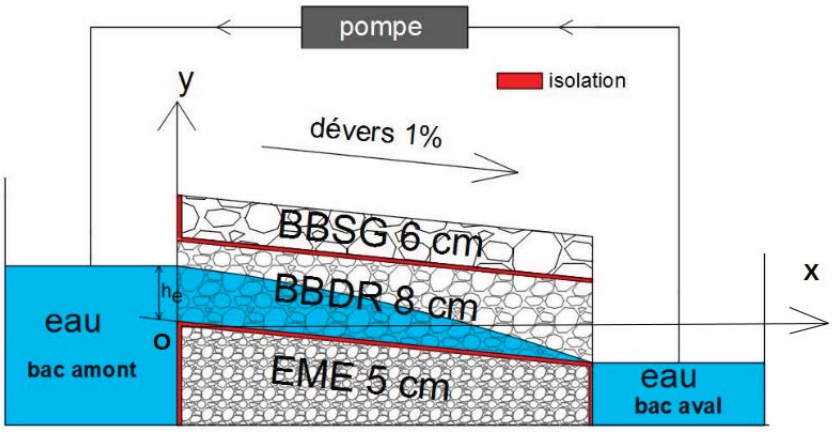


Figure 4.52: Schéma de la circulation du fluide en ćoulement à surface libre

Dans le but de déterminer la relation entre le débit et la différence de charge hydraulique, nous procédons comme suit.

On considère le repère (O, x, y) défini sur le schéma de la figure 4.52. Les faces amont et aval de la couche drainante ont respectivement pour équation $x = 0$ et $x = L$ $(cos\,(\beta) \approx 1)$. On notera $y_s\,(x) = -\beta x$ l'équation de la face inférieure de la couche drainante et par $y_l\,(x)$ celle de la surface libre. Pour $0 \leq x \leq L$ et $0 \leq y \leq y_l\,(x)$, la charge hydraulique au point (x, y) a pour expression :

$$H\,(x, y) = y_l(x) - y \tag{4.39}$$

Par conservation de la masse d'eau, le débit Q traversant chaque section de la nappe est le même et par intégration de la loi locale de Darcy entre $y_s(x)$ et $y_l(x)$, on obtient :

$$Q = -K \int_{y_s(x)}^{y_l(x)} \frac{dy_l\,(x)}{dx} dy = -K\,(y_l\,(x) - y_s\,(x))\,\frac{dy_l\,(x)}{dx} = Constante \tag{4.40}$$

En posant : $Y = y_l(x) - y_s(x)$ et $c = \frac{Q}{K}$, l'équation (4.40) est équivalente à

$$Y\left(\frac{dY}{dx} - \beta\right) = -c \tag{4.41}$$

Figure 4.53: Débits expérimental et théorique en fonction de la différence de charge

Soit encore :

$$\frac{1}{\beta}\left(1-\frac{\frac{c}{\beta}}{\frac{c}{\beta}-Y}\right)dY = dx \tag{4.42}$$

Par intégration, on obtient l'existence d'une constante a telle que :

$$Y+\frac{c}{\beta}ln\left(\frac{c}{\beta}-Y\right)=\beta x+a \tag{4.43}$$

L'équation (4.43) peut s'exprimer en fonction de $y_l(x)$, en tenant compte des conditions de bords $y_l(0)=h_e$ et $y_l(L)=0$:

$$\frac{Q}{\beta K(\triangle H-\beta L)}ln\left(1-\frac{\beta K(\triangle H-\beta L)}{Q}\right)=-\left(1+\frac{\beta L}{h_e}\right), \tag{4.44}$$

ce qui conduit à une relation implicite entre Q et ΔH. Le meilleur ajustement entre ce modèle (4.44) et les points expérimentaux présentés dans le tableau 4.10 est obtenu pour une valeur de la conductivité hydraulique de 2.20 cm/s (figure 4.53). Cette valeur est très proche de la conductivité hydraulique mesurée à saturation dans la section 4.5.1. En conclusion, on a validé expérimentalement la loi de Darcy pour un écoulement à saturation et à surface libre. Dans la suite de notre travail, on s'intéresse à l'écoulement à saturation dans la couche drainante à partir d'expérimentations sur le démonstrateur d'Égletons.

Après identification d'un jeu de paramètres thermique et de surface et après validation de l'application de la loi de Darcy, nous cherchons à valider numériquement le modèle thermo-hydraulique bidimensionnel (équation 3.50) basé sur la loi de Darcy en utilisant comme paramètres thermiques le jeu de paramètres identifiés dans le tableau 4.6.

4.6 Validation du modèle thermo-hydraulique 2D

Dans cette section, on cherche à valider le modèle thermo-hydraulique 2D présenté dans le chapitre 3 à partir des mesures expérimentales du démonstrateur d'Egletons sur la zone A (figure 4.8 et section 4.1). L'objet de la validation est de pouvoir déposer d'un modèle que l'on puisse utiliser afin de déterminer des quantités énergétiques de chauffage pour éviter le verglas et la tenue de la neige pendant l'hiver et déterminer les quantités énergétiques récupérées à l'aide de ce système hydraulique en période chaude.

4.6.1 Présentation du modèle thermo-hydraulique 2D

Dans cette section, on compare le champ de température simulé à partir du modèle thermo-hydraulique 2D présenté en (3.50) dans la section 3.4.5 avec les mesures expérimentales du démonstrateur d'Egletons (section 4.1.3). Les hypothèses, les conditions aux limites (figure 3.8) et les maillages spatial et temporel ont été définis dans le chapitre 3 (section 3.4.5.3). On présente un modèle de chaussée de 4 couches de caractéristiques présentées dans le tableau 4.11 avec les valeurs de paramètres thermique $(\rho C)_{1,2,3,4}$ et $\lambda_{1,2,3,4}$ et de la surface de la chaussée C_d et C_{d_1} présentés dans le tableau 4.6. Pour l'albédo α et l'émissivité ε, on a utilisé les valeurs $0,08$ et $0,92$ qui correspondent aux valeurs mesurées pour le mois de juillet. Ce jeu de paramètres $(\lambda_n, (\rho C)_n, C_d, C_{d_1})$ a été validé à partir du modèle thermique unidimensionnel sur 8 mois (11 juillet à fin février). Les simulations à l'aide ce modèle 2D sont faites sur une période de plusieurs jours qui diffèrent de celle du modèle 1D (jour par jour). Pour cette condition, on fait les simulations sur une hauteur de chaussée de 10 m. La vitesse de Darcy V (m/s) est déduite du débit suivant l'équation :

$$V = \frac{Q}{A}$$

où Q est le débit mesuré (m/s) sur les $4 \times 4 \times 0.8\ m^3$(longueur x largeur x profondeur de la couche drainante) et A est l'aire de la section longitudinale (m^2) dans laquelle circule l'eau $(A = 4 \times 0.8\,\mathrm{m}^2)$.

On a testé différentes valeurs du débit variant entre 200 et 600 l/h. La valeur retenue est celle qui donne un écart entre les températures simulées et mesurées le plus faible.

4.6.2 Mesures expérimentales

À partir du 11 juillet 2015, le système était en fonctionnement avec l'eau qui circule dans la couche drainante avec quelques interruptions (congés, interventions, etc.).

numéro de la couche	type	épaisseur (cm)
1	BBSG (béton bitumineux semi grenu)	6
2	BBDr (béton bitumineux draiant)	8
3	EME (enrobé à module élevé)	5
4	GNT (gravier non traité)	1000

Tableau 4.11: Géométrie du modèle de la chaussée

La température d'eau du bac qui alimente la chaussée fluctue aux alentours de 25 ^{o}C (figure 4.54). Pendant la période hivernale l'eau est chauffée par la chaudière afin d'atteindre cette valeur cible. Pendant la période estivale, la température du bac amont était laissée libre par équilibre thermique avec son environnement.

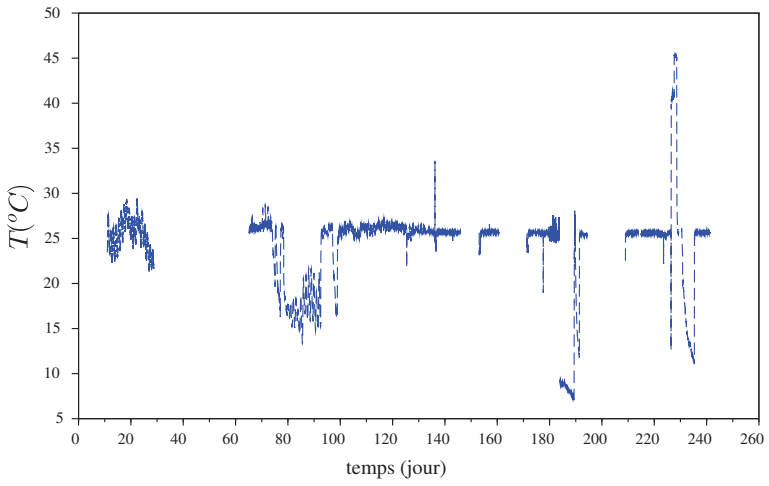


Figure 4.54: Température d'injection du fluide (origine des temps : 1/07/2015)

4.6.2.1 Précipitations (pluviométrie, neige)

On présente dans la figure 4.55 les précipitations cumulées à la surface en (mm) (pluviométrie et neige cumulée) mesurées à l'aide d'un pluviomètre à augets basculants (le premier jour de juillet est pris comme jour référence).

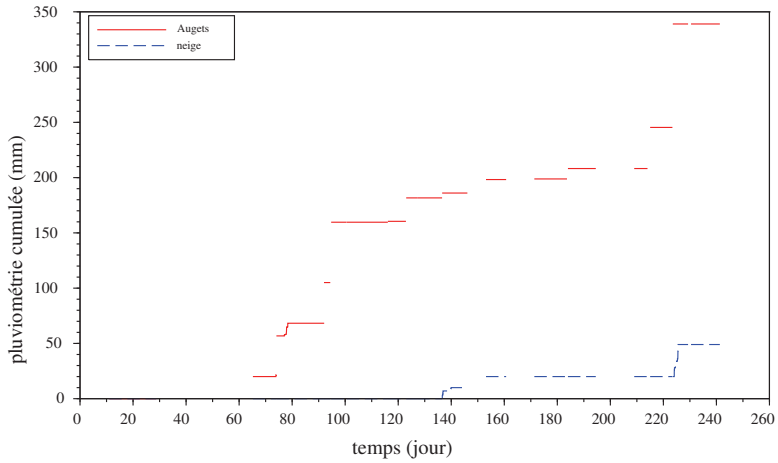


Figure 4.55: Précipitations à la surface (origine des temps : 1/07/2015)

4.6.2.2 Débit

La figure 4.56 présente le débit mesuré à l'aide d'un débimètre mesurant le débit du circulateur alimentant le bac amont de la chaussée. Le débimètre ne nous permet pas de déterminer le débit réel circulant dans la chaussée lors des jours de pluie, le débimètre ne prenant pas en compte le volume d'eau de pluie s'infiltrant dans le bac amont qui n'est pas étanché par le dessus. On veillera donc à ne considérer la mesure de débit qu'en période sèche. D'après la figure 4.56, on remarque des fluctuations du débit. Pour le mois de juillet le débit fluctue entre 200 et 250 l/h alors qu'il passe au double entre le mois d'octobre et le début de janvier (Q entre 400 et 600 l/h) et se réduit à moitié entre le mois de janvier et février. Les variations du débit restent inexpliquées. Dans la suite, nous chercherons à caler le modèle avec différentes valeurs de débit (constant).

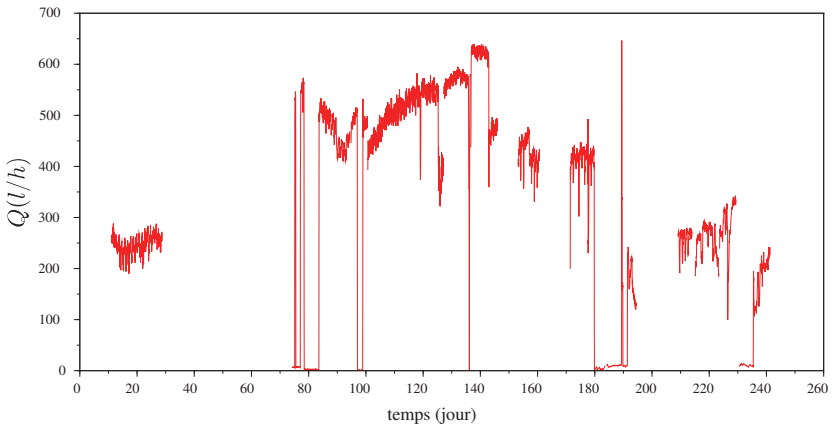


Figure 4.56: Débit mesuré (origine des temps : 1/07/2015)

4.6.2.3 Rayonnement solaire

Les rayonnements solaires incident et réflechi sont représentées sur la figure 4.57.

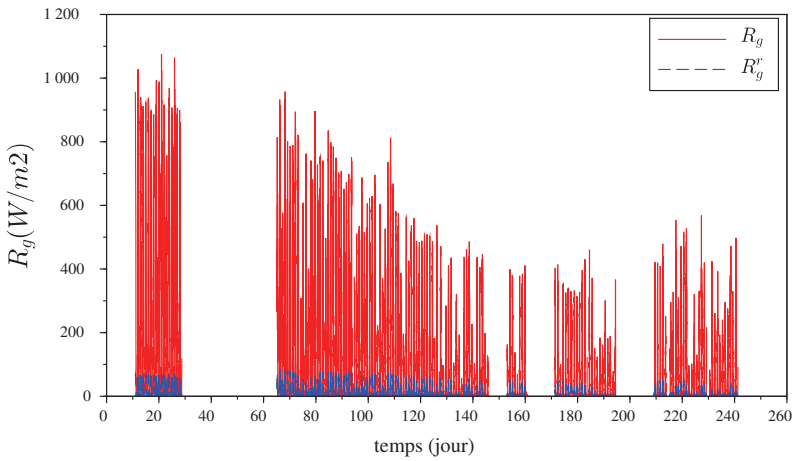


Figure 4.57: Rayonnements solaires mesurés (origine des temps : 1/07/2015)

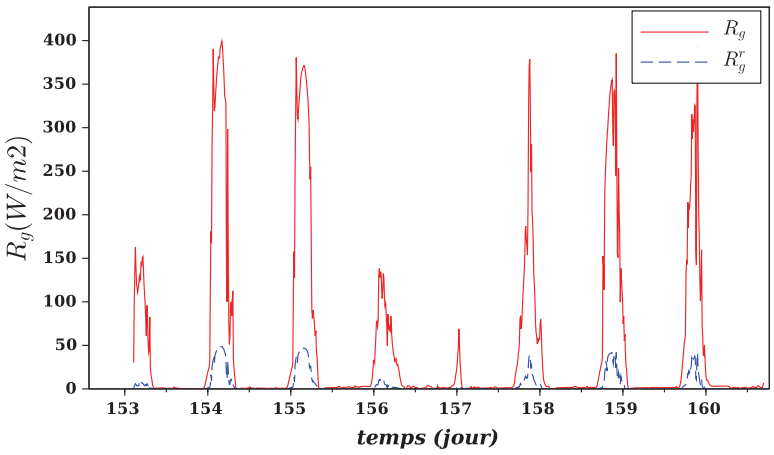


Figure 4.58: Zoom des rayonnements solaires mesurés (origine des temps : 1/07/2015)

4.6.2.4 Rayonnement atmosphérique

La figure 4.59 présente la mesure du rayonnement atmosphérique infrarouge R_{atm} et du rayonnement infrarouge émis par la chaussée R_{surf} à l'aide d'un pyrgéomètre CNR4. Pendant la période estivale (juillet), les rayonnements atmosphériques atteignent des valeurs supérieures à celles pendant la période hivernale.

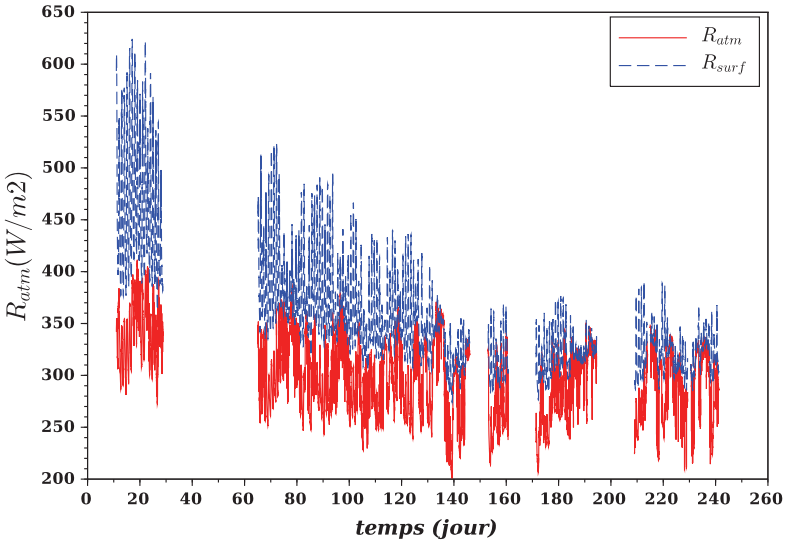


Figure 4.59: Rayonnements atmosphériques et émis par la surface mesurés (origine des temps : 1/07/2015)

4.6.2.5 Température de l'air

La figure 4.60 présente la mesure de la température de l'air à l'aide de 3 capteurs. On a pris la moyenne de ces 3 mesures comme données d'entrée pour la simulation. La température de l'air atteint une valeur minimale de $-10\,^{o}$C pendant l'hiver.

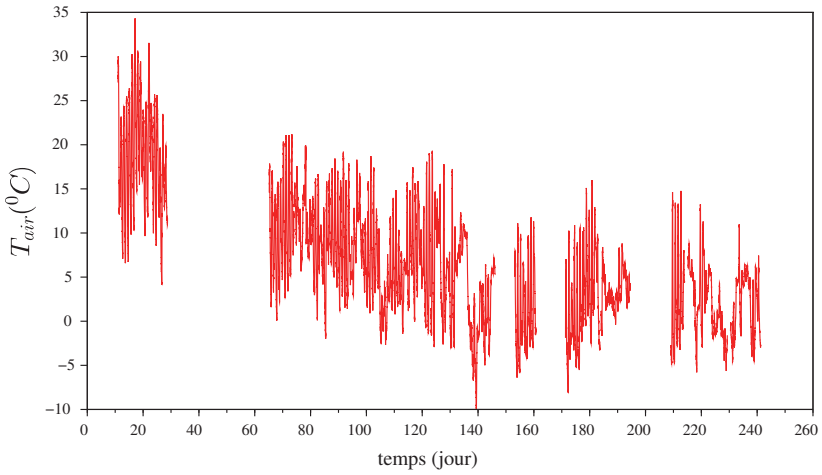


Figure 4.60: Température de l'air mesurée (origine des temps : 1/07/2015)

4.6.2.6 Vitesse du vent

La figure 4.61 présente la mesure de la vitesse du vent à l'aide d'un anénomètre. Elle atteint un maximum de 5.5 m/s.

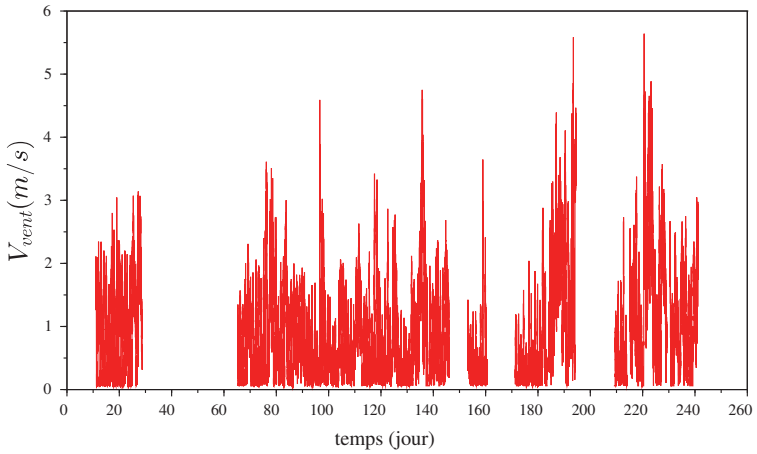


Figure 4.61: Vitesse du vent mesurée (origine des temps : 1/07/2015)

4.6.2.7 Température de surface

La figure 4.62 présente la mesure de la température de surface dans la zone A (dispositif de circulation de fluide) et la zone B (zone témoin). On présente la température de surface en aval de la zone A car c'est la température critique durant

la période hivernale qui atteint les plus basses températures (l'influence du fluide injecté sur la température de surface diminue avec la distance d'écoulement). On remarque la différence de température des deux zones. Pour la zone B, la température atteint des valeurs négatives minimales de $-4\,^{o}$C (figure 4.62) alors que la zone dans laquelle circule de l'eau chaude aux alentours de $25\,^{o}$C (figure 4.54) à travers la couche drainante est toujours positive. On remarque également un abaissement de la température de surface en été (juillet 2015) lorsque le fluide circule.

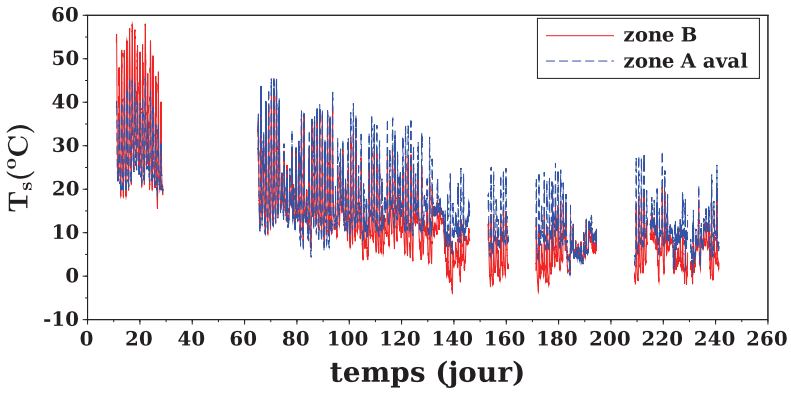


Figure 4.62: Température de surface mesurée pour la zone A et B (origine des temps : 1/07/2015)

4.6.3 Comparaison entre les températures mesurées et simulées

On s'intéresse à deux périodes : juillet 2015 et octobre 2015. En effet, on a retenu des périodes pendant lesquelles :

- le système hydraulique est en fonctionnement sans interruption
- aucune pluviométrie n'a lieu : le débit est ainsi mesuré correctement et notre modèle qui ne prend pas en compte la pluie en surface est ainsi représentatif.

D'après la figure 4.55, on a identifié les périodes du 11 au 28 juillet et du 101 au 116 jours (mois d'octobre) sur laquelle on cherche à caler le modèle thermo-hydraulique 2D.

On a des mesures expérimentales des données météorologiques sur cette période. On notera que pendant les zones à données manquantes identifiées dans le tableau 4.7, l'eau ne circule pas. De plus, le modèle thermo-hydraulique n'est pas assez développé pour prendre en compte la présence de l'eau, de la neige et de l'humidité en surface. Finalement, il faut identifier les jours où la surface de la chaussée est

sèche et l'eau circule dans la couche drainante. D'après la figure 4.55, on a identifié la zone sèche du 11 à 28 juillet et la période du 101 à 116 jours (mois d'octobre).

On cherche à comparer la température mesurée dans la zone A pour les différents points présentés (figure 4.15 et tableau 4.12) (surface amont, surface milieu, surface aval, haut amont, haut milieu, haut aval, milieu amont, milieu milieu, milieu aval, bas amont et bas aval).

La température simulée avec $Q_{mesuré}$ correspond à l'injection du débit réel dans le modèle de simulation.

Notation	Explication
surface amont	point de mesure de surface à 1 m du bac amont
surface milieu	point de mesure de surface à 2.37 m du bac amont
surface avaL	point de mesure de surface à 0.26 m du bac aval
haut amont	point de mesure à l'interface de la couche BBSG et BBDR à 1 m du bac amont
haut milieu	point de mesure à l'interface de la couche BBSG et BBDR à 2.37 m du bac amont
haut aval	point de mesure à l'interface de la couche BBSG et BBDR à 0.26 m du bac aval
milieu amont	point de mesure au milieu de la couche du BBDR à 1 m du bac amont
milieu milieu	point de mesure au milieu de la couche du BBDR à 2.37 m du bac amont
milieu aval	point de mesure au milieu de la couche du BBDR à 0.26 m du bac aval
bas amont	point de mesure à l'interface de la couche BBDR et EME à 1 m du bac amont
bas milieu	point de mesure à l'interface de la couche BBDR et EME à 2.37 m du bac amont
bas aval	point de mesure à l'interface de la couche BBDR et EME à 0.26 m du bac aval

Tableau 4.12: Vocabulaire avec les positions des thermocouples dans la zone A

4.6.3.1 Comparaison entre les températures mesurées et simulées pour le mois de juillet 2015

.

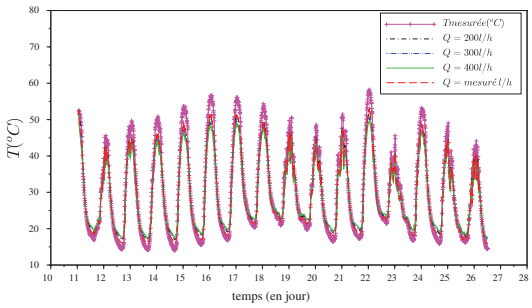
On constate d'après la figure 4.56, un débit aux environs 250 l/h durant cette période. On a testé le modèle avec différents débits (200 l/h à 600 l/h) pour étudier leur influence sur l'écart entre les températures mesurées et simulées.

Température de surface de la chaussée. Pour le mois de juillet, on présente l'évolution de la température de surface en fonction du temps pour des débits de 200, 300 et 400 l/h. On présente les trois points de mesure de la température de surface de la chaussée. D'après les figures 4.63 (a), (b) et (c) (surface amont, milieu et aval), la température de surface varie faiblement avec les trois débits présentés. On remarque que le plus grand écart entre la mesure et la simulation est pendant la période d'ensoleillement (milieu de la journée).

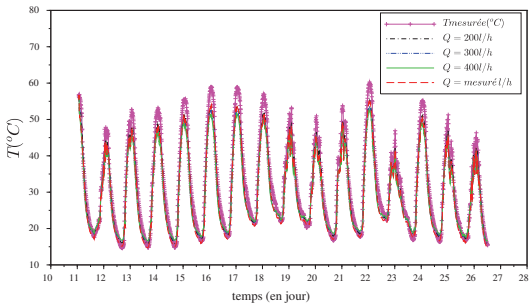
On représente sur la figure 4.64 l'écart moyen quadratique entre la température simulée et mesurée en fonction du débit (200 à 600 l/h). D'après cette figure, on

remarque que plus le débit augmente plus l'écart moyen augmente. L'écart minimal correspond à un débit de 200 l/h qui correspond à un écart moyen en amont et milieu de 2.3 ^{o}C et en aval de 1.8 ^{o}C. Ces écarts sont assez proches de ceux correspondant à une simulation avec le débit mesuré et non constant. D'ailleurs, 200 l/h est très proche du débit mesuré.

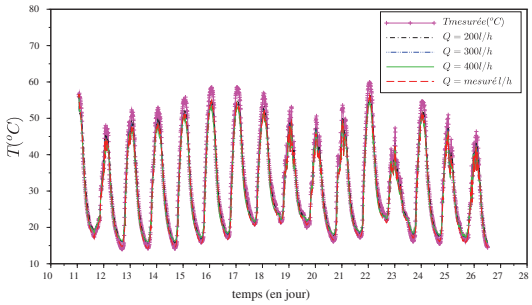
D'après les mesures expérimentales de la température de surface dans la zone B (témoin), on remarque des écarts entre les différents capteurs qui mesurent cette même température. Pour le mois du juillet (figure 4.33), on remarque un écart moyen maximal entre les différents capteurs de 1.6 ^{o}C entre la température moyenne de quatres capteurs et la température de chaque capteur. Par la suite, un écart moyen de l'ordre de 2 ^{o}C entre la température de surface mesurée et simulée est de l'ordre de grandeur des incertitudes sur les mesures.



(a) amont



(b) milieu



(c) aval

Figure 4.63: Températures de surface simulées pour le mois de juillet pour différentes valeurs de débit et comparaison avec la température mesurée

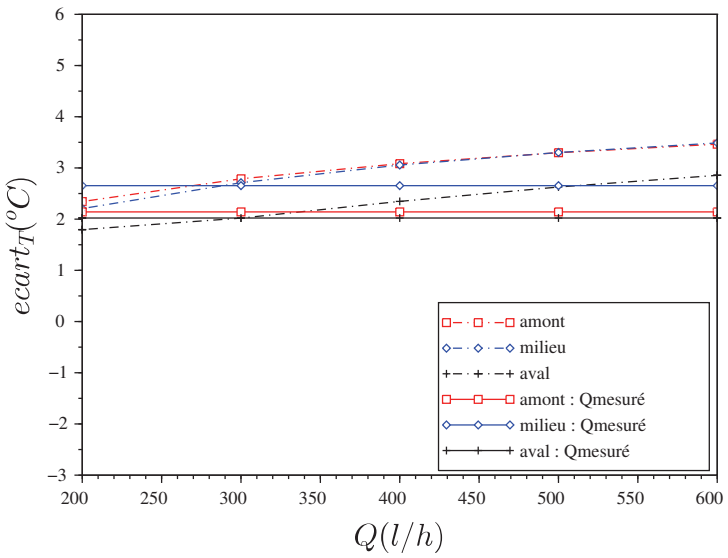
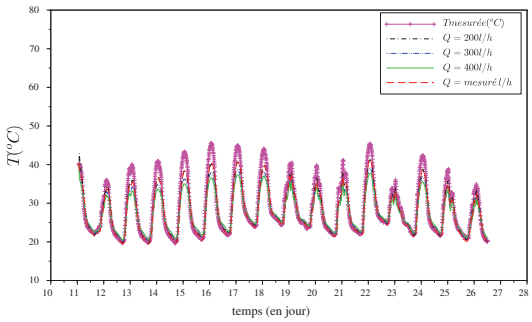


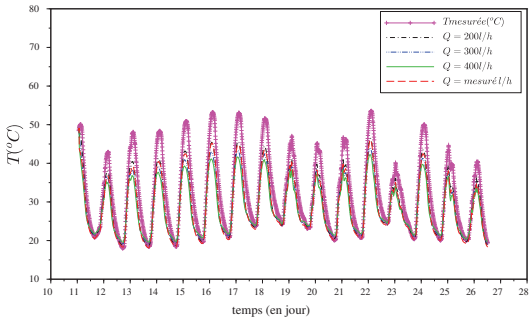
Figure 4.64: Écart moyen pour la température de surface pour le mois de juillet

Température en haut de la couche poreuse. On présente les trois points de mesure de la température en haut de la couche drainante. D'après les figures 4.65 (a), (b) et (c), la valeur du débit Q influe sur cette température du haut. Plus Q est faible, plus la température simulée se rapproche de la température mesurée et $Q = 200\,\mathrm{l/h}$ est la meilleure valeur. On remarque aussi que de grands écarts se produisent pendant la période d'ensoleillement. En comparant la température du haut du drainant mesurée en amont (figure 4.65 (b)) avec celle en aval (figure 4.65 (c)), on remarque que la température aval est inférieure à celle du milieu ce qui contredit les résultats de simulation. De plus, les températures en aval sont plus proches en amplitude mais sont déphasées. Ce déphasage pourrait s'expliquer par l'influence du bac aval qui présente un certain volume. Des phénomènes de diffusion peuvent être à l'œuvre et pourraient expliquer ce déphasage.

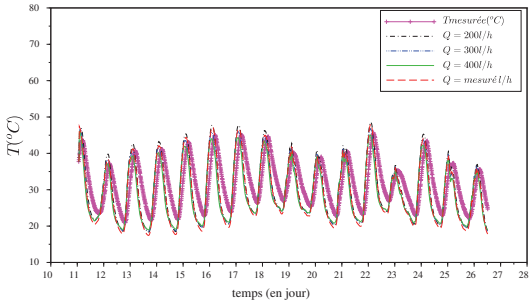
La figure 4.66 présente l'écart moyen quadratique entre les températures simulée et mesurée en haut de la couche drainante. On remarque que plus le débit augmente, plus l'écart moyen augmente, et que cet écart est de plus en plus important de l'amont vers l'aval. Pour un débit de 200 l/h, l'écart en amont est de 1.4 ^{o}C (toléré), en milieu est de 3.2 ^{o}C (élevé par rapport à l'erreur de mesure de température) alors qu'il atteint un écart très important de 5 ^{o}C en aval.



(a) amont



(b) milieu



(c) aval

Figure 4.65: Température en haut simulées le mois de juillet pour différents valeurs de débit et comparaison avec la température mesurée

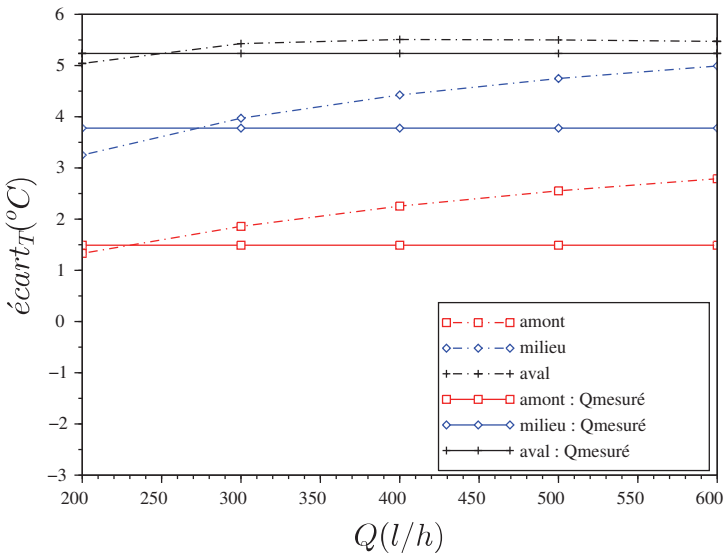
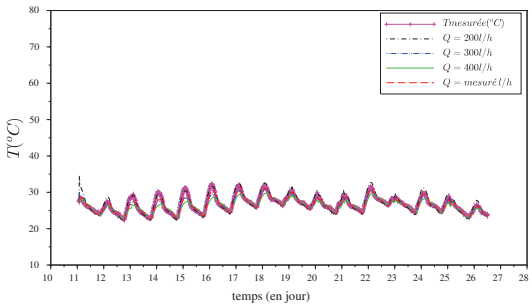


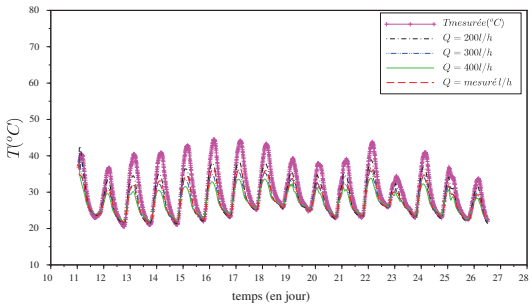
Figure 4.66: Écart moyen pour la température en haut de la couche drainante pour le mois de juillet

Température au milieu de la couche poreuse. Les figures 4.67 (a), (b) et (c) présentent les trois points de mesure de la température au milieu de la couche drainante. On remarque que les écarts de températures sont beaucoup moins importants en amont qu'au milieu et en aval. En aval, un déphasage entre les températures simulée et mesurée est également observé.

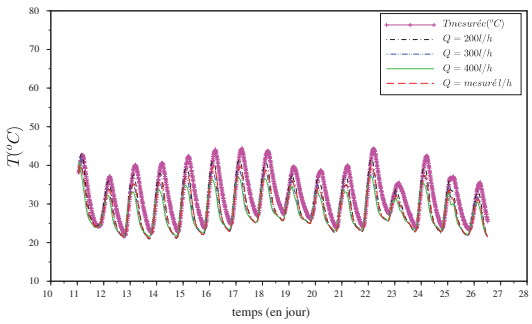
La figure 4.68 présente l'écart moyen quadratique. On remarque que plus le débit augmente, plus l'écart moyen augmente. En amont, on a un écart faible de 0.6 ^{o}C alors qu'au milieu, l'écart est plus important, mais toléré, de 2 ^{o}C. En revanche il atteint 3.1 ^{o}C en aval.



(a) amont



(b) milieu



(c) aval

Figure 4.67: Température du milieu du drainant simulées pour le mois de juillet pour différents valeurs de débit et comparaison avec la température mesurée

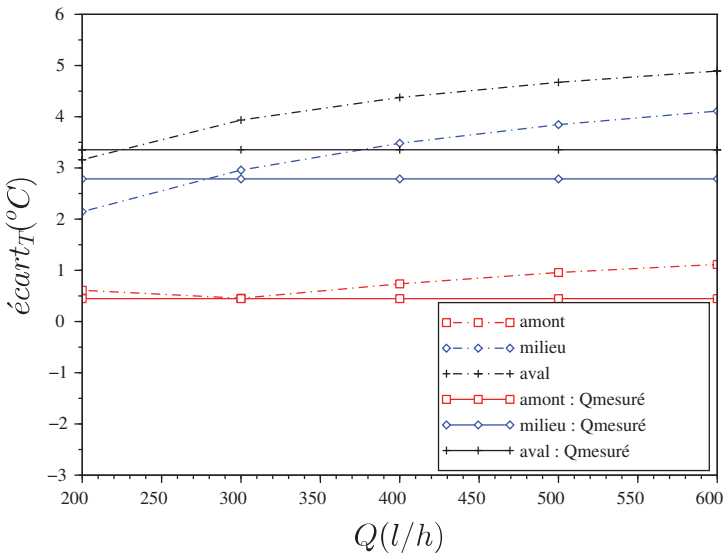
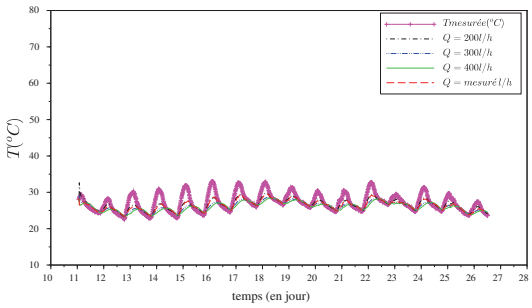


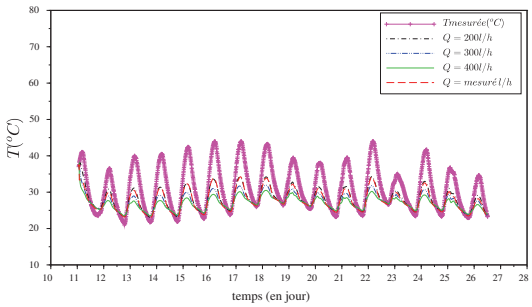
Figure 4.68: Écart moyen pour la température du milieu du drainant pour le mois de juillet

Température du bas de la couche poreuse. Les figures 4.69 (a) et (b) présentent les mesures de la température du milieu du drainant en amont et au milieu. La mesure en aval n'est pas disponible (thermocouples coupés lors de la mise en œuvre de l'enrobé).

L'écart moyen est présenté dans la figure 4.70. Là encore, c'est pour un débit de 200 l/h que l'on observe un écart minimal.



(a) amont



(b) milieu

Figure 4.69: Température du bas du drainant simulées pour le mois de juillet pour différents valeurs de débit et comparaison avec la température mesurée

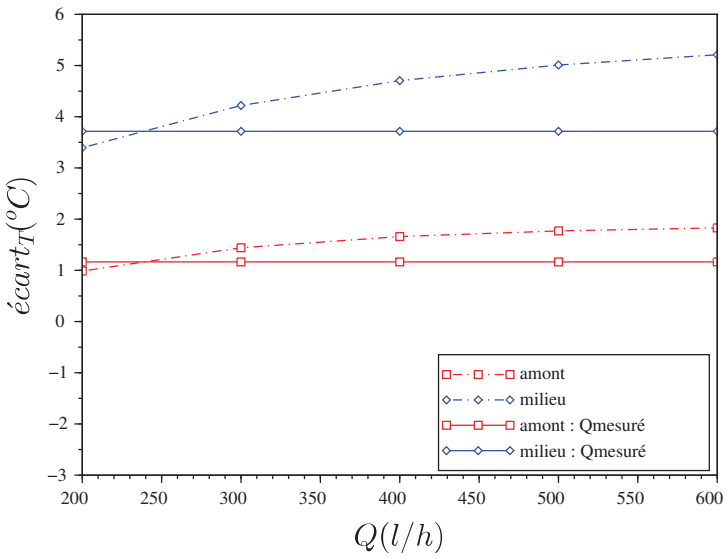


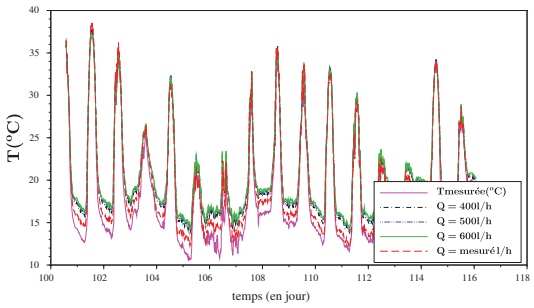
Figure 4.70: Écart moyen pour la température du bas du drainant pour le mois de juillet

4.6.3.2 Comparaison entre les températures mesurées et simulées pour le mois d'octobre

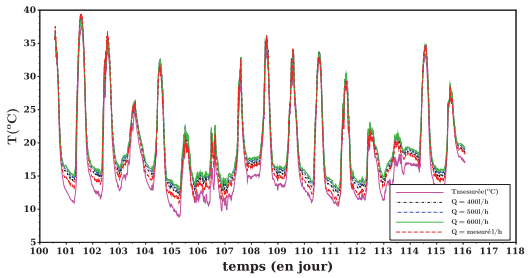
On présente les comparaisons de températures pour le mois d'octobre. À noter que dans ces figures on présente la comparaison pour trois valeurs du débit : 400, 500 et 600 l/h, qui se situent autour des valeurs de débit réel (figure 4.56). En plus, on présente l'écart moyen de température pour ce mois.

Température de surface de la chaussée. On présente les trois points de mesure de la température de surface de la chaussée. D'après les figures 4.71 (a), (b) et (c), la température de surface en amont varie faiblement avec les trois débits présentés. On remarque des pics de températures qui correspondent à la période d'ensoleillement pour chaque jour. Durant cette période, l'écart entre la température simulée et mesurée est très faible (maximum 0.7 ^{o}C) alors que pour la période nocturne, on remarque des écarts beaucoup plus importants qui atteignent 3.5 ^{o}C.

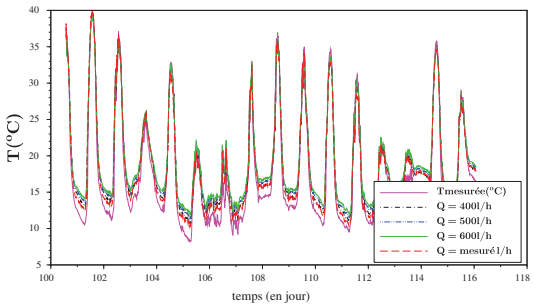
D'après la figure 4.72, on remarque que plus le débit augmente, plus l'écart moyen augmente sauf pour $Q = 600$ l/h.



(a) amont



(b) milieu



(c) aval

Figure 4.71: Températures de surface simulées pour le mois de d'octobre pour différentes valeurs de débit et comparaison avec la température mesurée

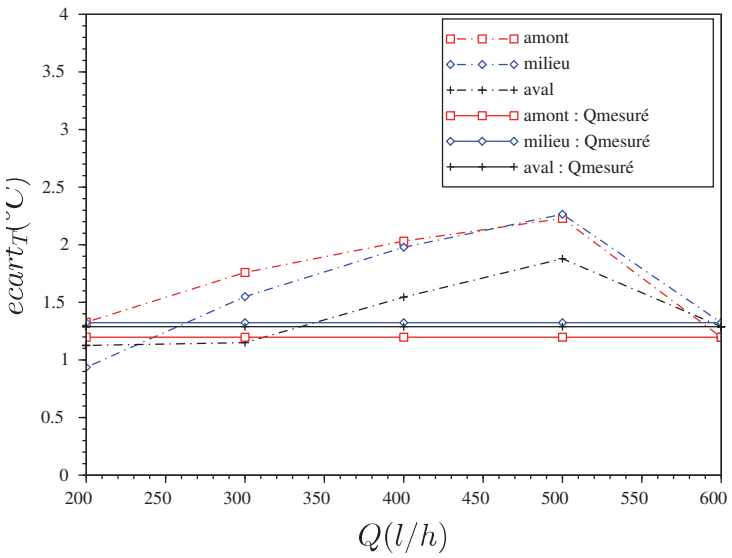
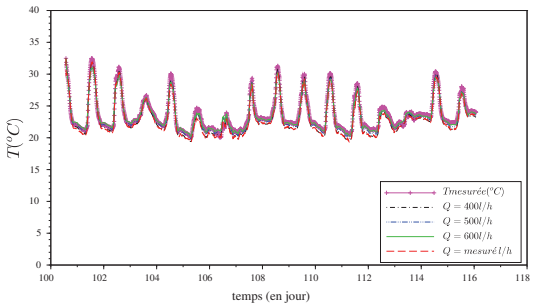


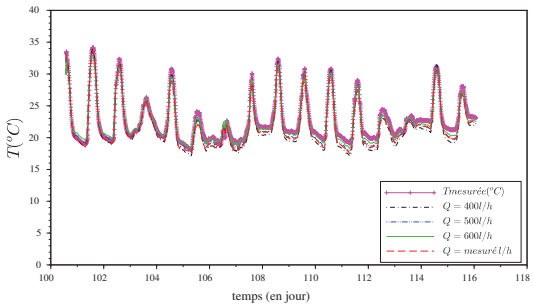
Figure 4.72: Écart moyen pour la température de surface pour le mois de d'octobre

Température du haut de la couche poreuse. On présente les trois points de mesure de la température du haut du drainant. D'après les figures 4.73 (a), (b) et (c), la température de surface en amont varie faiblement avec les trois débits présentés.

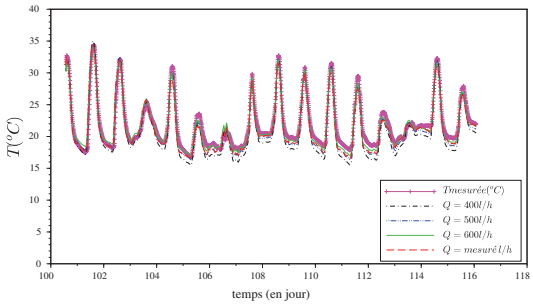
La figure 4.74 présente l'écart moyen de la température du haut du drainant. On remarque que plus le débit augmente plus l'écart moyen diminue. On a un écart moyen de 0.7 ^oC en amont et 0.8 ^{o}C au milieu et en aval pour un débit de 600 l/h. On remarque que l'écart moyen en haut du drainant est moins faible que celui de la surface et qu'il est du même ordre de grandeur que l'écart avec le débit mesuré.



(a) amont



(b) milieu



(c) aval

Figure 4.73: Température du haut du drainant simulée pour le mois d'octobre pour différents valeurs de débit et comparaison avec la température mesurée

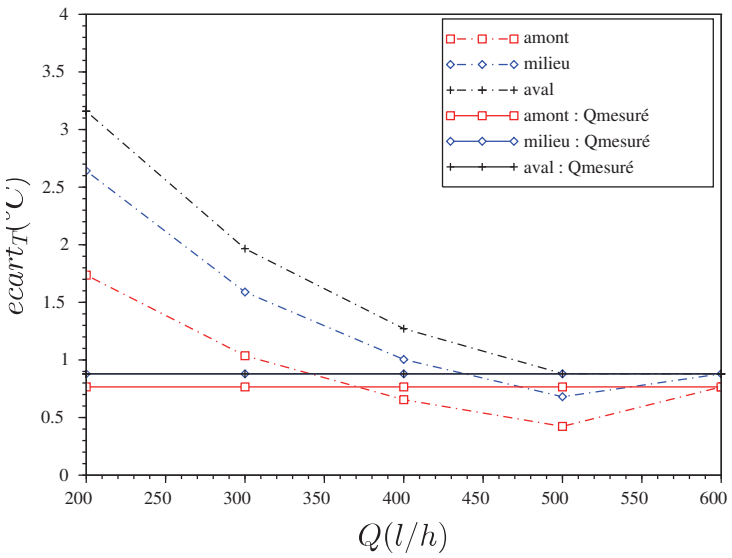
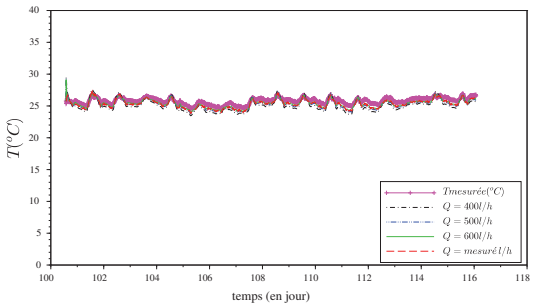


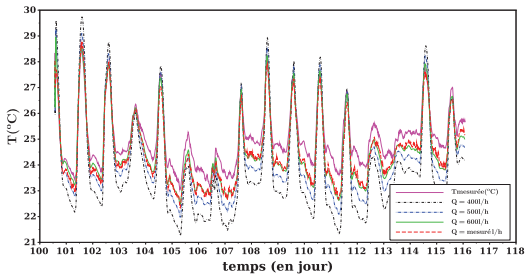
Figure 4.74: Écart moyen pour la température du haut du drainant pour le mois d'octobre

Température en milieu de la couche poreuse. Les figures 4.75 (a), (b) et (c) présentent les trois points de mesure de la température du milieu du drainant. On remarque que la fluctuation de température est beaucoup moins importante que celle de la surface de la chaussée et du haut du drainant. Cette température fluctue aux alentours de la valeur de la température d'injection du fluide.

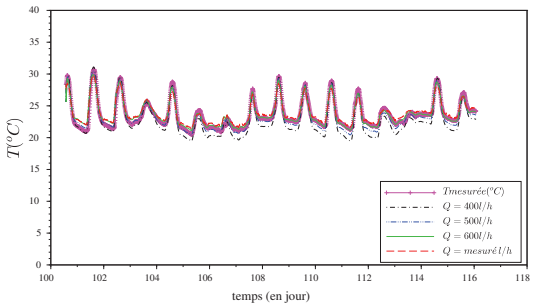
La figure 4.76 présente l'écart moyen de la température du milieu du drainant. L'écart moyen en amont, milieu et aval est de 0.5 ^{o}C pour $Q = 600$ l/h.



(a) amont



(b) milieu



(c) aval

Figure 4.75: Températures du milieu du drainant simulées pour le mois d'octobre pour différentes valeurs de débit et comparaison avec la température mesurée

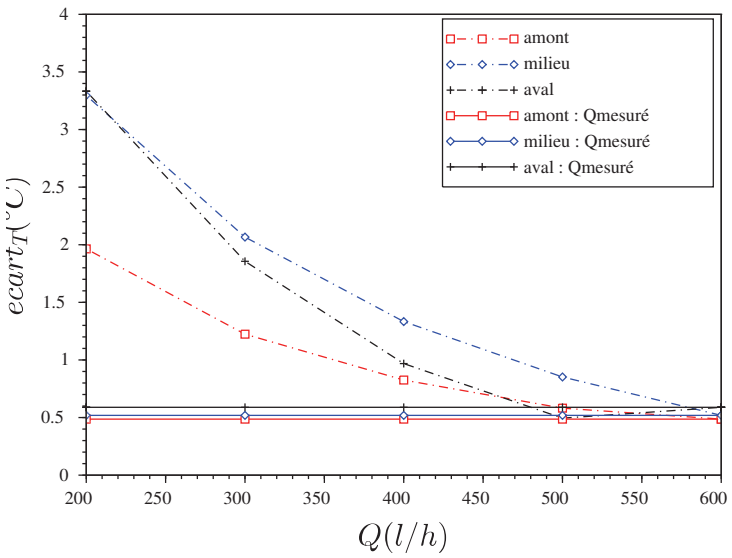
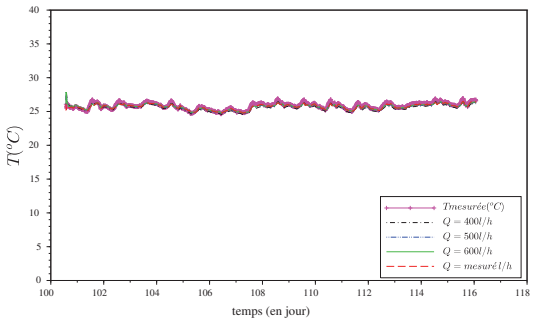


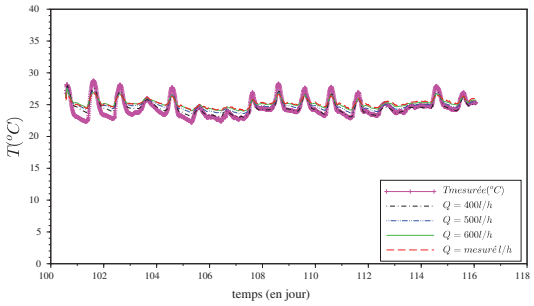
Figure 4.76: Écart moyen pour la température du milieu du drainant pour le mois de d'octobre

Température du bas de la couche poreuse. Les figures 4.77 (a) et (b) présentent les trois points de mesure de la température du milieu du drainant. On remarque que la fluctuation de température est beaucoup moins importante que celle de la surface de la chaussée et du haut de drainant. Cette température fluctue aux alentours de la valeur de la température d'injection du fluide.

La figure 4.78 présente l'écart moyen de la température du bas du drainant. L'écart moyen en amont est de 0.2 ^{o}C alors qu'au milieu il atteint 1 ^{o}C pour un débit de 600 l/h.



(a) amont



(b) milieu

Figure 4.77: Températures du bas du drainant simulées pour le mois d'octobre pour différentes valeurs de débit et comparaison avec la température mesurée

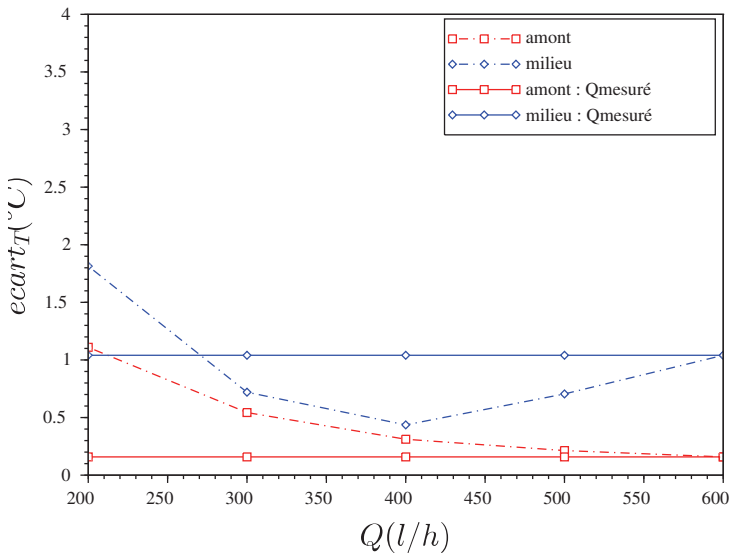


Figure 4.78: Écart moyen pour la température du bas du drainant pour le mois d'octobre

Les analyses présentées précédemment permettent de retenir un modèle à débit constant de 600 l/h qui soit le plus proche des mesures expérimentales. Cette valeur est cohérente avec le débit réel mesuré.

4.6.3.3 Température du bac aval

On rappelle que l'application vise la récupération d'énergie solaire ou le chauffage de la surface de la chaussée. Les énergies en jeu sont évaluées en comparant les températures de sortie du fluide et sa température d'injection (contrôlée). Pour la sortie du fluide, nous nous intéressons ici à la température du bac aval, en comparant les températures simulées et mesurée. Le "modèle de bac" permet de valider la simulation de la température de sortie du fluide à l'aide du modèle développé dans le chapitre 3, en s'appuyant sur les mesures expérimentales de la température du bac aval.

D'aprés les résultats de simulation, en prenant comme condition en aval de la couche drainante un flux nul, on remarque des grands écarts entre la température mesurée du bac aval et la température du fluide en sortie du drainant.

Cet écart est dû au fait que l'eau sortant de la couche drainante est versée dans un bac de volume d'eau 300 l, le volume du béton étant de 600 l. Ce bac est soumis aux conditions météorologiques extérieures avec lequelles il échange de l'énergie. Nous proposons ici de modifier la condition de bord aval de la couche drainante comme

suit. On suppose le bac isolé de l'extérieur et on note v son volume d'équivalent en eau en termes de capacité calorifique. On suppose que le fluide sortant de la couche d'enrobé drainant échange sa chaleur avec ce volume v selon les lois simples de la calorimétrie.

Pendant un intervalle de temps dt, chaque tranche dy de la couche d'enrobé drainant alimente le bac amont d'un volume d'eau $\frac{Q(t)\,dy\,dt}{e_2}$ qui passe d'une température $T(t, L, y)$ à $T_b(t)$, où $T_b(t)$ est la température du bac à l'instant t.

Pendant ce même temps, le bac aval augmente sa température de dT_b. On peut donc écrire :

$$\frac{1}{e_2} \int_{e_1}^{e_1+e_2} Q(t)\, dt(\rho C)_l (T(t, L, y) - T_b(t))dy = (\rho C)_l\, v_b(t) \tag{4.45}$$

Soit encore :

$$\frac{dT_b(t)}{dt} = \frac{Q\,(t)}{e_2 v} \int_{e_1}^{e_1+e_2} (T(t, L, y) - T_b(t))dy \tag{4.46}$$

où

dT_b est la température du bac ;

$Q(t)$ est le débit ;

e_2 est la hauteur de la couche drainante ;

v est le volume du bac aval.

Par la suite, disposant de la température simulée $T(t, L, y)$, on peut déduire $T_b(t)$ en résolvant l'équation différentielle (4.46) qui se réécrit :

$$v\frac{dT_b}{dt}(t) + Q(t)T_b(t) = \frac{Q(t)}{e_2} \int_{e_1}^{e_1+e_2} T(t, L, y)dy \tag{4.47}$$

On remarque dans 4.47 que le cas limite $v = 0$ conduit à :

$$T_b(t) = \frac{1}{e_2} \int_{e_1}^{e_1+e_2} T(t, L, y)dy, \tag{4.48}$$

c'est-à-dire une température de bac égale à la moyenne de la température de sortie du fluide sur la tranche d'enrobé drainant.

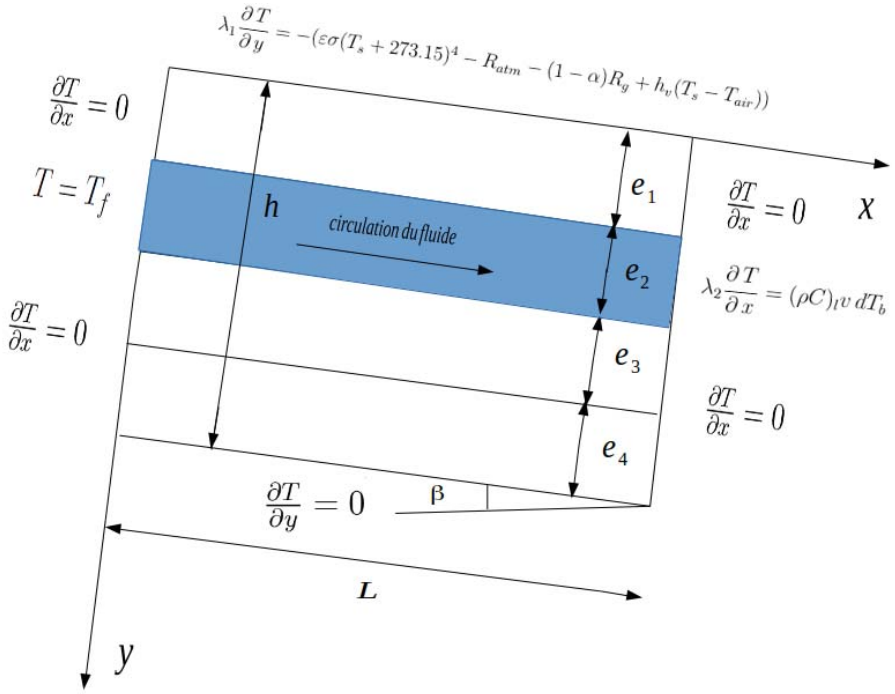


Figure 4.79: Conditions limites en prenant en considération l'effet du bac aval

Il faut coupler au modèle l'influence du bac aval résumé par l'équation 4.46 comme condition limite en aval pour la couche drainante. Par la suite les conditions limites de modélisation sont présentées dans la figure 4.79.

Le béton a environ une capacité calorifique deux fois moindre que l'eau. Aussi, 600 l de béton et 300 l d'eau sont équivalents à 600 l d'eau d'un point de vue calorifique. Nous testons donc sur la figure 4.80 la température simulée pour $v = 0$ (modèle origine) et $v = 600$ l avec pour ce dernier cas, un débit constant de 200 l/h et le débit réel mesuré. On compare ces simulations à la température mesurée du bac aval.

On constate une bonne adéquation entre la température du bac simulée avec $v = 600$ l et la température mesurée. En particulier, les amplitudes sont très proches et le déphasage disparaît.

On fournit sur la figure 4.81 les mêmes comparaisons que celles de la figures 4.80 pour la période d'octobre. On constate là encore une bonne adéquation entre la température du bac simulée (avec $v = 600$ l, $Q = 600$ l/h ou $Q_{mesuré}$) et celle mesurée.

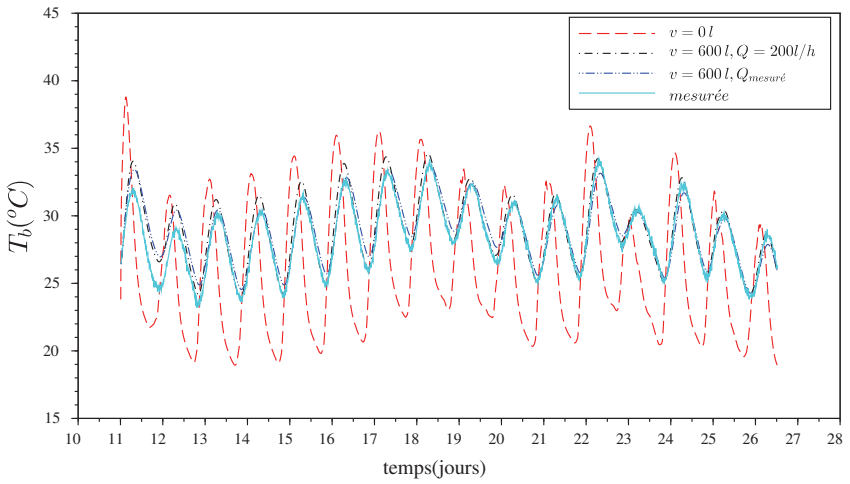


Figure 4.80: Évolution de la température du bac simulée et mesurée pour le mois de juillet

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une méthode d'identification d'un modèle thermique unidimensionnel de chaussée . La méthode a permis d'identifier un jeu de paramètres pour le mois de juillet avec un albédo et une émissivité fixés expérimentalement qui aboutissent à des erreurs moyennes quadratiques faibles de l'ordre de 0.7 ^{o}C. Ce jeu de paramètres a été appliqué sur les mois de juillet 2015 à février 2016. Une erreur quadratique maximale est atteinte pour le mois de septembre à hauteur de 1.47 ^{o}C. Par suite ce jeu de paramètres peut être appliqué sur tous les mois de l'année afin de dégager des quantités énergétiques (Chapitre 5).

Après validation du modèle thermique 1D, nous nous sommes intéressés à valider expérimentalement la loi hydraulique de Darcy. Les résultats expérimentaux pour un écoulement à surface libre et à saturation sur une maquette du laboratoire permettent de valider l'utilisation de cette loi pour le modèle hydraulique.

Finalement, nous avons validé un modèle thermo-hydraulique 2D avec les résultats de mesures sur la zone de circulation du fluide pour la période estivale et hivernale. Le modèle développé est un modèle simple dans lequel on prend des hypothèses simplificatrices (paramètres indépendants de la température, pas de phénomène d'évaporation de fluide circulant dans la couche drainante et pas de prise en compte de l'eau en surface de chaussée).

On s'intéresse dans le chapitre suivant à l'évaluation des quantités énergétiques :

- nécessaires au chauffage de la chaussée pour déverglacer ou déneiger sa surface ;
- récupérables en période estivale.

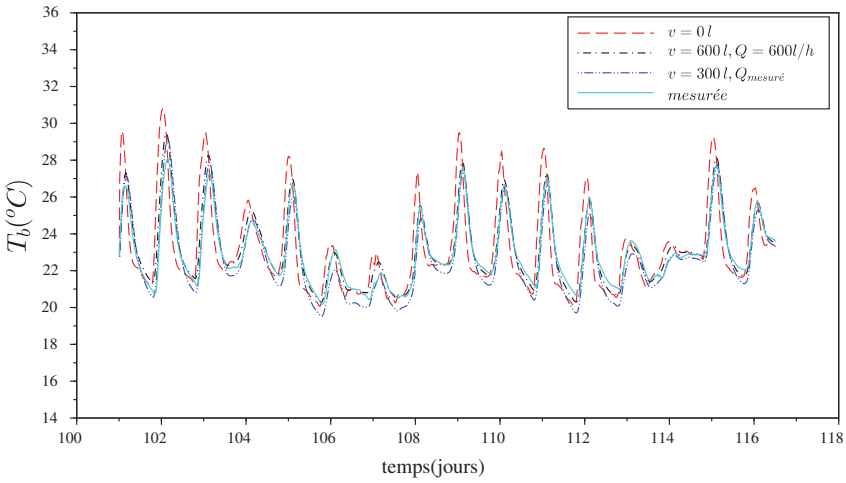


Figure 4.81: Évolution de la température du bac simulée et mesurée pour le mois d'octobre

5 Quantifications des énergies récupérables et nécessaires pour le déverglacage et le déneigement de la surface de la chaussée

5.1 Introduction

Le système de chauffage d'une surface de chaussée présenté au chapitre 3 doit être quantifié d'un point de vue énergétique pour ses deux fonctions : récupération d'énergie en période chaude et chauffage de la surface de chaussée pour le déneigement et le déverglaçage. Dans cette optique, on cherche à déterminer les quantités d'énergie solaire récupérables pendant l'été et celles nécessaires au maintien de la température de surface positive pendant l'hiver.

Les quantités énergétiques annuelles récupérables et nécessaires pour le déneigement sont évaluées en utilisant le modèle thermo-hydraulique 2D validé dans le chapitre 4 et en utilisant les données météorologiques de la réglementation thermique 2012 sur un an type de référence et celles de la Direction Interdépartementale des Routes Massif Central (DIR MC) pour une station météoroutière de l'autoroute A75.

Les besoins énergétiques sont évalués pour différentes configurations :

- calcul de l'énergie de chauffage nécessaire au maintien hors-gel de la surface de chaussée (température de surface positive) en ne prenant pas en compte les précipitations neigeuses, à l'aide des données de la RT2012 ;
- calcul de l'énergie de chauffage nécessaire pour assurer le déverglaçage et la fonte de la neige. La pluviométrie neigeuse est donc prise en compte et le déverglaçage est assuré en maintenant une température de surface au-dessus de celle du point de rosée. Les données de la DIR MC sont utilisées dans ce cas car elles contiennent les précipitations, ce qui n'est pas le cas pour celles de la RT2012.

Dans les deux cas, des calculs en régimes stationnaire et dynamique sont réalisés.

L'énergie récupérable est évaluée sur les mois d'été (juin, juillet et août) à l'aide des données de la RT2012. Elle sera évaluée *via* le gain de tempéraure du fluide entre son injection et sa sortie de la couche poreuse.

Le modèle hydraulique est appliqué sur la géométrie et les caractéristiques du démonstrateur d'Égletons définies respectivement dans les tableaux 4.6 et 4.11 du chapitre 4. En régime dynamique, les conditions initiales sont celles fournies par le régime stationnaire. Pour chaque période d'été et d'hiver, différentes stratégies d'injection du fluide dans la chaussée sont proposées. Il faut noter ici que ces stratégies ne sont pas nécessairement optimales, la recherche d'optimalité étant une approche qui sort du cadre des présents travaux. Enfin, l'influence des paramètres du système hydraulique bitumineux (débit, hauteur de couche poreuse, longueur de la chaussée) sur les quantités énergétiques est étudiée.

5.2 Données météorologiques utilisées

5.2.1 Données de la RT2012

Les données de la réglementation thermique française RT2012 sont définies de façon conventionnelle à partir de la méthode de calcul Th-B-C-E2012 [120]. Les variables météorologiques considérées dans cette méthode de calcul sont :

- la température de l'air (figure 5.1) : T_{air} (^{o}C) ;
- le rayonnement atmosphérique (figure 5.2) : R_{atm} (W/m^2) ;
- le rayonnement globale (figure 5.5) : R_g (W/m^2) ;
- la vitesse du vent pour une altitude de 10 m en zone ouverte (figure 5.3) : V_{vent} (m/s) ;
- la température d'eau alimentant la production de l'eau chaude sanitaire (ECS) à l'altitude 0 m (figure 5.4) : T_{eau} (^{0}C).

Les données représentent une année type définie à partir de la norme Européenne NR EN ISO 15927-4 par moyennisation des paramètres sur plusieurs années mesurés par Météo-France (www.meteo.fr) sur la période de janvier 1994 à décembre 2008. Les données sont fournies au pas horaire pour une altitude nulle. Une méthode de calcul permet de les extrapoler à différentes altitudes.

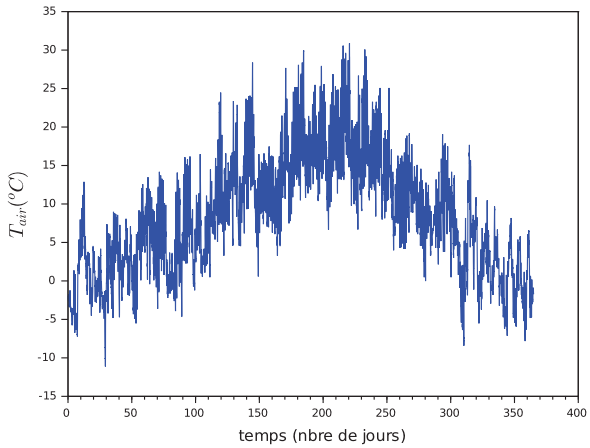


Figure 5.1: Évolution annuelle moyenne de la température d'air (données RT2012)

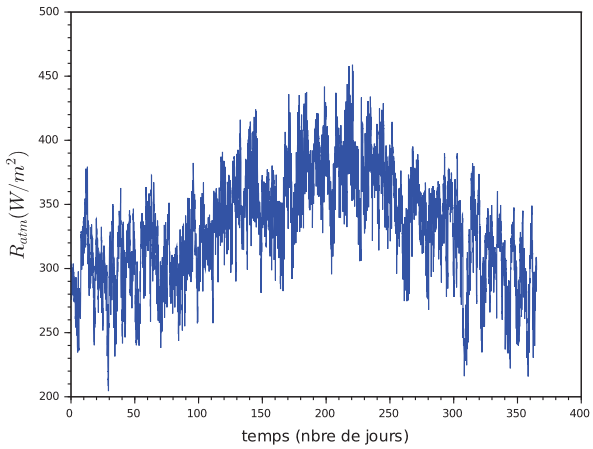


Figure 5.2: Évolution annuelle moyenne du rayonnement atmosphérique (données RT2012)

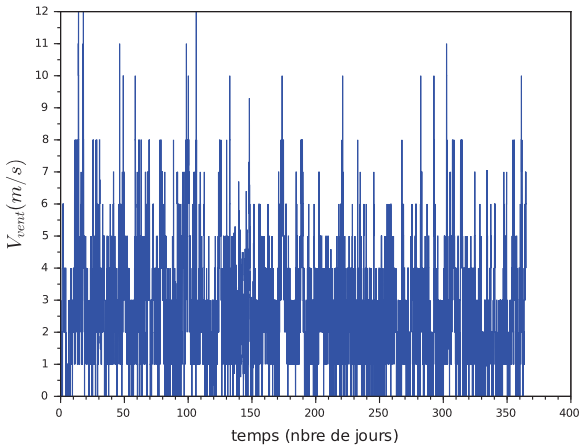


Figure 5.3: Évolution annuelle moyenne de la vitesse du vent (données RT2012)

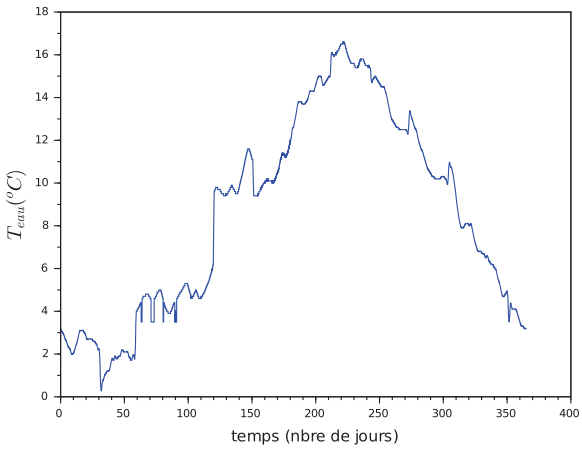


Figure 5.4: Évolution annuelle moyenne de la température d'eau sanitaire (données RT2012)

La segmentation géographique est répartie en huit zones climatiques dont les stations de référence sont précisées dans le tableau 5.1 et sur la figure 5.6

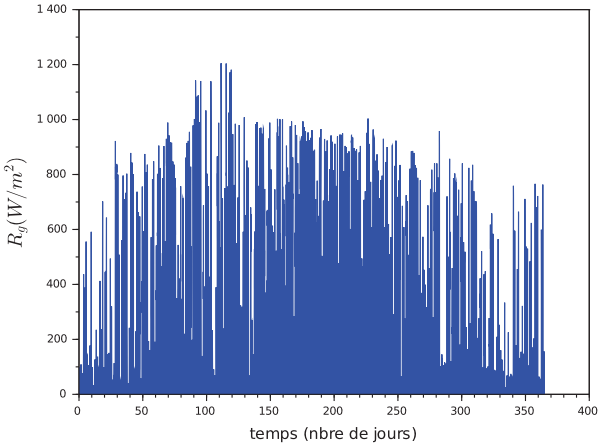


Figure 5.5: Évolution annuelle moyenne du rayonnement global (données RT2012)

Zone climatique	Ville
H1a	Trappes
H1b	Nancy
H1c	Mâcon
H2a	Rennes
H2b	La Rochelle
H2c	Agen
H2d	Carpentras
H3	Nice

Tableau 5.1: zones climatiques en France

Pour l'étude du fonctionnement de notre dispositif, on s'intéresse aux zones froides et notamment celle contenant la zone d'Auvergne. Pour cette raison, on a pris la station de Mâcon de la zone H1c. Il fallait faire une correction de la température de l'air suivant l'altitude. La correction se fait en appliquant la formule suivante [120] :

$$T_{air} = T_{air(0m)} - 0.005 \times alt_{corr} \tag{5.1}$$

où $T_{air}(0\,\mathrm{m})$ correspond à l'altitude à 0 m et alt_{corr} est le coefficient de correction d'altitude.

Le paramètre alt_{corr} prend les valeurs suivantes :

- si l'altitude est inférieure ou égale à 400 m, le site est considéré à 100 m et $alt_{corr} = 100\,\mathrm{m}$;
- si l'altitude est comprise entre 400 m et 800 m inclus, le site est considéré à 500 m et $alt_{corr} = 500\,\mathrm{m}$;

Figure 5.6: zones climatiques en France [120]

- si l'altitude est supérieure à 800 m, le site est considéré a 900 m et $alt_{corr} = 900$ m.

La station Mâcon de la zone H1c est située à une altitude de 216 m [121], conduisant à une correction d'altitude $alt_{corr} = 100$ m.

5.2.2 Données météorologiques de la Direction Interdépartementale des Routes Massif Central

Les données de la RT2012 ne contiennent pas des données de précipitations (pluie, neige, bruine ...). L'intensité de chute de neige est une donnée très importante pour estimer des quantités d'énergie de chauffage réelles pendant la période hivernale. Dans ce but, on utilise les données météorologiques de la Direction Interdépartementale des Routes Massif Central (DIR MC) de la station de Saint-Flour de l'autoroute A75 dont on fournit une localisation géographique sur la figure 5.7. On a utilisé les données des hivers 2009-2010 (novembre 2009 à avril 2010). On a traité ces données fournies au pas de temps de 6 min afin d'avoir des données horaires. Les données utilisées sont :

- la température d'air T_{air} (figure 5.8) ;
- la vitesse du vent V_{vent} (figure 5.9) ;
- le rayonnement atmosphérique R_{atm} (figure 5.10) ;

- le rayonnement global R_g (figure 5.11) ;
- l'intensité de chute de neige i_{neige} (figure 5.12) ;
- la température de point de rosée T_{rose} (figure 5.13) ;
- la température de surface mesurée T_s (figure 5.13). La température de surface atteint une valeur minimale de $-10\,^{o}$C.

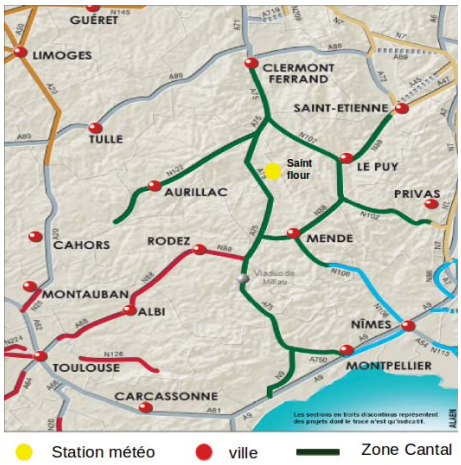


Figure 5.7: Carte des zones de la DIR MC

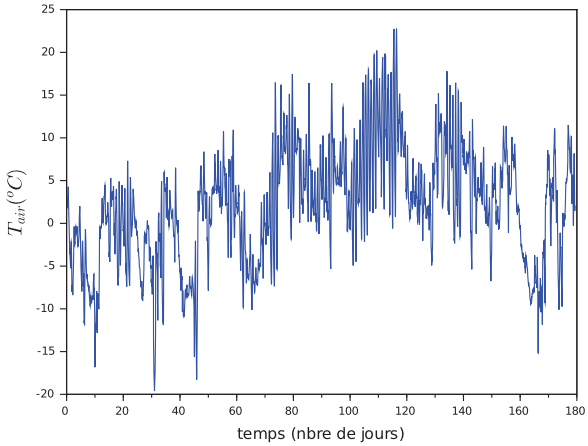


Figure 5.8: Évolution de la température d'air sur l'hiver 2009-2010

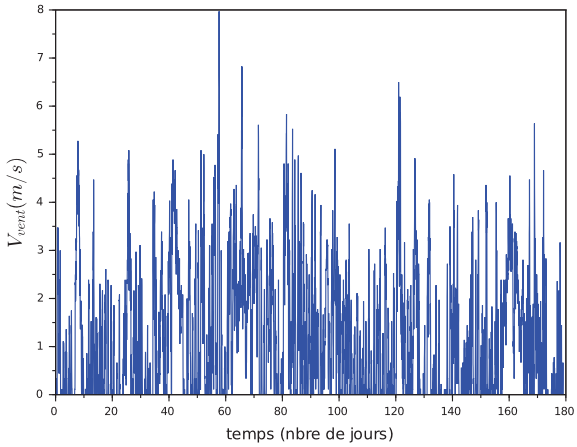


Figure 5.9: Évolution de la vitesse du vent sur l'hiver 2009-2010

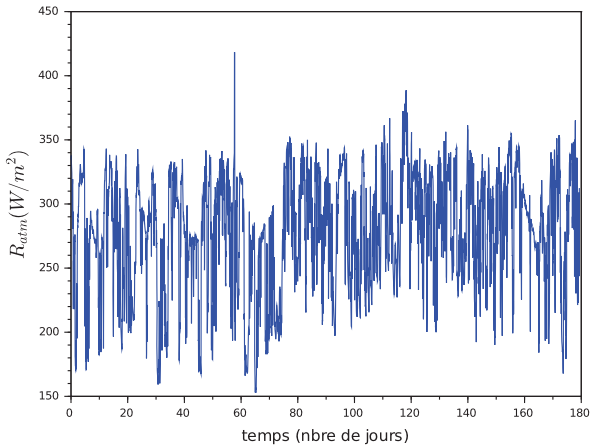


Figure 5.10: Évolution du rayonnement atmosphérique sur l'hiver 2009-2010

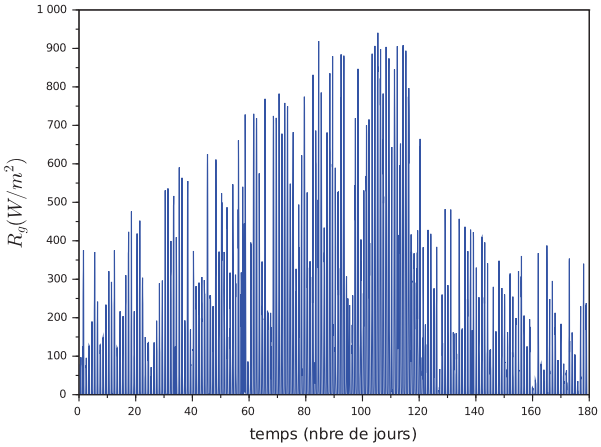


Figure 5.11: Évolution du rayonnement global sur l'hiver 2009-2010

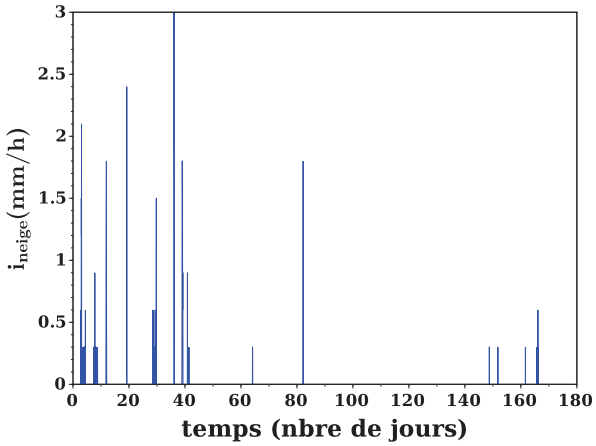


Figure 5.12: Évolution de l'intensité de chute de neige sur l'hiver 2009-2010

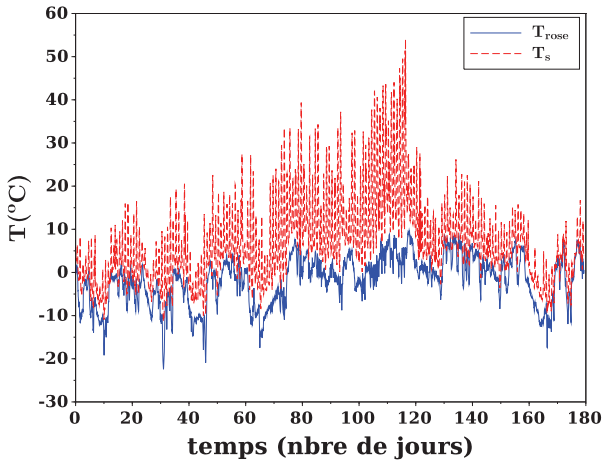


Figure 5.13: Évolution de la température du point de rosée et de surface sur l'hiver 2009-2010

5.3 Énergie nécessaire au chauffage de la chaussée sans prise en compte du verglas et de la neige

5.3.1 Introduction

Dans cette partie, on présente les calculs d'énergie de chauffage pour le seul maintien de la température de surface positive sans prise en compte des précipitaions neigeuses. Ces calculs permettent de fournir une première estimation des énergies en jeu. On s'intéresse en particulier à l'influence du débit, de l'épaisseur de la couche de roulement, de la largeur de la chaussée, de la température d'air et de la vitesse du vent sur les quantités énergétiques et les puissances de chauffage déterminées pour un cas stationnaire. Quatre valeurs de débit Q sont testées : 62.5 l/h, 125 l/h, 187.5 l/h et 250 l/h, deux épaisseurs e_1 de couche de roulement : 2 cm et 6 cm, deux largeurs L de chaussée : 4 m et 7 m, trois valeurs de température d'air T_{air} : $-4\,^0$C, $-2\,^0$C et $0\,^0$C, deux valeurs de vitesse du vent V_{vent} : 0 m/s et 3.1 m/s (on a choisi 3.1 m/s comme vitesse du vent qui correspond à la valeur médiane de la vitesse du vent de la RT2012, voir sous section 3.5.3.2 du chapitre 3). Ici, les débits sont ramenés à une longueur de chaussée de 1 m (direction perpendiculaire au plan 2D du modèle thermo-hydraulique). Les débits du démonstrateur mentionnés dans le chapitre 4 sont valables pour une longueur de 4 m. Soit quatre fois supérieurs.

Dans un deuxième temps, on fait l'étude énergétique par la simulation dynamique du modèle sur une période hivernale de 6 mois d'octobre à mars. On rappelle que l'on ne prend pas en compte la présence de la pluie, ni la transformation de la neige de l'état solide à l'état fluide. Contrairement au cas stationnaire dans lequel on peut tester différentes températures d'injection indépendantes du temps, le cas dynamique doit prendre en compte à la fois la possibilité dans le temps d'injecter ou de ne pas injecter du fluide, et de faire varier la température d'injection. Dans la suite, la température d'injection sera constante dans le temps, afin de simplifier l'algorithme permettant de piloter le système.

On commence par imposer la température d'injection : $T_{inj} = 15\,°$C. On emploie ensuite pour chaque temps discrétisé t_i une méthode de prédiction/correction :

1. on simule au temps t_{i+1} sans circulation de fluide ;
2. si la température de surface est positive, on passe au temps t_{i+1} et on recommence à partir de 1. avec t_{i+1} à la place de t_i ;
3. si la température de surface n'est pas positive en tout point, on simule au temps t_{i+1} avec circulation de fluide injecté à la température T_{inj} ;
4. si la température de surface n'est toujours pas positive en tout point, on simule entre t_{i-1} et t_{i+1} avec circulation fluide injecté à la température T_{inj} ;
5. si la température de surface n'est toujours pas positive en tout point, on simule entre t_{i-2} et t_{i+1} avec circulation fluide injecté à la température T_{inj} ;

6. on itère jusqu'à soit :
   - l'obtention de $k < i$ tel que la température de surface à t_{i+1} est positive en tout point après avoir simulé entre t_{i-k} et t_{i+1} avec circulation du fluide injecté à la température T_{inj}. Dans ce cas, on recommence à partir de 1. avec t_{i+1} à la place de t_i ;
   - l'inexistence d'un k défini précédemment. Dans ce cas on incrémente $T_{inj} = T_{inj} + 5$, et on recommence l'algorithme depuis le début (depuis t_o).

On obtient ainsi une température d'injection constante minimale et une loi de commande sur la circulation ou pas du fluide.

5.3.2 Cas stationnaire

On présente le cas stationnaire qui correspond à la simulation du problème du chapitre 3 (section 3.4.5.2) avec les données d'entrée suivantes :

- valeurs fixées : chaleurs volumiques $(\rho C)_i$ et conductivités thermiques λ_i des couches de chaussée, dévers β, épaisseur des couches 2, 3 et 4 (e_2, e_3 et e_4), chaleur volumique du fluide $(\rho C)_l$;

- valeurs variables : débit Q, hauteur de la couche de roulement e_1, température d'injection T_{inj}, température de l'air T_{air}, vitesse du vent V_{vent}, intensité de la neige i_{neige} (en absence de la neige, on retient $i_{neige} = 0\,\mathrm{mm/h}$), largeur de la chaussée L.

À noter que la vitesse de Darcy est calculé à partir de la relation suivante :

$$Q = V.A \tag{5.2}$$

où A est la section transversale de la couche drainante par unité de longueur $A = e_2 \times 1$.

La température d'injection T_{inj} correspond à la température minimale à injecter afin de maintenir la température de surface positive à l'abscisse L.

5.3.2.1 Chaussée de largeur 4 m et hauteur du BBSG de 6 cm

Dans la figure 5.14 (a) et (b), on présente l'évolution de la température d'injection T_{inj} et de la puissance P pour une chaussée de largeur 4 m et une hauteur de BBSG 6 cm. On remarque d'après les expérimentations numériques que T_{inj} et P sont linéaires par rapport à la température d'air pour Q et V_{vent} donnés. La puissance s'exprime par :

$$P = (\rho Cp)_w.Q.\frac{(T_{sor-f} - T_{inj})}{A} \tag{5.3}$$

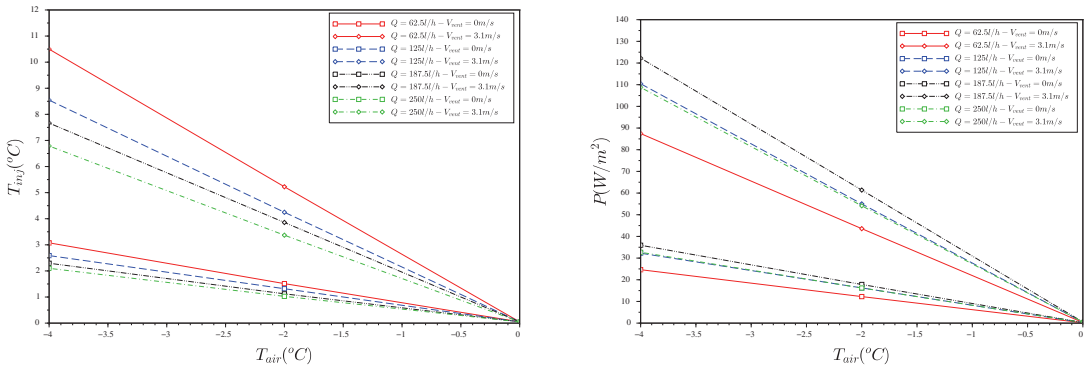
où

$T_{sor-f}(L,t)$ est la moyenne des températures pour $x = L$ et $e_1 \leq y \leq e_1 + e_2$ (^{o}C) ;

$A = L$ est la surface de la couche drainante (section longitudinale) par unité de longueur (m).

On remarque que plus T_{air} diminue, plus T_{inj} augmente. De plus la température d'injection est très sensible à la vitesse du vent. Par exemple pour $Q = 62.5$ l/h et $T_{air} = -4\,^o$C, la température d'injection pour maintenir positive T_s(x=L) est égale à 10.5 ^{o}C pour une vitesse de vent $V_{vent} = 3.1$ m/s alors qu'elle est beaucoup plus faible (3 ^{o}C) pour une vitesse de vent $V_{vent} = 0$m/s. On constate également que plus le débit augmente plus la température d'injection diminue.

Pour la puissance P, on remarque la même évolution que T_{inj} en fonction de T_{air} et V_{vent}. Par contre, plus le débit augmente plus la puissance augmente. La puissance minimale atteinte pour une température d'air de $-4\,^o$C correspond à un débit de 62.5 l/h de 25 W/m^2 pour une vitesse de vent $V_{vent} = 0$ m/s et 87 W/m^2 pour une vitesse de vent $V_{vent} = 3.1$ m/s. On peut conclure qu'en augmentant le débit on arrive à diminuer T_{inj} mais à augmenter P et le contraire en diminuant le débit.



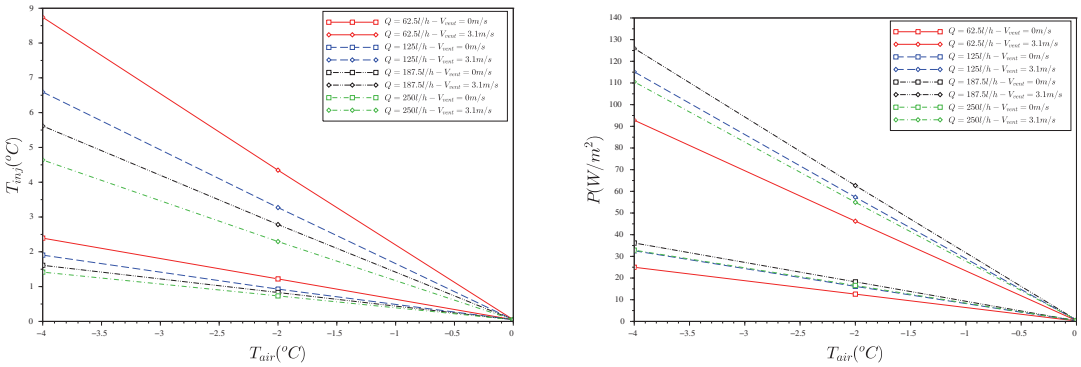
(a) Température d'injection **(b)** Puissance

Figure 5.14: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 4 m, hauteur de BBSG 6 cm

5.3.2.2 Chaussée de largeur 4 m et hauteur du BBSG 2 cm

Les paramètres étudiés ont la même influence sur T_{inj} et P en diminuant e_1. En comparant les figures 5.14 (a) et (b) pour $e_1 = 6$ cm avec les figures 5.15 (a) et (b) pour $e_1 = 2$ cm, on remarque que plus la hauteur du BBSG diminue plus la température d'injection diminue. Cela est dû au fait que l'échange de chaleur vertical est plus rapide avec la diminution de e_1. La température d'injection maximale T_{inj}

est de 9.7 ^{o}C pour $Q = 62.5$ l/h et $T_{air} = -4\,^o$C. La puissance maximale atteinte pour $e_1 = 2$ cm est 126 W/m^2, du même ordre de grandeur que celle pour $e_1 = 6$ cm.

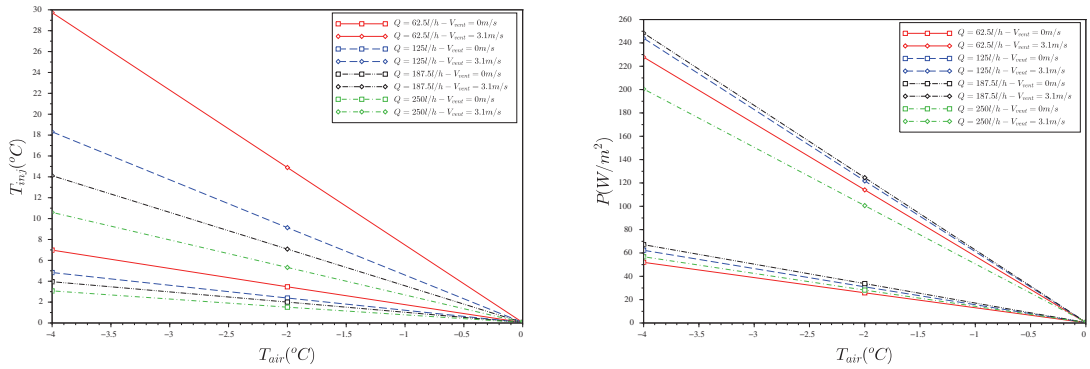


(a) Température d'injection **(b)** Puissance

Figure 5.15: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 4 m, hauteur de BBSG 2 cm

5.3.2.3 Chaussée de largeur 7 m et hauteur du BBSG 6 cm

En comparant les figures 5.16 (a) et (b) pour une largeur L de 7 m avec les figures 5.14 (a) et (b) pour une largeur de 4 m, on remarque que la température d'injection pour le cas critique ($Q = 62.5\,\mathrm{l/h}$ et $V_{vent} = 3.1\,\mathrm{m/s}$) passe de 10.5^o C ($L = 4\,\mathrm{m}$) à 30° C ($L = 7\,\mathrm{m}$). La puissance maximale atteinte est de $250\,\mathrm{W/m^2}$ pour un débit Q de $187.5\,\mathrm{l/h}$ et une vitesse de vent de $3.1\,\mathrm{m/s}$.



(a) Température d'injection **(b)** Puissance

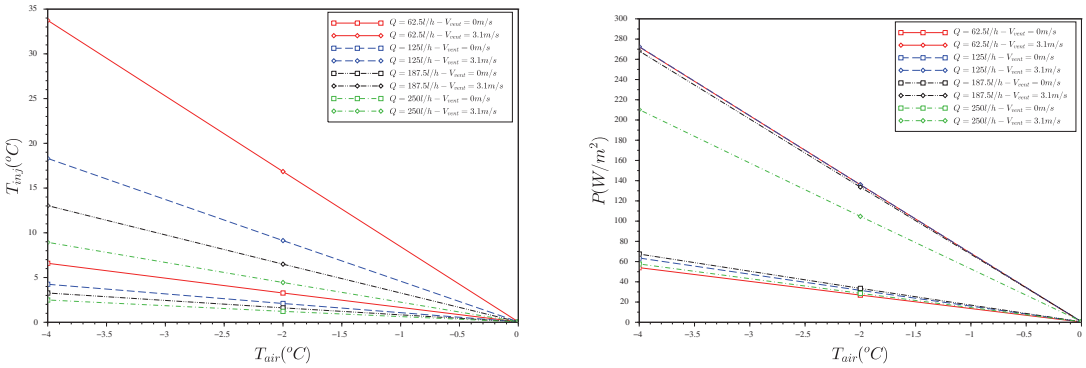
Figure 5.16: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 7 m, hauteur de BBSG 6 cm

5.3.2.4 Chaussée de largeur 7 m et hauteur du BBSG 2 cm

En comparant les figures 5.17 (a) et (b) avec les figures 5.16 (a) et (b), on remarque que, contrairement à une largeur de 4 m, plus e_1 augmente plus la température d'injection diminue. Cela peut être expliqué par le fait que l'échange thermique vertical augmente avec la diminution de la hauteur mais au bout d'une certaine largeur cet échange thermique aura moins d'importance que l'échange entre la chaussée et l'environnement. La valeur maximale de puissance ($270\,\mathrm{W/m^2}$) est atteinte pour $Q = 187.5$ l/h, $T_{air} = -4\,^o$C et $V_{vent} = 3.1\,\mathrm{m/s}$.

On peut conclure que plus la largeur de la chaussée augmente, plus il faut augmenter la température d'injection.

Les puissances calculées correspondent à des cas sans présence de neige et sont donc sous-estimées. Les valeurs atteintes pour les cas extrêmes testés varient entre 125 et $270\,\mathrm{W/m^2}$. Ces valeurs sont inférieures aux valeurs trouvées dans la littérature pour déverglacer la surface d'une chaussée entre 320 et $600\,\mathrm{W/m^2}$ [37].



(a) Température d'injection **(b)** Puissance

Figure 5.17: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 7 m, hauteur de BBSG 2 cm

5.3.2.5 Profil de la température de surface

On présente, après les températures d'injection et les puissances, l'évolution de la température de surface pour le cas extrême ($V_{vent} = 3.1$ m/s et $T_{air} = -4\,^oC$) avec le débit et la hauteur du BBSG pour les deux largeurs de chaussée 4 m et 7 m. D'après les figures 5.18 (L=4 m) et 5.19 (L=4 m), on remarque que plus le débit est faible plus l'écart entre T_s(x=0 m) et T_s(x=4 m) augmente. La température de surface à $x = 0$ m est la plus élevée pour $Q = 62.5$ l/h car la température d'injection est maximale. De plus, on remarque que, plus la hauteur du BBSG diminue, plus l'écart entre T_s(x=0 m) et T_s(x=4 m) augmente. En effet, en diminuant la profondeur e_1, on facilite l'échange entre l'eau du drainant et la surface. Par la suite, l'eau perd plus d'énergie pour une profondeur de 2 cm que pour 6 cm.

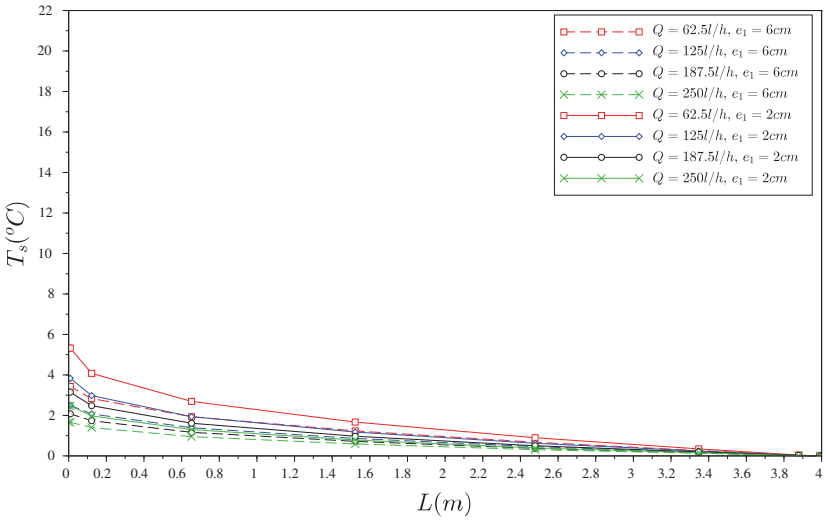


Figure 5.18: Évolution de la température de surface pour $T_{air} = -4\,^oC$, $V_{vent} = 3.1\,m/s$ et $L = 4\,m$ sans présence de la neige

On constate également que plus le débit diminue et la largeur de la chaussée augmente, plus la température d'injection et l'écart entre T_s(x=0 m) et T_s(x=4 m) augmentent et plus la puissance diminue.

5.3.3 Cas dynamique

On rappelle que l'on simule le modèle dynamique présenté dans le chapitre 3 développé dans la section 3.4.5.2 (équation (3.50)) sur 6 mois d'hiver d'octobre à mars avec les données de la RT2012 selon le protocole présenté en section 5.3.1. On teste les débits suivants : 125, 175.5 et 250 l/h. Un débit de 62.5 l/h est si faible que l'on ne réussit pas à maintenir la température de surface positive pour une température d'injection inférieure à 40 ^oC pour une largeur de 4 m alors que, pour une largeur de 7 m, il faut injecter au minimum une température de 90 ^oC. Les résultats énergétiques E_{hiver} (équation (5.5)) et de puissance P_{hiver} (équation (5.4)) pour la période hivernale pour une largeur de 4 m et de 7 m sont présentés dans les deux tableaux 5.2 et 5.3.

$$P_{moy-hiver} = \frac{E_{hiver}}{nb_{heure-inj}} \tag{5.4}$$

$$E_{hiver} = \frac{(\rho C_p)_l\, Q}{A} \sum_{i=1}^{nb_{heure-inj}} \left(T_{sor-f}\left(L, t_i\right) - T_{inj}\left(t_i\right)\right) \times pdt \tag{5.5}$$

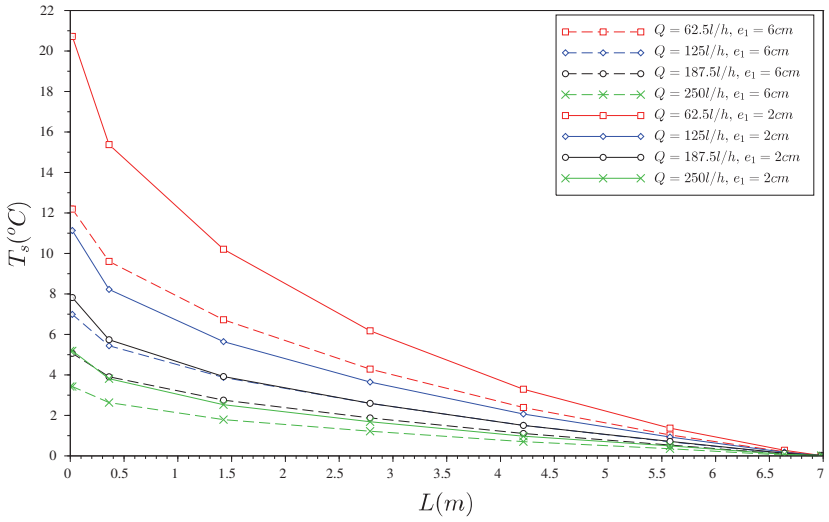


Figure 5.19: Évolution de la température de surface pour $T_{air} = -4\,^oC$, $V_{vent} = 3.1\,m/s$ et $L = 7\,m$ sans présence de la neige

où

- $P_{moy-hiver}$ est la puissance moyenne de chauffage (W/m^2) ;
- E_{hiver} est l'énergie de chauffage (kWh/m^2) ;
- $A = L$ est la surface de la couche drainante (section longitudinale) par unité de longueur (m) ;
- L est la largeur de la chaussée (m) ;
- pdt est le pas de temps égal à 600 s.

On remarque que pour une largeur de 4 m, on arrive à maintenir la température de surface positive avec $T_{inj} = 25$ et $30\,^oC$ pour les trois débits. Par contre pour une largeur de 7 m il faut injecter une température minimale de 70 ^{o}C, 45 ^{o}C, 35 ^{o}C pour des valeurs de débit respectivement 125, 175.5 et 250 l/s. Plus la distance d'écoulement L augmente, plus il est difficile de maintenir T_s(x=L) positive (débit fort pour obtenir T_{inj} minimale). On s'interesse dans la suite à des structures de chaussée de faible largeur $L = 4\,m$. La figure 5.20 montre que le débit n'a pas une influence sur l'énergie nécessaire.

Pour $e_1 = 6$ cm et $T_{inj} = 25\,^o$C, la quantité d'énergie de chauffage est la plus faible (150 kWh/m^2) pour $L = 4\,m$ alors qu'elle est quatre fois plus faible que la quantité d'énergie minimale (545 kWh/m^2) pour $L = 7$ m, avec $Q = 250$ l/h, $e_1 = 6$ cm et $T_{inj} = 35\,^o$C. D'après les résultats des quantités d'énergie et du nombre d'heures de circulation du fluide pour le chauffage $nb_{heure-inj}$, on calcule la puissance moyenne de chauffage.

D'après la figure 5.21, on remarque que plus le débit augmente, plus le nombre d'heures de chauffage diminue (en effet, l'énergie E_{hiver} est quasi constante). On remarque que la puissance moyenne de chauffage nécessaire est beaucoup plus grande que celle trouvée dans la littérature (400 et 600 W/m^2 sans présence de la neige). Par contre au niveau de l'énergie de chauffage, les quantités déterminées sont cohérentes avec celles trouvées dans la littérature. L'évolution temporelle des puissances instantanées est tracée sur la figure 5.22 pour $L = 4$ m.

Q (l/h)	e_1 (cm)	T_{inj} (^{o}C)	$nb_{heure-inj}$ (h)	E_{hiver} (kWh/m^2)	$P_{moy-hiver}$ (W/m^2)	$P_{max-hiver}$ (W/m^2)
125	6	25	227	149	645	906
125	6	30	207	167	807	1079
125	2	25	248	172	693	905
125	2	30	230	195	848	1077
187.5	6	25	177	153	864	1248
187.5	6	30	156	168	1077	1486
187.5	2	25	187	171	914	1243
187.5	2	30	170	190	1118	1480
250	6	25	150	154	1027	1516
250	6	30	134	170	1269	1804
250	2	25	158	170	1076	1507
250	2	30	146	192	1315	1794

Tableau 5.2: Quantités énergétiques de chauffage pendant l'hiver pour une largeur de chaussée de 4 m d'après les données de la RT2012

Q (l/h)	e_1 (cm)	T_{inj} (^{o}C)	$nb_{heure-inj}$ (h)	E_{hiver} (kWh/m^2)	$P_{moy-hiver}$ (W/m^2)	$P_{max-hiver}$ (W/m^2)
125	6	70	484	1094	2260	2702
125	6	75	403	1007	2498	2525
125	2	85	524	1497	2856	3212
125	2	90	407	1256	3086	3218
187.5	6	45	309	653	2114	2475
187.5	6	50	293	700	2389	2697
187.5	2	45	346	753	2176	2300
187.5	2	50	318	782	2459	2723
250	6	35	263	545	2072	2401
250	6	40	251	610	2430	2800
250	2	35	286	622	2175	2417
250	2	40	270	680	2158	2673

Tableau 5.3: Quantités énergétiques de chauffage pendant l'hiver pour une largeur de chaussée de 7 m d'après les données de la RT2012

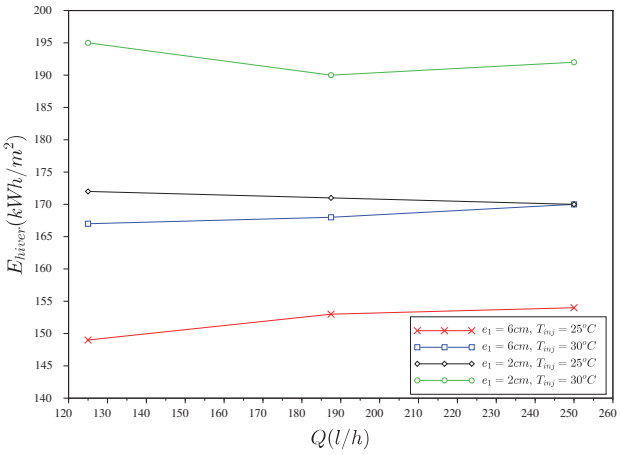


Figure 5.20: Quantités énergétiques de chauffage pour les 6 mois d'hiver pour $L = 4m$ d'après les données de la RT2012

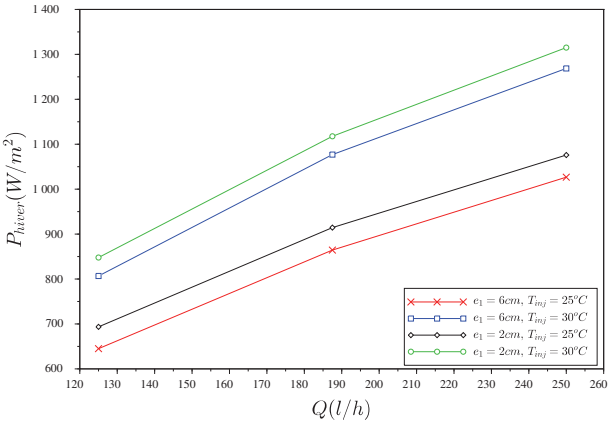


Figure 5.21: Puissances de chauffage pour les 6 mois d'hiver pour $L = 4m$ d'après les données de la RT2012

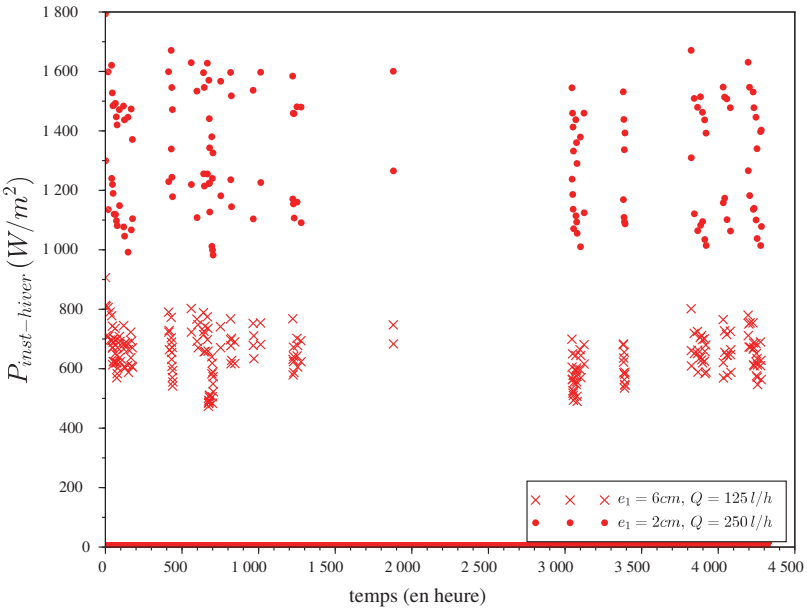


Figure 5.22: Puissances de chauffage instantannées pour les 6 mois d'hiver pour $L = 4m$ d'après les données de la RT2012

5.4 Énergie de chauffage nécessaire pendant l'hiver pour la fonte de la neige et du verglas

Dans cette section, on étudie la quantité énergétique de chauffage et la température d'injection en prenant en compte la neige et le verglas.

On a testé quatre valeurs de débit (62.5 l/h, 125 l/h, 187.5 l/h et 250 l/h), deux épaisseurs de BBSG (2 cm et 6 cm), deux largeurs (4 et 7 m), cinq valeurs de température d'air $(-4, -2, 0, 2, 4\,^oC)$, deux valeurs de vitesse du vent (0 et 3.1 m/s), trois intensités de chute de neige (1, 2 et 3 mm).

En présence de la neige, la condition limite en surface diffère de celle sans présence de neige et s'exprime par la formule suivante :

$$\lambda_1 \frac{\partial T(t,y)}{\partial y} = -(\varepsilon\sigma(T_s(t,0) + 273.15)^4 - R_{atm} - (1-\alpha)R_g + H_v - Q_{fusion}) \quad (5.6)$$

où Q_{fusion} est la puissance à fournir pour fondre la neige

$$Q_{fusion} = L_f \rho_l i_{neige} \quad (5.7)$$

L_f est la chaleur latente de fusion de la glace est égale à 333.5 J/kg ;

ρ_l est la masse volumique de l'eau (kg/m^3) ;

i_{neige} est l'intensité de chute de neige (mm/h) ;

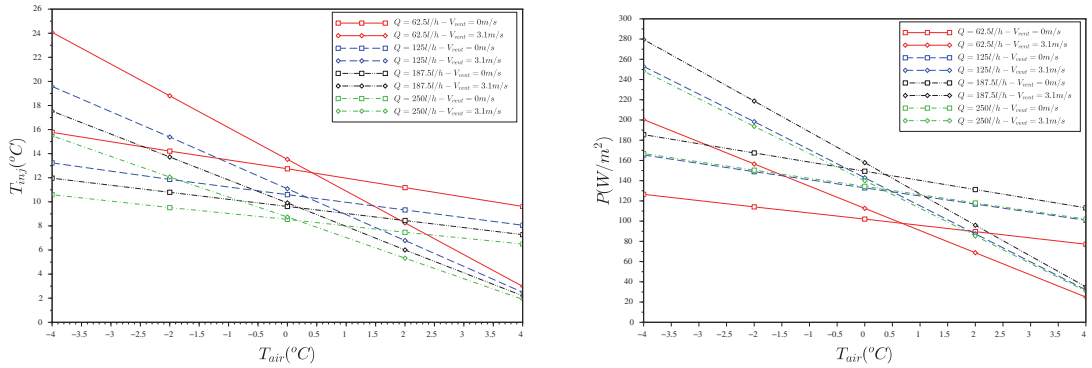
5.4.1 Cas stationnaire

Dans cette partie, on cherche à déterminer la température d'injection de fluide en cas de chute de neige par le modèle de simulation en régime stationnaire afin d'avoir une idée sur la valeur de la température que l'on doit injecter en régime dynamique dans un cas réel.

5.4.1.1 Chaussée de largeur 4 m et hauteur du BBSG 6 cm

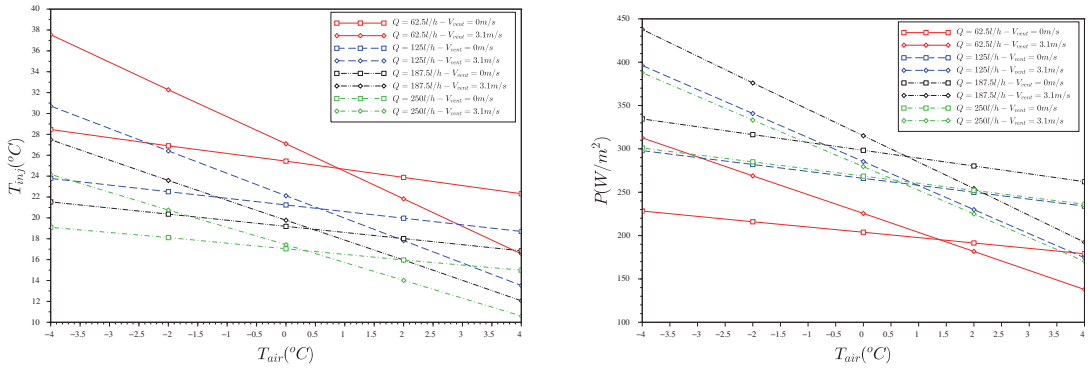
Les figures 5.23 (a), 5.24 (a) et 5.25 (a) représentent la température d'injection minimal pour une largeur de chaussée de 4 m, une hauteur du BBSG de 6 cm, des intensités i de 1, 2 et 3 mm/h respectivement. On remarque que pour une vitesse de vent donnée, plus le débit augmente, plus la température d'injection diminue. Pour un débit donné et pour une température d'air négative, plus la vitesse du vent augmente plus la température d'injection augmente. Par contre pour une température d'air positive plus la vitesse augmente, plus la température d'injection diminue. Cela est dû au phénomène d'échange d'énergie avec la surface. Plus la vitesse du vent augmente plus il y a un échange entre la surface et l'environnement. En plus, on remarque que plus l'intensité de chute de neige augmente plus il faut apporter de la chaleur pour dégeler la surface d'où l'augmentation de la température d'injection. Par exemple pour un cas extrême de température d'air ($-4\,^o$C), vitesse de vent de (3.1 m/s) et débit (250 l/h), il faut injecter une température de fluide de 24, 37.7 ou 51.5 ^{o}C pour des intensités de chute de neige de $1, 2, 3$ mm/h respectivement.

L'analyse des figures 5.23 (b), 5.24 (b) et 5.25 (b) montrent que plus la température extérieure et la vitesse du vent sont élevées, plus la puissance augmente. De plus, la puissance la plus faible est atteinte pour un débit de 62.5 l/h. Les puissances maximales sont atteintes pour $i = 3$ mm/h. Pour une température extérieure de $-4\,^o$C et i de 3 mm/h la puissance est de 482 W/m^2 pour une vitesse du vent $V_{vent} =$ 0 m/s alors qu'elle est plus importante pour une vitesse du vent $V_{vent} = 3.1$ m/s (600 W/m^2). Par contre pour ces puissances minimales, il faut injecter un fluide à une température de 41 ^{o}C ($V_{vent} = 0$ m/s) et 51 ^{o}C ($V_{vent} = 3.1$ m/s) alors que pour un débit quatre fois plus important, on réduit la température d'injection T_{inj} jusqu'à 19 ^{o}C ($V_{vent} = 0$ m/s) et 23 ^{o}C ($V_{vent} = 3.1$ m/s). Il est donc important d'avoir une méthode de contrôle optimal afin de minimiser la température d'injection et la puissance. À noter que les puissances trouvées dans la littérature pour un système hydraulique avec tuyaux pour des cas de neige varient entre 400 et 1200 W/m^2 selon les conditions climatiques. Les valeurs de puissances calculées se trouvent dans cet intervalle.



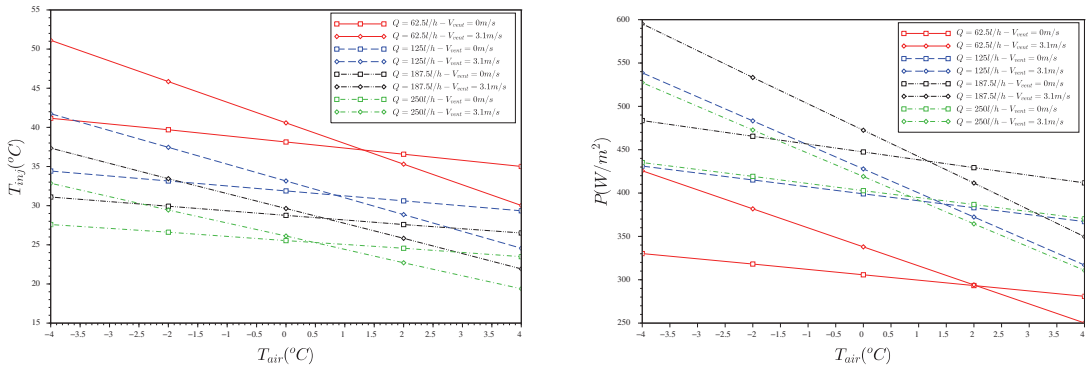
(a) Température d'injection **(b)** Puissance

Figure 5.23: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 4 m, hauteur de BBSG 6 cm et pour une intensité de neige de 1 mm/h



(a) Température d'injection **(b)** Puissance

Figure 5.24: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 4 m, hauteur de BBSG 6 cm et pour une intensité de neige de 2 mm/h



(a) Température d'injection **(b)** Puissance

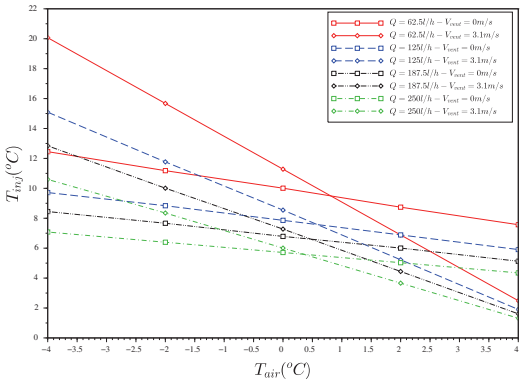
Figure 5.25: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 4 m, hauteur de BBSG 6 cm et pour une intensité de neige de 3 mm/h

5.4.1.2 Chaussée de largeur 4 m et hauteur du BBSG 2 cm

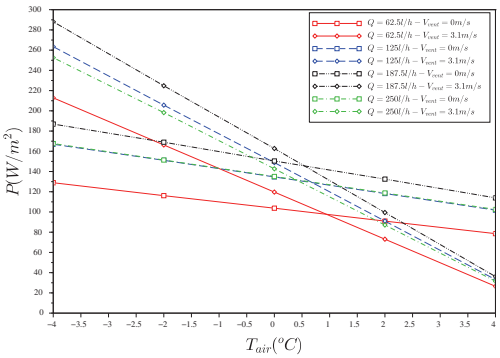
D'après les figures 5.26 (a), 5.27 (a) et 5.28 (a) et en comparant avec les résultats des figures 5.23 (a), 5.24 (a) et 5.25 (a), la température d'injection diminue avec la diminution de la hauteur du BBSG. Cela est dû au fait que plus la hauteur diminue

plus la transmission de chaleur dans le sens vertical entre la couche du BBSG et du BBDR est rapide. Pour un cas extrême de température d'air ($-4\,^o$C), de vitesse de vent (3.1 m/s) et de débit (250 l/h), il faut injecter une température de fluide de 20, 31.7 ou 42.4 ^{o}C pour des intensités de chute de neige de $1, 2$, et 3 mm/h respectivement.

L'analyse des figures 5.26 (b), 5.27 (b) et 5.28 (b) montre une cohérence avec celles des figures 5.23 (b), 5.24 (b) et 5.25 (b). En plus, pour $Q = 62.5$ l/h et $T_{air} = -4\,^o$C les puissances calculées sont un peu plus élevées pour $e_1 = 2$ cm (puissance maximale $P = 625$ W/m^2 pour $i = 3$ mm/h) que celles pour $e_1 = 6$ cm (puissance maximale $P = 600$ W/m^2 pour $i = 3$ mm/h). Par contre les températures d'injection sont plus faibles pour $e_1 = 2$ cm (température d'injection maximale $T_{inj} = 43\,^o$C pour $i = 3$ mm/h) que pour $e_1 = 6$ cm (température d'injection maximale $T_{inj} = 52\,^o$C pour $i = 3$ mm/h).

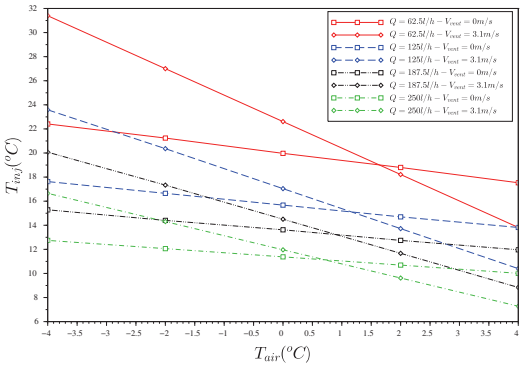


(a) Température d'injection

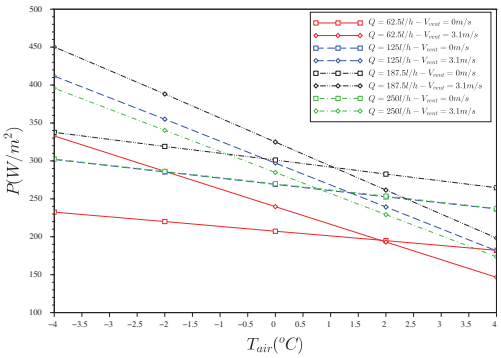


(b) Puissance

Figure 5.26: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 4 m, hauteur du BBSG 2 cm et pour une intensité de neige de 1 mm/h

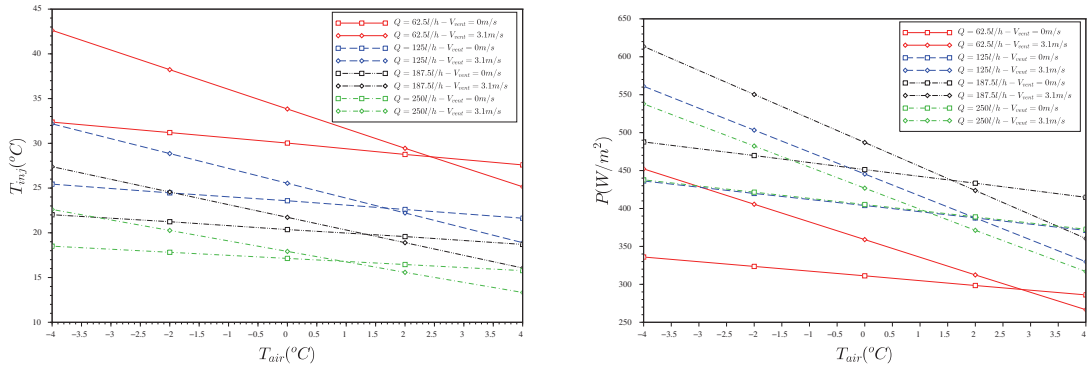


(a) Température d'injection



(b) Puissance

Figure 5.27: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 4 m, hauteur de BBSG 2 cm et pour une intensité de neige de 2 mm/h



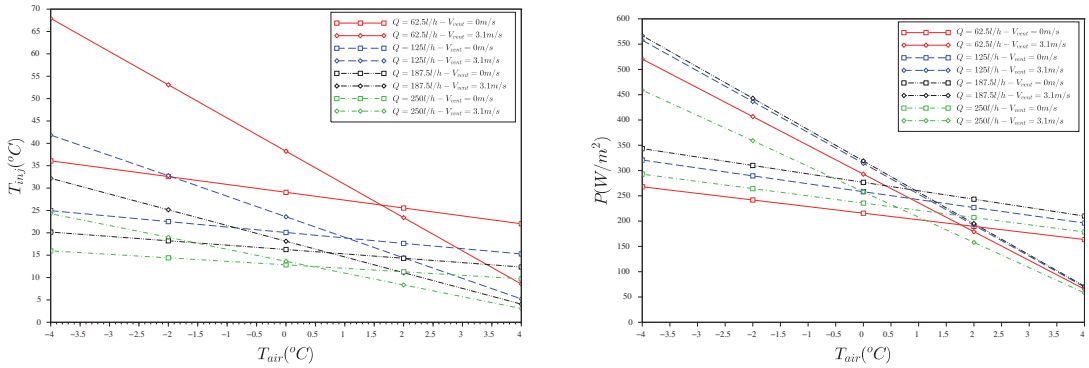
(a) Température d'injection **(b)** Puissance

Figure 5.28: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 4 m, hauteur de BBSG 2 cm et pour une intensité de neige de 3 mm/h

5.4.1.3 Chaussée de largeur 7 m et hauteur du BBSG 6 cm

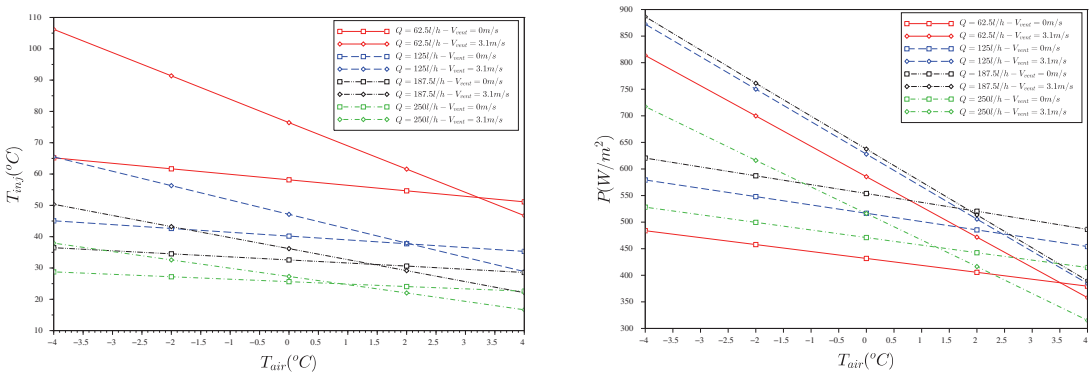
D'après les figures 5.29, 5.30 et 5.31 et en comparant avec les résultats des figures 5.23, 5.24 et 5.25, la largeur de la chaussée est un des paramètres les plus pertinents pour la température d'injection du fluide. La température d'injection du fluide d'une largeur de 7 m est deux fois plus grande que celle avec une largeur de 4 m alors que pour le cas extrême ($T_{air} = -4\,^oC$, $V_{vent} = 3.1$ m/s et $Q = 250$ l/h) la température d'injection est le triple de celle dans le cas de 4 m (68 ^oC, 107 ^oC et 145 ^oC) pour des intensités $i = 1, 2, 3$ mm/h respectivement.

L'analyse des figures 5.29 (b), 5.30 (b) et 5.31 (b) montre que la puissance minimale pour $Q = 62.5$ l/h et $T_{air} = -4\,^oC$ pour une largeur de 7 m est deux fois plus grande que celle pour une largeur de 4 m (pour $i = 3$ mm/h, la puissance minimale est 700 W/m^2 pour $L = 7$ m alors qu'elle est 330/m^2 pour $L = 4$ m).



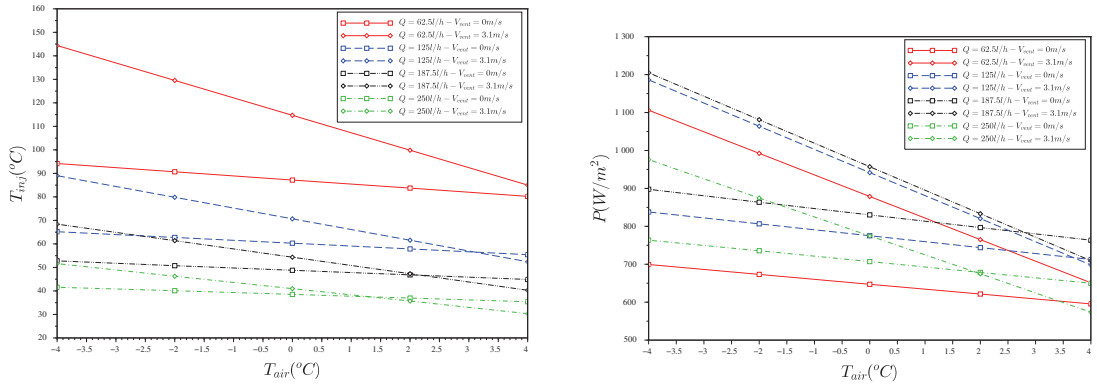
(a) Température d'injection **(b)** Puissance

Figure 5.29: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 7 m, hauteur de BBSG 6 cm et pour une intensité de neige de 1 mm/h



(a) Température d'injection **(b)** Puissance

Figure 5.30: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 7 m, hauteur de BBSG 6 cm et pour une intensité de neige de 2 mm/h



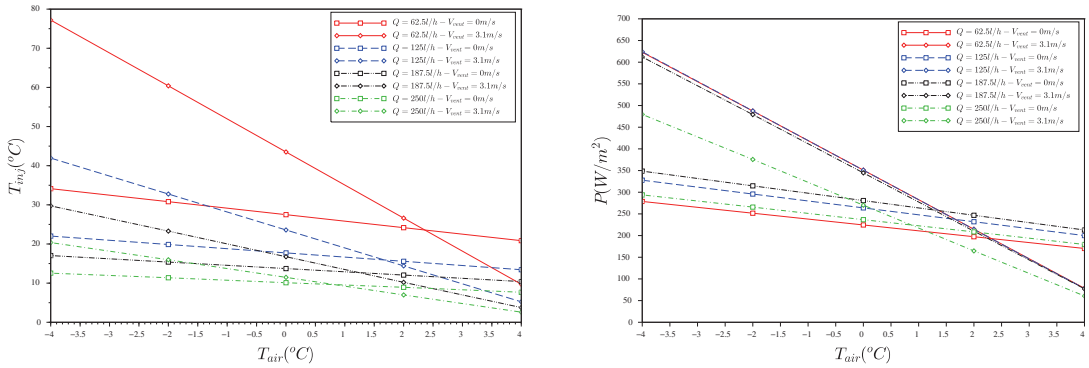
(a) Température d'injection **(b)** Puissance

Figure 5.31: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 7 m, hauteur de BBSG 6 cm et pour une intensité de neige de 3 mm/h

5.4.1.4 Chaussée de largeur 7 m et hauteur du BBSG 2 cm

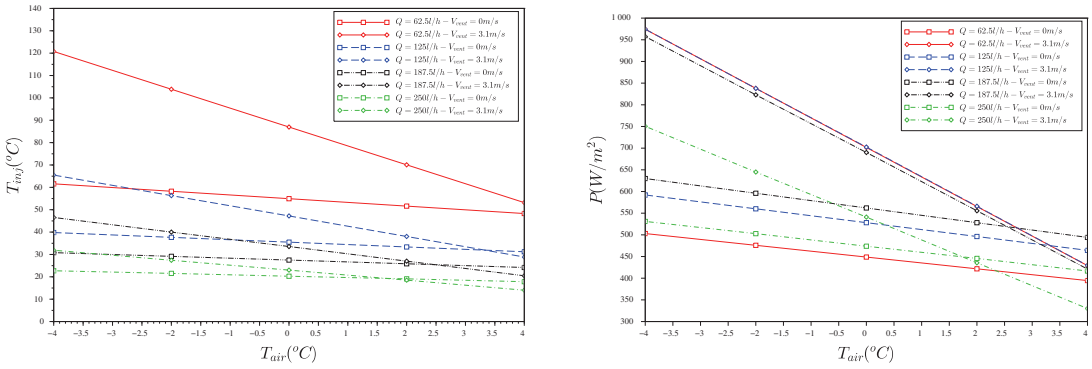
D'après les figures 5.32, 5.33 et 5.34 et en comparant avec les résultats des figures 5.26, 5.27 et 5.28, la température d'injection du fluide pour une largeur de chaussée de 7 m est trois fois plus grande que celle avec une largeur de 4 m. On remarque que plus la hauteur du BBSG diminue, plus la température d'injection augmente ce qui est également vrai pour une largeur de 4 m. Plus la largeur de la chaussée augmente plus la diminution de la température du fluide est importante (figure 5.36). Pour une largeur de 4 m, l'échange entre le fluide et la surface est plus efficace que l'échange entre la surface et l'environnement alors que pour une largeur de 7 m, l'échange entre la surface et l'environnement est plus importante que celui entre la surface et le fluide. Pour cette raison, il faut augmenter la température d'injection du fluide pour équilibrer cet échange.

L'analyse des figures 5.32 (b), 5.33 (b) et 5.34 (b) montre une cohérence avec les résultats de puissances déjà analysés. Comme conclusion, maintenir hors gel une chaussée de largeur 7 m n'est pas réaliste à cause des grandes puissances et des températures d'injections importantes.



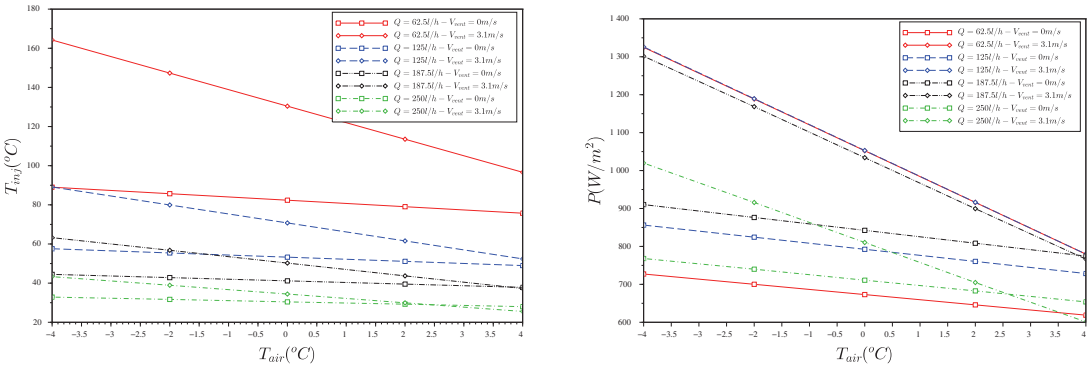
(a) Température d'injection **(b)** Puissance

Figure 5.32: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 7 m, hauteur de BBSG 2 cm et pour une intensité de neige de 1 mm/h



(a) Température d'injection **(b)** Puissance

Figure 5.33: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 7 m, hauteur de BBSG 2 cm et pour une intensité de neige de 2 mm/h



(a) Température d'injection **(b)** Puissance

Figure 5.34: Évolution de la température d'injection et de la puissance P pour une chaussée de largeur 7 m, hauteur de BBSG 2 cm et pour une intensité de neige de 3 mm/h

5.4.1.5 Profil de la température de surface

On s'intéresse ici à présenter l'évolution de la température de surface pour le cas extrême (V_{vent} = 3.1 m/s, T_{air} = −4 ^{o}C et e_1 = 6 cm) avec le débit, l'intensité de chute de la neige et la hauteur du BBSG pour les deux largeurs de chaussée 4 m et 7 m. Les résultats présentés dans les figures 5.35 et 5.36 sont cohérents avec ceux sans présence de neige (figures 5.18 et 5.19) en ce qui concerne l'influence du débit et de la largeur de la chaussée sur la température de surface et sur l'écart entre T_{surf}(x=0m) et T_{surf}(x=4m). On remarque pour le cas de la présence de neige que plus l'intensité augmente plus l'écart augmente. Cela est dû au fait que plus l'intensité augmente, plus l'eau injectée perd de l'énergie et plus il est difficile de maintenir la surface de la chaussée positive. Pour un débit de 62.5 l/h et V_{vent} de 3.1/s, l'écart pour i_{neige} = 3 mm/h est de 17 ^{o}C et 59 ^{o}C respectivement, ce qui est bien plus grand que 3.5 ^{o}C et 12 ^oC obtenus sans présence de la neige et pour e_1 = 6 cm pour L = 4 m et L = 7 m respectivement.

D'après ces résultats, on conclut à l'importance de déterminer les quantités énergétiques pour un cas réel avec la neige afin de bien estimer la quantité d'énergie de chauffage nécessaire. Dans ce but, on cherche à déterminer ces quantités de chauffage avec une étude dynamique des données de la DIR MC de la station de Saint-Flour.

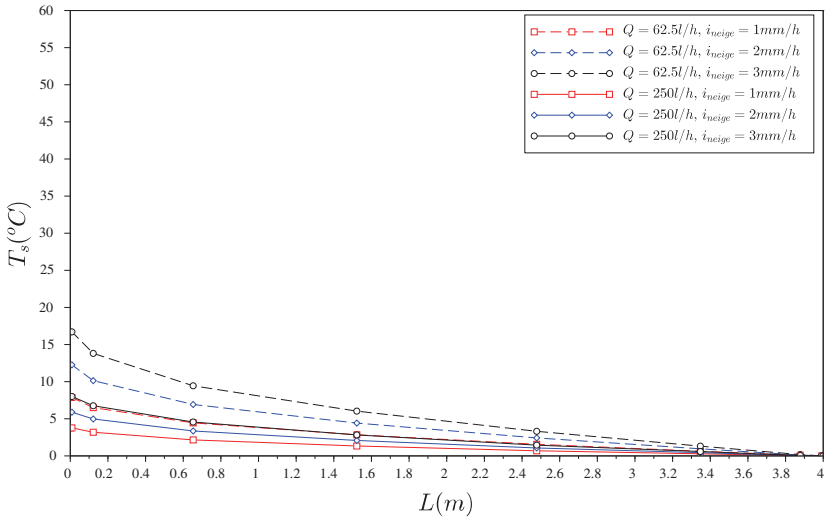


Figure 5.35: Évolution de la température de surface pour $T_{air} = -4\,^oC$, $V_{vent} = 3.1\,m/s$ et $L = 4\,m$ avec la présence de la neige

5.4.2 Cas dynamique

Dans cette section, nous utilisons les données météorologiques décrites dans la section 5.2.2. Ces données contiennent les intensités de précipitations et en particulier la neige. On fait l'étude énergétique par la simulation dynamique du modèle présenté dans le chapitre 3 (section 3.4.5.2, équation (3.50)). La condition limite en surface imposée est présentée dans l'équation (5.6). Dans notre étude, on ne prend pas en compte la présence de l'eau liquide en surface (écoulement de l'eau fondue et son évaporation). On a défini deux protocoles pour déterminer les quantités d'énergie de chauffage. Contrairement au cas stationnaire dans lequel on peut tester différentes températures d'injection indépendantes du temps, le cas dynamique doit prendre en compte à la fois la possibilité dans le temps d'injecter ou de ne pas injecter du fluide, et de faire varier la température d'injection. Dans la suite, la température d'injection sera constante dans le temps, afin de simplifier l'algorithme permettant de piloter le système. Seule la température d'injection est une variable dépendant du temps.

Le protocole 1 consiste à imposer au préalable une température d'injection : $T_{inj} = 15\,°C$. On emploie ensuite pour chaque temps discrétisé t_i une méthode de prédiction/correction :

1. on fait une simulation au temps t_{i+1} sans circulation de fluide ;
2. si la température de surface est supérieure à la température du point de rosée (cas d'absence de neige) ou si elle est positive (cas de présence de neige), on passe au temps t_{i+1} et on recommence à partir de 1. avec t_{i+1} à la place de t_i ;
3. si la température de surface n'est pas supérieure à la température du point de

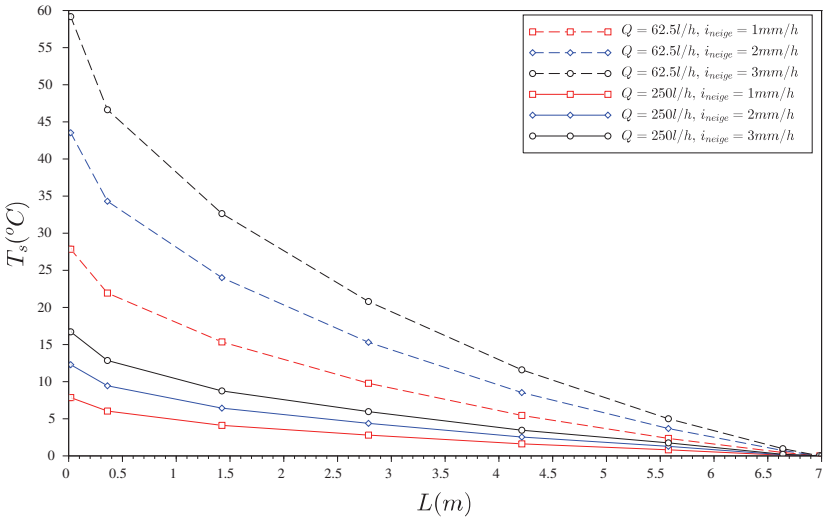


Figure 5.36: Évolution de la température de surface pour $T_{air} = -4\,^oC$, $V_{vent} = 3.1\,m/s$ et $L = 7\,m$ avec la présence de la neige

rosée ou si elle est négative, on simule au temps t_{i+1} avec circulation de fluide injecté à la température T_{inj} ;

4. si la température de surface n'est toujours pas supérieure à la température du point de rosée (cas d'absence de neige) ou si elle est négative (cas de présence de neige) en tout point, on simule entre t_{i-1} et t_{i+1} avec circulation de fluide injecté à la température T_{inj} ;
5. si la température de surface n'est toujours pas supérieure à la température du point de rosée (cas d'absence de neige) ou si elle est négative (cas de présence de neige) en tout point, on simule entre t_{i-2} et t_{i+1} avec circulation de fluide injecté à la température T_{inj} ;
6. on itère jusqu'à soit :
   - l'obtention de $k < i$ tel que la température de surface à t_{i+1} est supérieure à la température du point de rosée (cas d'absence de neige) ou positive (cas de présence de neige) en tout point après avoir simulé entre t_{i-k} et t_{i+1} avec circulation de fluide injecté à la température T_{inj}. Dans ce cas, on recommence à partir de 1. avec t_{i+1} à la place de t_i ;
   - l'inexistence d'un k défini précédemment. Dans ce cas on incrémente $T_{inj} = T_{inj} + 5$, et on recommence l'algorithme depuis le début (depuis t_o).

Le protocole 2 consiste à injecter tout le temps du fluide. Initialement, on injecte une température initiale $T_{inj-init} = 15\,°C$ si on n'arrive pas à maintenir la température de surface supérieure à la température du point de rosée (cas absence de neige) ou à maintenir la température de surface positive (cas présence de neige), on teste deux

températures d'injections $T_{inj} = 25$ et $30\,^{o}$C. On emploie ensuite pour chaque temps discrétisé t_i une méthode de prédiction/correction :

1. on simule au temps t_{i+1} avec une température d'injection initiale : $T_{inj-init} = 15\,°$C ;
2. si la température de surface est supérieure à la température du point de rosée (cas d'absence de neige) ou si elle est positive (cas de présence de neige), on passe au temps t_{i+1} et on recommence à partir de 1. avec t_{i+1} à la place de t_i ;
3. si la température de surface n'est pas supérieure à la température du point de rosée positive en tout point, on simule au temps t_{i+1} avec circulation de fluide injecté à la température T_{inj} ;
4. si la température de surface n'est toujours pas supérieure à la température du point de rosée (cas d'absence de neige) ou si elle est négative (cas de présence de neige) en tout point, on simule entre t_{i-1} et t_{i+1} avec circulation de fluide injecté à la température T_{inj} ;
5. si la température de surface n'est toujours pas supérieure à la température du point de rosée (cas d'absence de neige) ou si elle est (cas de présence de neige) en tout point, on simule entre t_{i-2} et t_{i+1} avec circulation de fluide injecté à la température T_{inj} ;
6. on itère jusqu'à soit :
   - l'obtention de $k < i$ tel que la température de surface à t_{i+1} est supérieure à la température du point de rosée (cas d'absence de neige) ou positive (cas de présence de neige) en tout point après avoir simulé entre t_{i-k} et t_{i+1} avec circulation de fluide injecté à la température T_{inj}. Dans ce cas, on recommence à partir de 1. avec t_{i+1} à la place de t_i ;

On obtient ainsi une température d'injection constante minimale et une loi de commande sur la circulation ou pas du fluide.

5.4.2.1 Résultats du protocole 1

D'aprés les résultats du cas dynamique en abscence de neige (section 5.3.3), on a conclu que notre système n'est pas capable de maintenir la température de surface positive au bout de 7 m avec une température d'injection inférieure à 60 ^{o}C. Pour cette raison, on s'intéresse aux énergies de chauffage pour une largeur L de 4 m. Les résultats énergétiques E_{hiver} et de puissance P_{hiver} pour la période hivernale pour une largeur de 4 m sont présentés dans le tableau 5.4.

La figure 5.37 montre que plus le débit augmente, plus l'énergie de chauffage augmente, alors que la hauteur de la couche du BBSG a une très faible influence sur l'énergie. L'énergie minimale vaut 41 kWh/m^2 pour $Q = 125$ l/h , $T_{inj} = 25\,^{o}$C et $e_1 = 2$ cm. Cette énergie minimale calculée en présence de la neige est trois fois plus grande que l'énergie minimale 150 kWh/m^2 pour $L = 4$ m en cas d'absence de la

neige (RT2012). Cela est dû à la contrainte de maintenir la température de surface de la chaussée positive avec les données du RT2012.

D'après la figure 5.38, on remarque que la puissance moyenne de chauffage nécessaire est élevée et atteint une valeur moyenne minimale de 600 W/m^2. On présente dans la figure 5.39 les puissances instantanées pour deux cas critiques correspondant à la puissance moyenne maximale (Q = 250 l/h, e_1 = 2 cm et T_{inj} = 30 ^{o}C) et la puissance moyenne minimale (Q = 125 l/h, e_1 = 6 cm et T_{inj} = 25 ^{o}C). La puissance instantanée maximale atteinte est de 1870 W/m^2 et la puissance minimale atteinte est 420 W/m^2.

La figure 5.40 présente la validation du protocole 1 défini pour maintenir la température de surface hors gel pour une largeur de chaussée de 4 m. On remarque qu'on arrive toujours à maintenir la température de surface supérieure à la température du point de rosée T_{rose}. La figure 5.41 montre qu'on arrive à maintenir la température de surface positive en cas de neige validant ainsi le protocole 1.

Q (l/h)	e_1 (cm)	T_{inj} (^{o}C)	$nb_{heure-inj}$ (h)	E_{hiver} (kWh/m^2)	$P_{moy-hiver}$ (W/m^2)	$P_{max-hiver}$ (W/m^2)
125	6	25	75	45	600	877
125	6	30	57	48	842	1059
125	2	25	55	41	745	935
125	2	30	51	46	902	1125
187.5	6	25	60	50	833	1100
187.5	6	30	41	48	1171	1541
187.5	2	25	40	44	1100	1451
187.5	2	30	39	48	1231	1544
250	6	25	39	45	1146	1581
250	6	30	37	52	1405	1864
250	2	25	39	46	1179	1581
250	2	30	36	52	1444	1870

Tableau 5.4: Quantités énergétiques de chauffage pendant l'hiver pour une largeur de chaussée de 4 m, avec le protocole 1

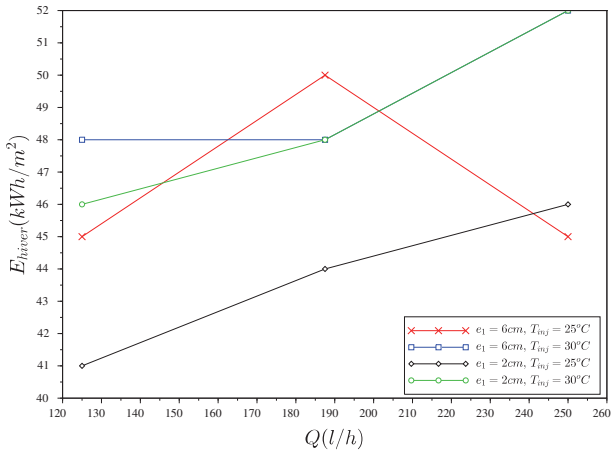


Figure 5.37: Quantités énergétiques de chauffage pour les 6 mois d'hiver pour une largeur de chaussée de 4 m d'après les données de la DIR MC, avec le protocole 1

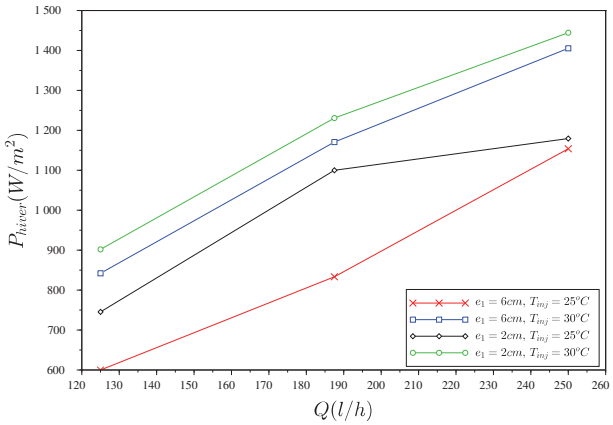


Figure 5.38: Puissances de chauffage pour les 6 mois d'hiver pour $L = 4$ m d'après les données de la DIR MC, avec le protocole 1

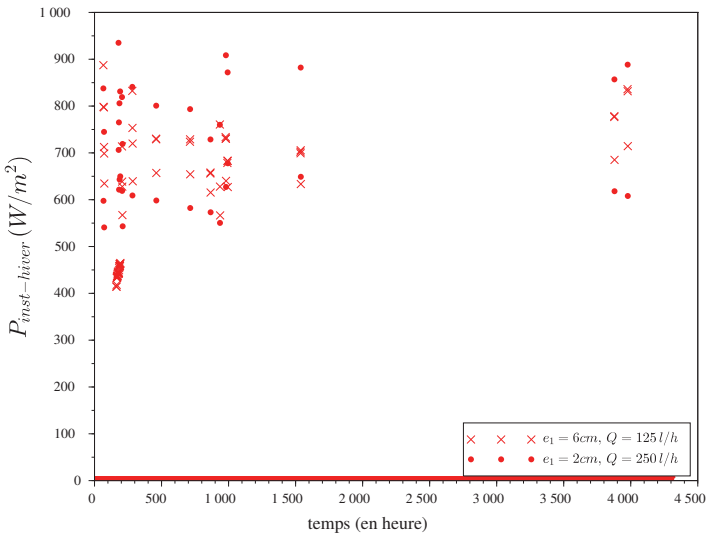


Figure 5.39: Puissances de chauffage instantanées pour les 6 mois d'hiver pour une largeur de chaussée de 4 m d'après les données de la DIR MC, avec le protocole 1

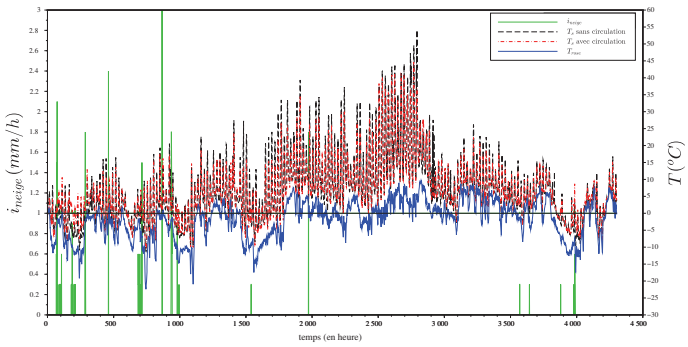


Figure 5.40: Températures de surface simulées pour x=4 m avec le protocole 1 et la température sans circulation du fluide

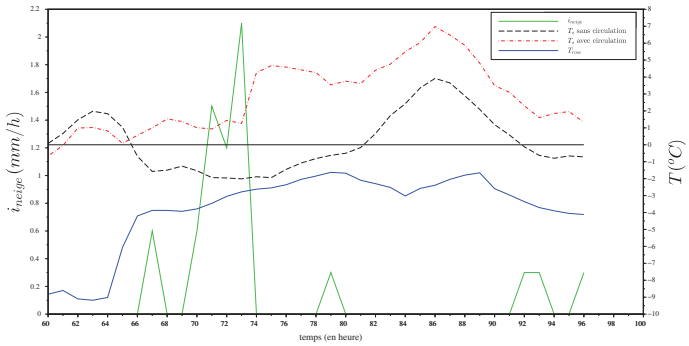


Figure 5.41: Zoom sur la comparaison entre la température de surface simulée pour x=4 m avec le protocole 1 et la température sans circulation du fluide

5.4.2.2 Résultats du protocole 2

Le protocole 2 consiste à faire circuler de l'eau tout le temps à une température d'injection minimale de 15 ^oC. En appliquant ce protocole, on remarque qu'on arrive à gagner de l'énergie dans le cas où il n'y a pas besoin de chauffer la chaussée. Par suite les quantités énergétiques et les puissances sont déterminées lors de la phase de besoin de chauffage ($T_{sor-f} < T_{inj}$).

Les résultats énergétiques E_{hiver} et de puissance $P_{moy-hiver}$ pour la période hivernale pour une largeur de 4 m sont présentés dans le tableau 5.5. La figure 5.42 montre que plus le débit augmente, plus la quantité d'énergie de chauffage augmente alors que la hauteur de la couche du BBSG a une très faible influence sur l'énergie. L'énergie minimale atteinte est de 423 kWh/m^2 pour Q de 250 l/h , T_{inj} = 25 ^{o}C et e_1 = 6cm. Cette énergie est 10 fois plus grande que l'énergie obtenue pour le potocole 1 (Q = 250 l/h , T_{inj} = 25 ^{o}C et e_1 = 6 cm). Ces résultats montrent que l'injection en continu du fluide augmente de façon très importante l'énergie de chauffage nécessaire pour maintenir hors gel la surface de la chaussée. Par contre, les résultats de puissance moyenne (figure 5.43) pour le protocole 2, montrent qu'on arrive à réduire 5 fois la puissance moyenne de chauffage par rapport à la puissance nécessaire avec le protocole 1 (figure 5.38) pour Q de 250 l/h , T_{inj} = 25 ^{o}C et e_1 = 6 cm. La puissance maximale atteinte pour ce protocole est de 163 W/m^2 qui est une valeur faible par rapport aux valeurs trouvées dans la littérature entre 160 et 1200 W/m^2 ([3, 21, 37, 38, 39]).

D'après le tableau 5.5, on remarque que pour un débit et une hauteur du BBSG définis, on trouve la même quantité énergétique et la même puissance moyenne (ne dépendent pas de la température d'injection 25 ^{o}C ou 30 ^{o}C). Ensuite, on présente dans le tableau 5.6, l'énergie récupérable. On remarque que cette énergie est très faible et atteint une valeur maximale de 1.9% de l'énergie de chauffage.

On présente sur la figure 5.44 la puissance instantanée de chauffage. Elle montre

que cette puissance instantanée atteint une fois la valeur maximale soit 1214 W/m^2 alors qu'elle atteint des valeurs modérées (160 et 1200 W/m^2)

Les figures 5.45 et 5.46 présentent la validation du protocole 2 défini pour maintenir hors gel la surface d'une chaussée de largeur 4 m. Les figures montrent qu'on arrive à maintenir la température de surface toujours supérieure à la température du point de rosée et positive en cas de présence de neige d'où la validation du protocole 2.

Les deux résultats des protocole 1 et 2 montre qu'il est important de définir une méthode de contrôle afin d'optimiser la puissance et l'énergie de chauffage.

Q (l/h)	e_1 (cm)	T_{inj} (^{o}C)	$nb_{heure-inj}$ (h)	E_{hiver} (kWh/m^2)	$P_{moy-hiver}$ (W/m^2)	$P_{max-hiver}$ (W/m^2)
125	6	25	3687	423	114	545
125	6	30	3687	424	114	771
125	2	25	3687	489	134	665
125	2	30	3687	489	134	859
187.5	6	25	3687	469	129	794
187.5	6	30	3687	469	129	1031
187.5	2	25	3687	547	151	897
187.5	2	30	3687	547	151	1134
250	6	25	3687	504	138	926
250	6	30	3687	504	138	1241
250	2	25	3687	591	163	864
250	2	30	3687	591	163	864

Tableau 5.5: Quantités énergétiques de chauffage pendant l'hiver pour une largeur de chaussée de 4 m, avec le protocole 2

Q (l/h)	e_1 (cm)	T_{inj} (°C)	$nb_{heure-inj}$ (h) à T_{inj}	$\%E_{hiver}$ (kWh/m^2) à T_{inj}
125	6	25	15	1.9
125	6	30	10	1.6
125	2	25	6	0.8
125	2	30	4	0.7
187.5	6	25	5	0.8
187.5	6	30	4	0.8
187.5	2	25	2	0.3
187.5	2	30	2	0.4
250	6	25	4	0.7
250	6	30	4	0.9
250	2	25	0	0
250	2	30	0	0

Tableau 5.6: Quantités énergétiques de chauffage pendant l'hiver pour une largeur de chaussée de 4 m, et ratio par rapport à l'énergie de chauffage, avec le protocole 2

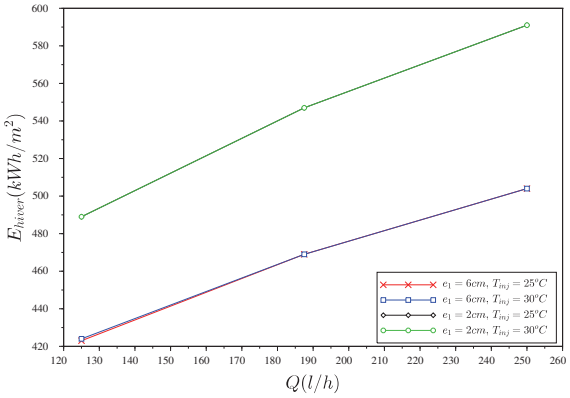


Figure 5.42: Quantités énergétiques de chauffage pour les 6 mois d'hiver pour une chaussée de largeur 4 m d'après les données de la DIR MC, avec le protocole 2

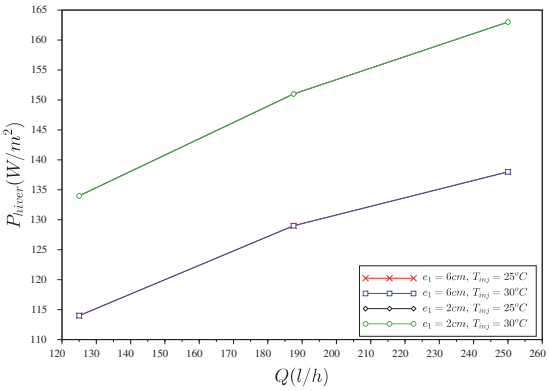


Figure 5.43: Puissances de chauffage pour les 6 mois d'hiver pour une chaussée de largeur de 4 m d'après les données de la DIR MC, avec le protocole 2

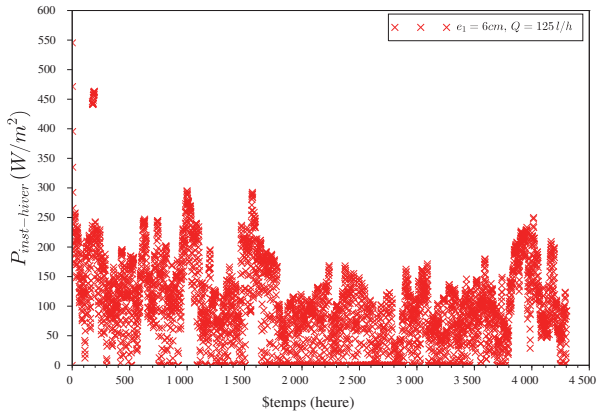


Figure 5.44: Puissances de chauffage instantanées pour les 6 mois d'hiver pour une chaussée de largeur 4 m d'après les données de la DIR MC, avec le protocole 2

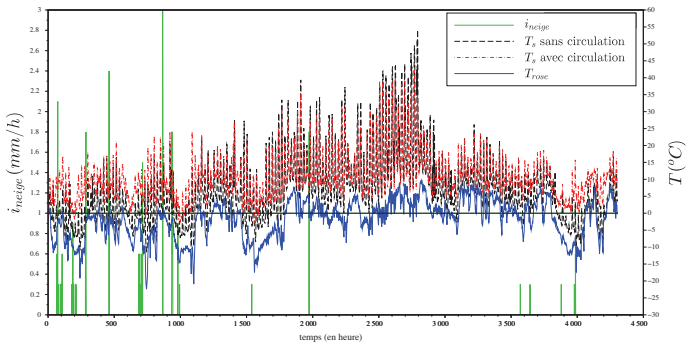


Figure 5.45: Comparaison entre la température de surface simulée pour une chaussée de largeur 4 m avec le protocole 2 et la température sans circulation du fluide

5.5 Récupération d'énergie en période chaude

Dans cette partie, on cherche à déterminer la quantité d'énergie récupérée pendant l'été à l'aide du système. On utilise les données météorologiques de la RT2012 pour les trois mois d'été (juin, juillet et aout). On utilise le modèle de simulation dynamique définie dans la sous section 3.4.5.2 (équation (3.50)) du chapitre 3 avec le jeu de paramètres identifiés dans le tableau 4.6.

5.5.1 Protocole

Dasns cette partir, on définit un protocole qui consiste à imposer une température d'injection : $T_{inj} = 10$ ou T_{eau} ^{o}C.

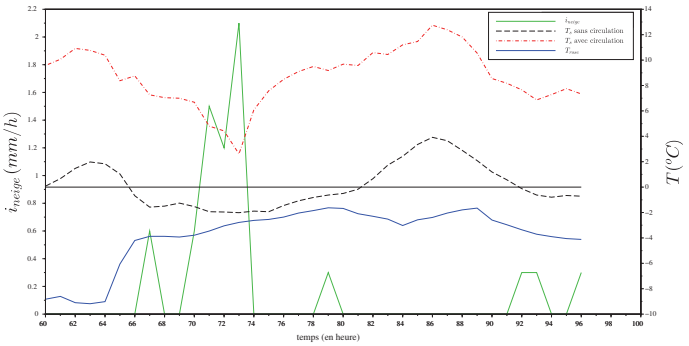


Figure 5.46: Zoom sur la comparaison entre la température de surface simulée pour une chaussée de largeur 4 m avec le protocole 2 et la température sans circulation du fluide

où T_{eau} est la température de l'eau du réseau ^{o}C.

On emploie ensuite pour chaque temps discrétisé t_i une méthode de prédiction/correction :

1. on simule au temps t_{i+1} avec circulation de fluide à T_{inj} ;
2. si la température de sortie du fluide est supérieure à la température d'injection, on passe au temps t_{i+1} et on recommence à partir de 1). avec t_{i+1} à la place de t_i avec une température d'injection T_{inj} ;
3. si la température de sortie du fluide n'est pas supérieure à la température d'injection, on simule au temps t_{i+1} sans circulation du fluide.

La quantité d'énergie récupérée est calculée sur la période où il y a circulation du fluide selon la formule :

$$E_{ete} = \frac{(\rho C_p)_l \, Q}{A} \sum_{i=1}^{nb_{heure-inj}} \left(T_{sor-f}\left(L, t_i\right) - T_{inj}\left(t_i\right)\right) pdt \tag{5.8}$$

où

pdt est le pas de temps qui est égal à 600 s ;

$A = L$ est la surface de la couche drainante (section longitudinale) par unité de longueur (m).

On étudie l'évolution de la quantité d'énergie récoltée en foncion du débit (62.5 l/h, 125 l/h, 187.5 l/h et 250 l/h), de la hauteur de couche de roulement e_1 (2 cm et 6 cm), de la largeur de chaussée L (4 m et 7 m) et de la température d'injection T_{inj} (10 ^{o}C et T_{eau} en figure 5.47).

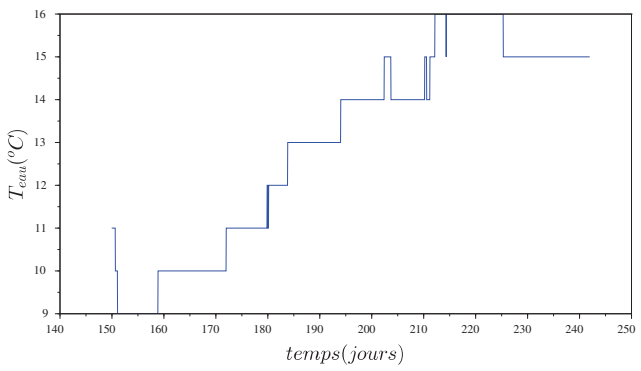


Figure 5.47: Température de l'eau du réseau pour les trois mois d'été d'après les données de la RT2012

5.5.2 Résultats

On présente les résultats issus de la simulation du modèle thermo-hydraulique 2D. On cherche à étudier l'influence des différents paramètres testés (Q, e_1, L et T_{inj}) sur l'énergie récupérée E_{ete}. On détermine le rendement r de ce système. Ce rendement est défini par :

$$r = \frac{E_{ete}}{E_{solaire}} \tag{5.9}$$

où

- E_{ete} est l'énergie recupérée pendant l'été (W/m^2) ;
- $E_{solaire}$ est l'énergie solaire reçue sur les trois mois d'été (W/m^2).

D'après les données de rayonnement global de la RT2012, l'énergie solaire $E_{solaire}$ reçue sur les trois mois étudiés est égale à 647 kWh/m^2, ce qui correspond à 40% de l'énergie solaire globale annuelle.

Les résultats énergétiques sont présentés dans les deux tableaux 5.7 et 5.8. et les figures 5.48 et 5.49. On constate que l'injection d'une température de 10 ^{o}C aboutit à des quantités énergétiques plus élevées. Par exemple pour un débit de 62.5 l/h, la température du réseau permet de récolter 293 kWh/m^2 ce qui est inférieur à l'énergie avec une température de 10 ^{o}C (339 kWh/m^2) pour une largeur L de 4 m et une épaisseur e_1 de 6 cm (tableau 5.7 et figure 5.48 (a)).

La température de l'eau du réseau pour les 3 mois d'été est supérieure à 10 ^{o}C (figure 5.47). Plus la température d'injection diminue plus il y a un échange d'énergie entre la chaussée et l'eau circulant, augmentant la quantité d'énergie récoltée pour Q, e_1

et L donnés. D'après la figure 5.48 (a), on remarque que pour un débit donné, plus e_1 diminue, plus l'énergie récupérée augmente. Par exemple pour un débit de $Q = 250\,\mathrm{l/h}$ et T_{eau} du réseau, le gain d'énergie est de $430\,\mathrm{kWh/m^2}$ pour une épaisseur de $e_1 = 6\,\mathrm{cm}$. Elle est inférieure à l'énergie obtenue pour une épaisseur de $e_1 = 2\,\mathrm{cm}$ ($524\,\mathrm{kWh/m^2}$).

Enfin, le débit a la plus grande influence sur le gain d'énergie d'après les résultats de la figure 5.48 (a). Pour $Q = 250\,\mathrm{l/h}$, $e_1 = 2\,\mathrm{cm}$ et $T_{inj} = 10\,^o\mathrm{C}$ on a le rendement le plus élevé parmi tous les cas testés pour une largeur de 4 m. Il atteint 82% d'après la figure 5.48 (a). Ce rendement trouvé par notre fonction d'échangeur thermique est beaucoup plus élevé que celui des systèmes qui utilisent des tubes incorporés dans la chaussée ($r = 30\%$ [5, 19, 75]) d'où l'efficacité d'application de ce nouveau système de récupération d'énergie.

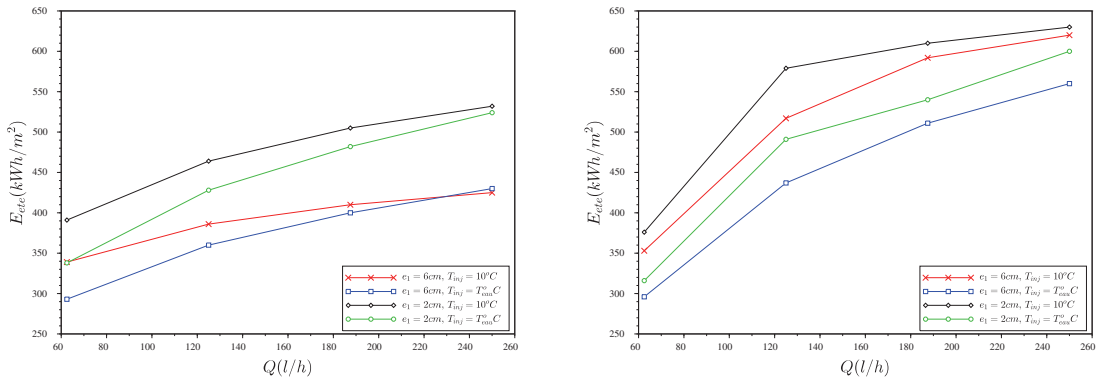
Les résultats de la figure 5.48 (a) pour une largeur de 4 m sont à peu près les mêmes que ceux obtenus pour une largeur de 7 m (figure 5.48 (b)). On remarque néanmoins une inversion entre le cas $e_1 = 6\,\mathrm{cm}$, $T_{inj} = 10\,^o\mathrm{C}$ et $e_1 = 2\,\mathrm{cm}$, $T_{inj} =_{eau}\ ^o\mathrm{C}$ pour $L = 4\,\mathrm{m}$ et $L = 7\,\mathrm{m}$ (inversion des courbes rouge et verte). La comparaison plus fine des quantités énergétiques et du rendement énergétique (figures 5.48 (a) et (b) et figures 5.49 (a) et (b)) montrent tout de même que plus la distance de circulation est grande, l'échange d'énergie augmente, plus le gain d'énergie et le rendement augmentent. Pour un débit de 250 l/h, une température d'injection T_{inj} de $10\,^o\mathrm{C}$ et une hauteur e_1 de 2 cm, on atteint un maximum de rendement de 97% pour une largeur de 7 m. Comme conclusion finale, afin d'avoir la meilleure performance du système, il faut augmenter le débit et minimiser la température d'injection et la hauteur de la couche de roulement.

Q (l/h)	e_1 (cm)	T_{inj} (^{o}C)	E_{ete} (kWh/m^2)	r(%)
62.5	6	10	339	52
62.5	6	T_{eau}	293	45
62.5	2	10	391	60
62.5	2	T_{eau}	338	52
125	6	10	386	60
125	6	T_{eau}	360	55
125	2	10	464	71
125	2	T_{eau}	428	66
187.5	6	10	410	63
187.5	6	T_{eau}	400	62
187.5	2	10	505	78
187.5	2	T_{eau}	482	74
250	6	10	425	66
250	6	T_{eau}	430	66
250	2	10	532	82
250	2	T_{eau}	524	81

Tableau 5.7: Rendement et quantités énergétiques récoltées pendant l'été pour une largeur de chaussée de 4 m

Q (l/h)	e_1 (cm)	T_{inj} (^{o}C)	E_{ete}(kWh/m^2)	r(%)
62.5	6	10	353	54
62.5	6	T_{eau}	296	46
62.5	2	10	376	58
62.5	2	T_{eau}	316	49
125	6	10	517	80
125	6	T_{eau}	437	67
125	2	10	579	89
125	2	T_{eau}	491	76
187.5	6	10	592	91
187.5	6	T_{eau}	511	79
187.5	2	10	610	94
187.5	2	T_{eau}	540	83
250	6	10	620	96
250	6	T_{eau}	560	89
250	2	10	630	97
250	2	T_{eau}	600	93

Tableau 5.8: Rendement et quantités énergétiques récoltées pendant l'été pour une largeur de chaussée de 7 m



(a) $L = 4\,\mathrm{m}$ **(b)** $L = 7\,\mathrm{m}$

Figure 5.48: Quantités énergétiques récoltées pendant l'été pour une largeur de chaussée de 4 et 7 m

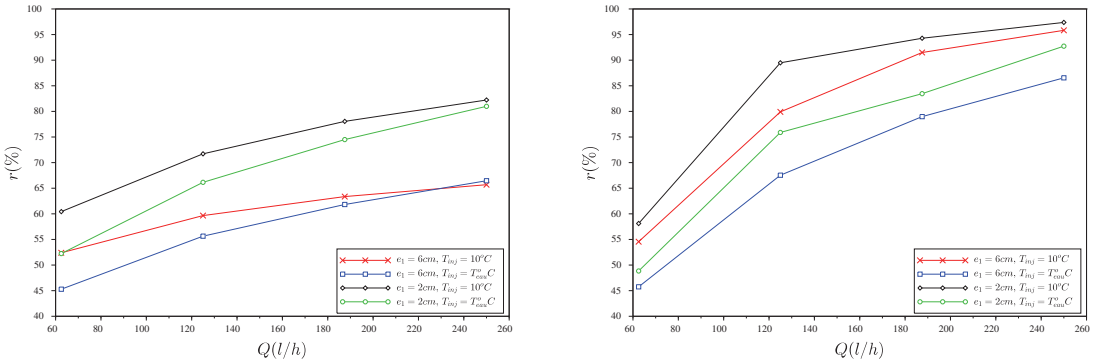
Dans la suite, on présente l'effet de la circulation du fluide sur la température de surface de la chaussée et le gain en température de sortie du fluide $T_{sor-f}(L,t) - T_{inj}$. La figure 5.50, présente l'évolution de la température de surface $T_s(x,0,t)$ pour différentes valeurs de débit (62.5 l/h et 250 l/h) et de e_1 (2 cm et 6 cm) pour une température d'injection de 10 ^{o}C pour 4 jours de la période d'été (30 juin au 4 juillet). On a choisi ces deux valeurs du débit pour montrer les deux cas extrêmes (débit fort et débit faible) et on a choisi cette période car la température de surface atteint des valeurs maximales de 58 ^{o}C. Pour $x = 0\,\mathrm{m}$ et pour e_1 donné la température de surface ne change pas avec le changement du débit et de la largeur L. Elle varie par contre avec la hauteur e_1 : plus e_1 diminue, plus la température de surface diminue car l'échange entre la surface et le fluide augmente. On arrive à réduire la température de surface pour $x = 0\,\mathrm{m}$ par rapport à celle sans circulation de fluide d'une valeur maximale de 23 ^{o}C pour $e_1 = 6\,\mathrm{cm}$ et de 35 ^{o}C pour $e_1 = 2\,\mathrm{cm}$ pendant la période d'ensoleillement maximale (milieu de journée).

Pour $x = 4\,\mathrm{m}$, on remarque que pour un débit faible, la température de surface s'approche de celle sans circulation du fluide. En revanche pour des débits élevés, la température de surface est plus petite que celle pour un débit faible car le temps d'échange est plus faible. Plus e_1 est faible, plus l'influence du circulation du fluide est importante.

Pour $L = 7\,\mathrm{m}$, la température de surface avec circulation est la même que sans circulation si le débit est faible, quelle que soit l'épaisseur e_1. Pour un débit plus important, on arrive encore à refroidir la surface.

D'après l'analyse des résultats, on peut conclure que :

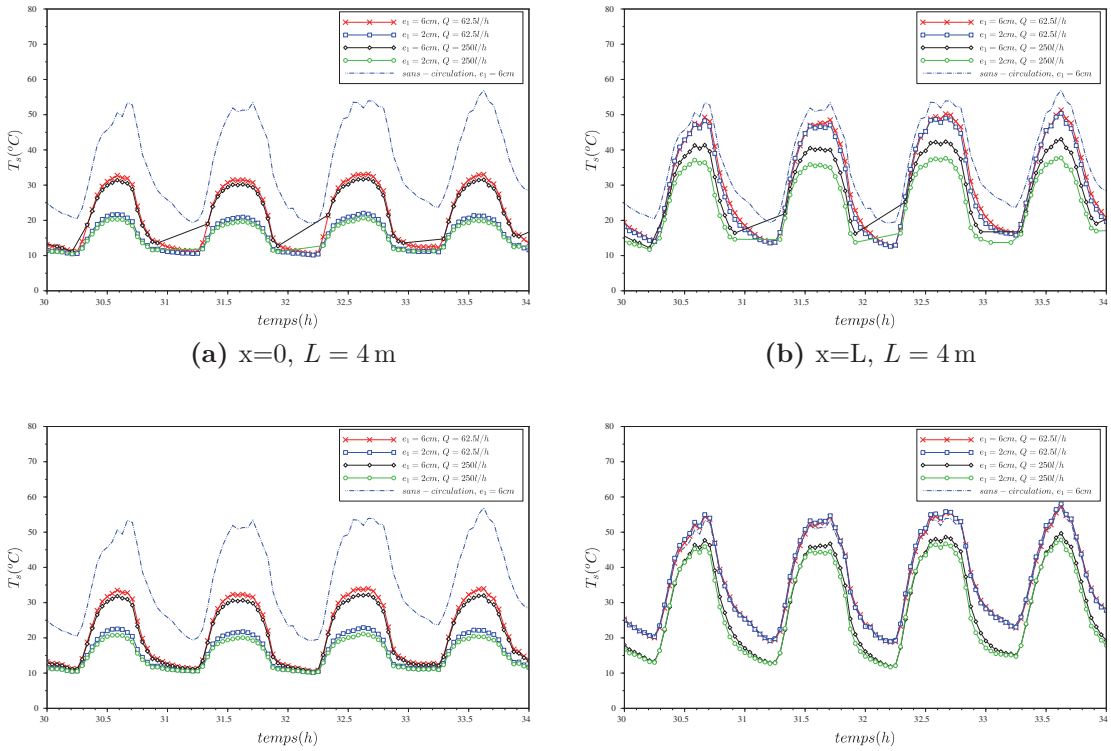
- la circulation du fluide permet de réduire la température de surface d'une façon significative ;



(a) $L = 4\,\mathrm{m}$ **(b)** $L = 7\,\mathrm{m}$

Figure 5.49: Rendement énergétique du système pendant l'été pour une largeur de chaussée de 4 et 7 m

- plus le débit et la largeur de la chaussée augmentent, plus le rendement r augmente ;
- plus la température d'injection est faible, plus le gain énergétique augmente ;
- plus la largeur de la chaussée augmente, plus la température de surface pour $x = L$ s'approche de celle sans circulation du fluide.

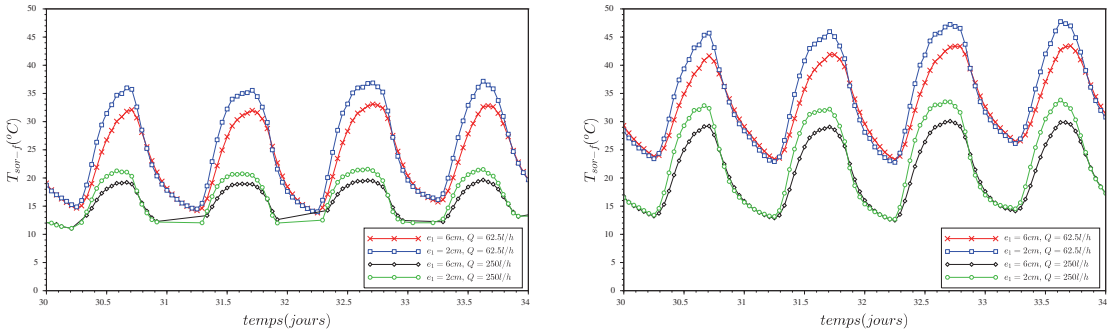


(a) x=0, $L = 4\,\mathrm{m}$ **(b)** x=L, $L = 4\,\mathrm{m}$

(c) x=0, $L = 7\,\mathrm{m}$ **(d)** x=L, $L = 7\,\mathrm{m}$

Figure 5.50: Évolution de la température de surface pour $T_{inj} = 10\,^oC$ avec la largeur de la chaussée L, le débit Q et la hauteur e_1

En ce qui concerne la température moyenne de sortie du fluide, on constate sur la figure 5.51, qu'un débit faible permet d'augmenter sensiblement la température de sortie (gain de 15 ^{o}C pour L=4 et 7 m). Pour un débit fixé, une épaisseur e_1 faible permet d'augmenter la température de sortie mais beaucoup moins qu'en faisant varier le débit. En effet, les gains sont de 5 ^{o}C au maximum.



(a) x=L, $L = 4$ m **(b)** x=L, $L = 7$ m

Figure 5.51: Évolution de la température moyenne de sortie du fluide pour $T_{inj} = 10\,^o$C avec la largeur de la chaussée L, le débit Q et la hauteur e_1

5.5.3 Rendement énergétique annuel

Après avoir évalué les quantités énergétiques récupérables pendant l'été et celles necessaires au chauffage en hiver, on présente les performances du système en calculant le rapport entre la quantité d'énergie récupérable (5.3.3 et 5.4.2) et celle de chauffage en dynamique. On présente le rendement minimal $R_{min}(\%)$ et maximal $R_{max}(\%)$ de ce système. Le rendement minimal est calculé par :

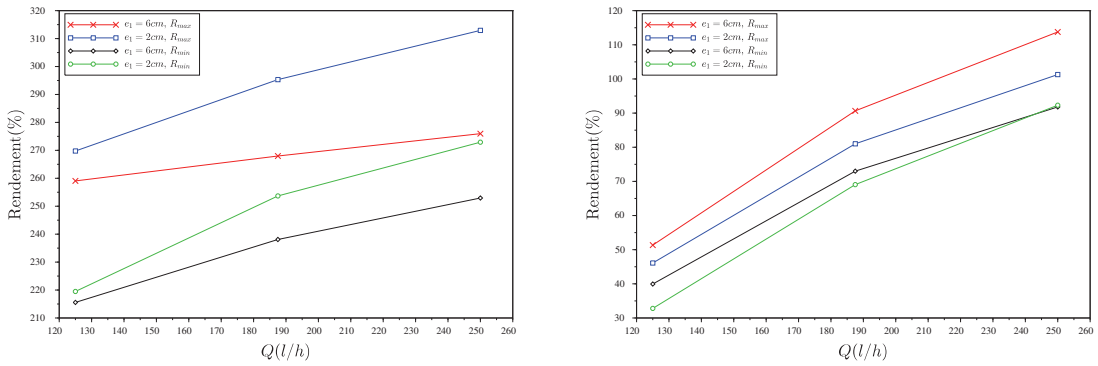
$$R^{p,L}_{min}(Q, e_1) = \frac{min_{T_{inj}} E_{ete}(Q, e_1, T_{inj})}{max_{T_{inj}} E_{hiver}(Q, e_1, T_{inj})}, \tag{5.10}$$

et le rendement maximal par :

$$R^{p,L}_{max}(Q, e_1) = \frac{max_{T_{inj}} E_{ete}(Q, e_1, T_{inj})}{min_{T_{inj}} E_{hiver}(Q, e_1, T_{inj})} \tag{5.11}$$

où p vaut 1 pour le protocole 1 et 2 pour le protocole 2.

Les figures 5.52 (a) et (b) présentent le rendement de ce système pour une largeur de chaussée de 4 m et 7 m pour les données de la RT2012 sans prendre en considération la présence de la neige. D'après la figure 5.52 (a) pour une largeur de 4 m, on remarque que, plus le débit augmente, plus le rendement du système augmente et plus la hauteur e_1 diminue, plus la perfomance de système augmente. Les rendements maximaux et minimaux du système atteignent les meilleurs performances (315% et 270%) pour Q de 250 l/h et e_1 de 2 cm. Ces rendements sont calculés sans présence de neige. Il s'ensuit que les quantités énergétiques hivernales sont sous estimées et les performances du système seront moins bonnes en présence de neige. La figure 5.52 (b) pour une largeur de 7 m montre que les quantités d'énergie de chauffage (sans prendre en compte la neige) sont beaucoup plus importantes que les quantités d'énergie récupérées. La meilleure performance énergétique atteint 115%, correspondant à un débit de 250 l/h et une épaisseur e_1 de 6 cm. A ce stade des travaux, on peut conclure que le système hydraulique étudié dans cette thèse serait plutôt à utiliser pour des largeurs de chaussée de 4 m.

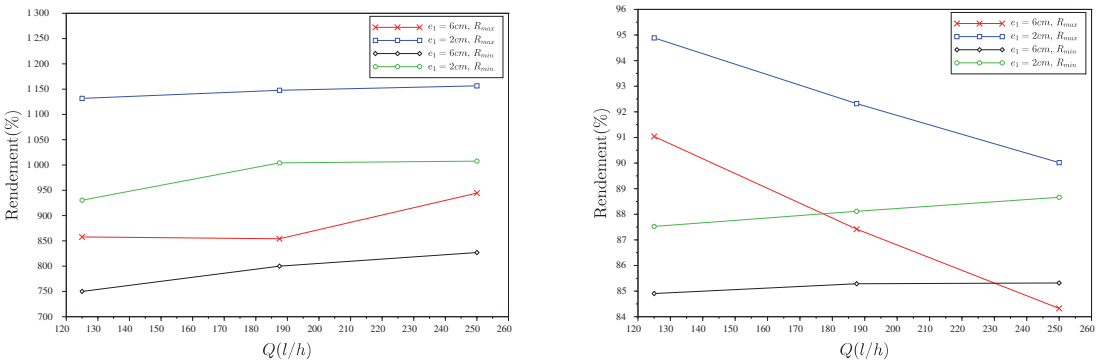


(a) $L = 4\,\mathrm{m}$ **(b)** $L = 7\,\mathrm{m}$

Figure 5.52: Rendement énergétique $R(\%)$ du système hydraulique pour les données de la RT2012, sans présence de neige

Les figures 5.53 (a) et (b) présentent le rendement de ce système pour une largeur de chaussée de 4 m pour les données de la DIR MC en prenant en considération la présence de neige. D'après la figure 5.53 (a), on remarque que plus le débit augmente, plus le rendement du système augmente et plus la hauteur e_1 diminue, plus les perfomances du système augmentent. Les rendements maximaux et minimaux du système atteignent les meilleures performances (1150% et 970%) pour Q de 250 l/h et e_1 de 2 cm. Ces performances sont meilleures que celles obtenus en utilisant les données de la RT2012 pour $L = 4\,\mathrm{m}$ bien qu'on injecte pour les deux la quantité du fluide dont on a besoin. Cela est dû au fait que pour la RT2012, on retient comme contrainte celle de maintenir la température de surface toujours positive alors que

pour les données de DIR MC on retient comme contrainte celle de maintenir la surface de la chaussée hors gel (T_{surf}(L=4m)>T_{rose} pour interdire le verglas ou fonte de la neige). Il nous semble donc que l'énergie de chauffage évaluée sur les données de la RT2012, est surestimée. La figure 5.53 (b) montre que la performance maximale est de 95% pour $Q = 250\,\mathrm{l/h}$. En comparant les résultats des deux figures 5.53 (a) et (b), on conclue que l'injection en continu du fluide diminue les performances du système en surestimant la quantité d'énergie de chauffage mais permet de diminuer la puissance de chauffage.



(a) Protocle 1 **(b)** Protocle 2

Figure 5.53: Rendement énergétique $R(\%)$ du système hydraulique pour les données de la DIR MC, pour une largeur de 4 m et en cas de préence de neige

Comme conclusion, il faut définir un protocole qui permette de maximiser le rendement énergétique en optimisant la puissance et l'énergie de chauffage.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié les quantités d'énergie récupérées pendant la période estivale en utilisant les données de la RT2012 pour une chaussée de largeur L de 4 m et 7 m. On a injecté une température de fluide aux alentours de 10 ^{o}C. On a remarqué que plus la largeur de la chaussée augmente plus la quantité d'énergie récoltée augmente et plus le rendement du système augmente. Pour un débit de 250 l/h le système atteint le rendement maximal de 315% pour $L = 4\,\mathrm{m}$ et 115% pour $L = 7\,\mathrm{m}$. Les performances de ce système sont meilleures que le système utilisant des tubes. Les résultats de notre système montrent qu'en injectant de l'eau à 10 ^{o}C, on diminue la température de surface à $x = 0\,\mathrm{m}$ de 23 ^{o}C pour $e_1 = 6\,\mathrm{cm}$ et 35 ^{o}C pour $e_1 = 2\,\mathrm{cm}$.

De plus, on a étudié l'influence des paramètres Q, e_1, L, V_{vent} et i_{neige} sur la température d'injection et les performances du système.

En outre, on a étudié les quantités d'énergie en jeu pendant la période hivernale sans présence de neige (données de la RT2012) et en présence de la neige (données de la DIR MC). En comparant les résultats en injectant du fluide quand on a besoin de la RT2012 avec celles de la DIR MC, on a remarqué que les quantités énergétiques dégagées de la RT2012 sont supérieures à celles de la DIR MC, bien que pour la DIR MC, on ait pris en considération l'existence de la neige. On peut déduire qu'imposer une condition de maintenir la température de surface de la chaussée positive est une condition très forte qui surestime les quantités énergétiques. Les valeurs énergétiques dégagées à l'aide de ce protocole sont faibles. Par contre les puissances sont assez importantes. Elles présentent un minimum de 650 W/m^2 et un maximum de 1300 W/m^2 en utilisant les données de la RT2012 et elles atteignent 600 W/m^2 comme minimum et 1450 W/m^2 comme maximum pour les données de la DIR MC. La comparaison entre le protocole 1 (injection quand on a besoin) et le protocole 2 (injection en continu) montrent qu'on arrive à minimiser la puissance de chauffage (valeur maximale de 113 W/m^2) avec le protocole 2.

Finalement, après l'étude du rendement global du système, on conclue qu'un débit de 250 l/h et une épaisseur e_1 de 2 cm permettent d'obtenir la meilleur performance du système. En plus, selon le protocole défini, les performances du système varient fortement allant de 215% comme valeur minimale pour le protocole 1 avec les données de la RT2012 et 751% avec les données de la DIR MC, et 85% comme valeur minimale pour le protocole 2 avec les données de la DIR MC.

6 Conclusion et perspectives

6.1 Conclusion

Dans ce travail, on a cherché à étudier numériquement et expérimentalement un nouveau système hydraulique de chauffage et de récupération d'énergie dans une chaussée sans recours à l'utilisation de tubes. Le principe de ce système consiste à faire circuler un fluide dans une couche drainante placée sous la couche de roulement. Pour cette raison, une chaussée en vraie grandeur (50m x 4m) a été instrumentée par le Cerema sur le site d'Égletons avec un dévers de 2%, cette chaussée n'étant pas soumise au trafic routier. Dans ce travail de thèse, a été étudiée la fonction d'échangeur thermique du dispositif. L'étude mécanique n'a pas été menée.

Premièrement, une étude bibliographique sur les systèmes de récuperation d'énergie et de chauffage pour les chaussées a été présentée, plus particulièrement les systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers. On a présenté les différentes composantes de ces systèmes, et les modèles d'échange d'énergie qui s'y rattachent.

L'étude des performances des systèmes hydrauliques bitumineux/cimentiers utilisant des tubes a montré que leur efficacité à récupérer l'énergie solaire est de 30%, alors qu'elle atteint des valeurs comprises entre 75% et 95% pour un système hydraulique à couche drainante.

Le travail présenté est un sujet innovant sur lequel les recherches, démarrées en 2013, étaient limitées à des études expérimentales à échelle de laboratoire. Dans le présent travail, des études expérimentales sur un démonstrateur à l'échelle 1 ont été entreprises. Par ailleurs, un modèle thermo-hydraulique a été développé et confronté aux mesures expérimentales. Il permet d'étudier en particulier l'influence des paramètres thermiques et hydrauliques sur la performance du système, et constitue une première brique de méthodes de dimensionnement opérationnelles.

Deuxièmement, le modèle de simulation thermo-hydraulique bidimensionnel est décrit après la présentation du principe d'écoulement et de transfert thermique dans un milieu poreux.

Puis, ce modèle a été utilisé en mode stationnaire afin d'étudier la sensibilité des paramètres thermiques et hydrauliques sur la température de surface pour la fonction de chauffage en période hivernale. Les résultats ont montré que la température de l'air T_{air} et le phénomène de convection en surface h_v sont les paramètres les plus influents sur cette température. Ces paramètres cependant sont des paramètres

environnementeux non contrôlables. La température d'injection du fluide T_{inj}, la conductivité hydraulique K, le dévers β et la capacité thermique volumique du fluide $(\rho C)_l$ sont des paramètres moins influents, mais contrôlables afin de maintenir la température de surface positive.

Troisièmement, un jeu de paramètres thermiques et de surface du modèle est identifié à partir d'un modèle thermique unidimensionnel, en utilisant les mesures issus du démonstrateur d'Égletons. Ce jeu de paramètres a permis de valider numériquement le modèle thermique avec une uncertitude de l'ordre de grandeur de l'erreur de mesure des capteurs.

Après validation du modèle thermique 1D, on a validé expérimentalement la loi hydraulique de Darcy. Les résultats pour un écoulement à surface libre et à saturation sur une maquette de laboratoire représentant la fonction d'échangeur a permis de valider l'utilisation de cette loi pour le modèle hydraulique.

À la fin du quatrième chapitre, on a cherché à valider le modèle thermo-hydraulique 2D sur 7 points de mesures de températires à partir des données expérimentales des mois de juillet 2015 et d'octobre 2015. L'analyse des résultats de mesure a montré que le système est capable de réduire la température de surface de la chaussée pendant la période estivale. Il permet également pendant la période hivernale de maintenir la température de surface positive pour des périodes de neige. Les mesures de débit sur la chaussée instrumentée, fluctuent au cours du temps et passent du simple au double. La cause de cette fluctuation importante n'a pas pu être identifiée, ce qui a entrainé des tests à différentes valeurs constantes de débit. Pour la simulation du modèle, on a utilisé le jeu de paramètres thermiques identifiés sur le modèle 1D, la loi de Darcy validée sur la maquette de laboratoire. La validation du modèle a été faite sur des périodes où la chaussée était sèche. Pour le mois d'été, un débit faible (proche de celui mesuré) a permis de rapprocher au mieux les températures simulées de celles mesurées sauf pour la température en aval. Pour le mois d'octobre, on a validé le modèle pour une période où la chaussée est sèche avec des écarts de l'ordre de grandeur de l'incertitude de mesure des capteurs. Pour les deux périodes de simulation (juillet et octobre), l'ajout d'un modèle du bac en aval a permis de valider une température du bac simulée par rapport à celle mesurée. Cette dernière vérification permet de donner du crédit à la température de sortie du fluide, essentielle pour évaluer les énergies récupérées en été ou nécessaires en hiver.

En dernière partie de la thèse, les quantités énergétiques et les puissances de chauffage sont calculées à partir du modèle thermo-hydraulique validé. Deux séries de données météorologiques ont été testées : celles issues de la RT21012 (sans présence de neige) et celles de la DIR MC (avec présence de neige). Pour les deux séries de données, on a obtenu une température d'injection minimale de 25 ^{o}C dans le cas le plus défavorable. La comparaison des résultats en utilisant les données de la DIR MC entre le protocole 1 (injection quand on a besoin) et le protocole 2 (injection tout le temps) a montré que l'on parvient à minimiser d'une façon efficace la puissance de chauffage par rapport à celle du protocole 1, au prix d'augmenter les énergies nécessaires. Il

paraît essentiel pour la suite des recherches de définir un protocole optimal, sous des contraintes de limitation de la puissance de chauffage par exemple.

Pour la période estivale, on a calculé les quantités énergétiques récupérées en utilisant les données de la RT2012 pour une chaussée de largeur L de 4 m et 7 m. On a injecté une température de fluide aux alentours de 10 ^{o}C. On a remarqué que plus la largeur de la chaussée augmente, plus la quantité d'énergie récoltée augmente, et plus l'efficacité du système à récupérer l'énergie solaire, augmente. Le performance de ce système est meilleure que le système de récolte d'énergie en utilisant des tubes ($r = 30\%$). Le système atteint le rendement maximal de 82% pour $L = 4$ m et 95% pour $L = 7$ m.

On a étudié aussi l'influence des paramètres Q, e_1, L, V_{vent} et i_{neige} sur la température d'injection et la performance de système. On peut énoncer, après l'avoir quantifié, que :

- plus le débit augmente, plus la température d'injection diminue ;
- plus la température extérieure diminue, plus la température d'injection augmente ;
- plus la vitesse du vent augmente, plus la température d'injection augmente ;
- plus la largeur de la chaussée L augmente, plus la température d'injection augmente ;
- plus l'intensité de la chute de neige augmente, plus la température d'injection augmente ;

Finalement, après étude du rendement global du système, exprimé par l'énergie récupérée rapportée à l'énergie de chauffage nécessaire, on conclue que plus la distance d'écoulement (L) augmente, plus le rendement global du système diminue, bien qu'une plus grande distance d'écoulement augmente la quantité d'énergie récupérée. De plus, selon le protocole de chauffage utilisé, la performance du système varie fortement d'où l'importance de définir un protocole optimal permettant de minimiser les énergies sous des contraintes de puissances de chauffage limites.

6.2 Perspectives

Les travaux effectués durant de cette thèse permettent de proposer de nouvelles perspectives de recherche. Ces perspectives sont de trois ordres :

- poursuivre le développement du modèle de simulation,

- déterminer de manière optimale les quantités énergétiques et les puissances, en prenant en compte le stockage,
- étudier les aspects mécaniques de la structure de chaussée dont une des couches est soumise à une circulation fluide.

6.2.1 Sur le développement du modèle de simulation

Dans notre travail, on a développé un modèle de simulation avec des hypothèses simplificatrices. Il serait intéressant de développer un modèle plus complexe dans lequel on prendrait en considération la transformation de l'eau liquide en vapeur lorsqu'elle circule dans la couche drainante pendant la période estivale. On pourrait aussi chercher à considérer la charge hydraulique comme inconnue et la résoudre à partir de l'ajout de l'équation de conservation de la masse d'eau :

$$div\,\mathbf{V} = 0.$$

On peut aussi enrichir le modèle en prenant en compte au niveau de la surface de la chaussée, le phénomène d'évaporisation de l'eau liquide en cas de pluie ou de fonte de la neige, et l'écoulement de l'eau liquide.

6.2.2 Sur la détermination des quantités énergétiques et des puissances et la méthode de stockage

Dans notre travail, on a déterminé des quantités énergétiques de chauffage et de puissance en utilisant deux protocles. On a observé de grands écarts entre les résultats de ces deux protocoles. Il serait intéressant d'identifier une loi de commande optimale contrôlant la circulation du fluide et la température d'injection. Par la suite, il faut écrire le problème de contrôle optimal associé et le résoudre numériquement. Ces résultats permettraient de dégager des quantités énergétiques optimales pouvant être récupérées en été et celles dont a besoin la chaussée en hiver pour sa mise hors gel. Ces quantités énergétiques seraient mises en regard comme nous l'avons fait, mais sans garantie del'optimalité, et une évaluation plus fine du rendement du dispositif de récupération d'énergie pour une mise hors-gel pourrait être menée. Ceci permettrait de fournir le prédimensionnement d'une stockage d'énergie par géothermie pour relier les deux régimes (réchauffement du fluide et réchauffement de la chaussée). Un tel stockage est prévu sur le site expérimental d'Égletons en 2017.

6.2.3 Sur l'aspect mécanique de la structure de chaussée

La circulation de l'eau dans la chaussée à travers les pores de la couche d'enrobé drainant peut avoir des incidences sur la durée de vie de cet enrobé, sur la cohésion

entre les grains de cette couche, d'où le besoin d'utiliser un liant spécifique résistant à l'eau. Il faudrait définir des protocoles expérimentaux à mener sur des planches de laboratoire de la structure. On s'intéresserait en particulier aux essais d'orniérage et de fatigue grâce aux moyens d'essais FABAC [122] par exemple.

7 Glossaire

a est la diffusivité thermique (m^2/s) ;

A est la surface (m^2) ;

alt_{corr} est le coefficient de correction d'altitude (-) ;

A_{ls} est la surface de l'interface l-s (fluide-solide) (m^2) ;

A_v est l'aire occupée par les vides (m^2) ;

b est le coefficient de réflexion caractéristique de la surface (-) ;

C_d et C_{d_1} sont deux coefficients de convection (-) ;

Cp_a est la capacité thermique de l'air (J/kg.K) ;

D est le diamètre (m) ;

d^q est la direction de descente (-) ;

e est l'indice des vides (-) ;

e_i est l'épaisseur de la couche i (m) ;

$E(/)$ est l'écart type (-) ;

E est l'erreur quadratique (^{o}C) ;

$ecart_{T_b}$ est l'écart moyen entre la température du bac mesurée et simulée (^{o}C) ;

E_{hiver} est l'énergie de chauffage ($\mathrm{kWh/m^2}$) ;

E_{ete} est l'énergie recupérée pendant l'été ($\mathrm{W/m^2}$) ;

$E_{solaire}$ est l'énergie solaire reçue sur les trois mois d'été ($\mathrm{W/m^2}$) ;

g est l'accélération de la pesanteur ($\mathrm{m/s^2}$) ;

H_M est la charge hydraulique au point M (m) ;

h est la hauteur de la chaussée (m) ;

H est la charge hydraulique (m) ;

h_v est le coefficient d'échange convectif en surface ($\mathrm{W/m^2K}$) ;

H_v est le flux d'échange convectif en surface ($\mathrm{W/m^2}$) ;

h_e est le niveau du fluide (m) ;

i est le gradient hydraulique (-) ;

i_{neige} est l'intensité de chute de neige (mm/h) ;

$J(p)$ est la fonctionnelle quadratique (-) ;

$\mathbf{J_T}$ est le flux de la chaleur sensible (W/m^2) ;

$\mathbf{J_D}$ est le transfert de chaleur par conduction ou diffusion (W/m^2) ;

$\mathbf{J_v}$ est le transfert de chaleur par convection (W/m^2) ;

k_{int} est La perméabilité intrinsèque (m^2) ;

kr est la perméabilité relative d'un fluide (-) ;

K est la conductivité hydraulique (m/s) ;

K_s est la conductivité hydraulique à saturation (m/s) ;

$\mathbf{K^{-1}}$ est le tenseur de perméabilité (-) ;

l_λ est la longueur d'onde (m) ;

L la largeur de la chaussée (m) ;

L_f est la chaleur latente de fusion de la glace est égale à 333.5 J/Kg ;

N_u est le nombre de Nusselt (-) ;

n_{ls} est le vecteur normal unitaire dirigé de la phase l vers la phase s ;

n_{pdt} est le nombre de pas de temps (-) ;

$nb_{heure-inj}$ est le nombre d'heures d'injection du fluide (h) ;

$\mathbf{n_{sl}}$ est le vecteur normal unitaire dirigé de la phase-s vers la phase l ;

nc est le nombre de capteurs de mesure de température (-) ;

p_l est la pression du fluide (Pa) ;

pdt est le pas de temps (s) ;

$pmail$ est le nombre de points de maillage (-) ;

p^q est le paramètre estimé à l'itération q (-) ;

p est le vecteur paramètre à optimiser (-) ;

pdt est le pas de temps (s) ;

P est la puissance instantannée (W/m^2) ;

$P_{moy-hiver}$ est la puissance moyenne de chauffage (W/m^2) ;

$P_{max-hiver}$ est la puissance maximale de chauffage (W/m^2) ;

q_c est le flux de chaleur par convection (W/m^2) ;

q_s est le rayonnment absorbé par la surface de la chaussée (W/m^2) ;

$\mathbf{q}$ le flux de chaleur par conduction (W/m^2) ;

q_i est est le rayonnment solaire incident (W/m^2) ;

q_r est le rayonnement émis par une surface (W/m^2) ;

R_{atm} est le rayonnment infrarouge absorbé de l'atmosphère (W/m^2) ;

Q est le débit (m^3/s) ;

Q_{fusion} est la puissance à fournir pour fondre la neige (W/m^2) ;

Re est le nombre de Reynolds (-) ;

R_g est le rayonnement global (W/m^2) ;

R_{atm} est le rayonnement atmosphérique (W/m^2) ;

R_{surf} est le rayonnement émis par la surface (W/m^2) ;

R_{atm} est le rayonnement atmosphérique incident (W/m^2) ;

R_g est le rayonnement global incident (W/m^2) ;

R_g^r est le rayonnement global réfléchi (W/m^2) ;

R_{dirN} est le rayonnement direct normal au rayonnement solaire (W/m^2) ;

R_{diff} est le rayonnement diffus horizontal (W/m^2) ;

r est le rendement du système à récupérer de l'énergie solaire (-) ;

R_{min} est le rendement annuel minimal (-) ;

R_{max} est le rendement annuel maximal (-) ;

S est la saturation (m^3/m^3) ;

S_i est l'indice de sensibilité (-) ;

T_s est la température de surface (^{o}C) ;

T_m est la moyenne entre la température de surface de la chaussée et la température de l'air (^{o}C) ;

T_{ciel} est la température du ciel (^{o}C) ;

T_{rose} est la température du rosée ou point de rosée (^{o}C) ;

T_{ch} est la température de la chaussée (^{o}C) ;

T_l est la température de l'eau circulant dans le tube (^{o}C) ;

T est la température (^{o}C) ;

T_f ou T_{inj} est la température d'injection du fluide (^{o}C) ;

T_{moy} est la température moyenne (^{o}C) ;

T_{air} est la temppérature de l'air (^{o}C) ;

T_p est la période (s) ;

T_{sim} est la température simulée (^{o}C) ;

T_{mes} est la température mesurée (^{o}C) ;

T_b est la température du bac (^{o}C) ;

T_{eau} est la température de l'eau du réseau (^{0}C) ;

$\langle T_l \rangle^l$ est la température moyenne intrinsèque dans la phase liquide l (^{o}C) ;

$\tilde{T_l}$ est la déviation spatiale de la température dans la phase liquide l (^{o}C) ;

$\langle T_{ch} \rangle^s$ est la température moyenne intrinsèque dans la phase-s (^{o}C) ;

$\tilde{T_{ch}}$ est la déviation spatiale de la température dans la phase solide s (^{o}C) ;

$\bar{T}$ est la température complexe vérifiant $Re\left(\bar{T}\right) = T$ (^{o}C) ;

U_M est la pression de l'eau en M, appelée pression interstitielle (m/s) ;

V est la vitesse de circulation de leau (m/s) ;

V_{vent} est la vitesse du vent (m/s) ;

v_v est le volume des vides (m^3)

v_g est le volume des grains (m^3)

v_t est le volume total du milieu (m^3) ;

V_m est la vitesse moyenne (m/s) ;

v est le volume total (m^3) ;

v_l est le volume de la phase liquide (m^3) ;

v_l est le volume de la phase l (m^3) ;

v_s est le volume de la phase solide s (m^3) ;

V_M est la vitesse de l'eau au point M (m/s) ;

Var est la variance (-) ;

$\mathbf{V_l}$ est la vitesse du fluide à l'échelle microscopique (m/s) ;

$\langle V_s \rangle^s$ est la vitesse moyenne intrinsèque dans la phase solide s (m/s) ;

$\langle \mathbf{V_l} \rangle^l$ est la vitesse moyenne intrinsèque dans la phase liquide l (m/s) ;

$\tilde{V_s}$ est la déviation spatiale de la vitesse dans la phase solide s (m/s) ;

$\tilde{\mathbf{V_l}}$ est la déviation spatiale de la vitesse dans la phase liquide l (m/s) ;

z_M est l'altitude du point M par rapport à un plan de référence arbitraire (m) ;

λ_s est la conductivité thermique de la chaussée ou la phase solide (W/m.K) ;

λ_l est la conductivité thermique de la phase liquide (W/m.K) ;

λ_{eau} est la conductivité thermique de l'eau (W/m.k) ;

ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau (kg/m^3) ;

ρ_a est la masse volumique de l'air (kg/m^3) ;

ρ_l est la masse volumique du fluide (kg/m^3) ;

ρ_s est la masse volumique du solide (kg/m^3) ;

$(\rho Cp)_l$ est la capacité thermique volumique du fluide (J/m^{3}K) ;

$(\rho Cp)_s$ est la capacité thermique volumique de la chaussée (J/m^{3}K) ;

$\nabla \mathbf{T}$ est le gradient de température (K/m) ;

α est l'albédo (-) ;

$\varepsilon_{l\lambda}$ est le coefficient d'émissivité spectral (-) ;

ε est l'émissivité de la surface de la chaussée $(-)$;

ϕ_l est la fraction volumique de la phase liquide l (-) ;

ϕ_s est la fraction volumique de la phase solide s ;

σ est la constante de Stefan-Boltzmann égale à 5.67×10^8 (W/m^{2}K4);

ϕ est la porosité (-) ;

μ_l est la viscosité dynamique du fluide (kg/m.s) ;

δ_{Ti} est la densité de chaleur interstitielle (J/m^3) ;

$\langle\ \rangle$ moyenne superficielle (-) ;

$\langle\ \rangle^l$ est l'opérateur de la moyenne intrinsèque de la phase l (-) ;

$\langle\ \rangle^s$ est l'opérateur de la moyenne intrinsèque de la phase s (-) ;

$\langle\ \rangle^s$ moyenne intrinsèque de la phase s (-) ;

γ_l est le poids spécifique de l'eau (N/m^3) ;

$\triangle H$ est la charge hydraulique (m) ;

$\triangle L$ est la longueur de l'écoulement (m) ;

β est le dévers de la chaussée (-) ;

ω est la pulsation (rad/s) ;

δ_q est la profondeur de descente (-) ;

θ est la teneur en eau (-) ;

θ_r est la teneur en eau résiduelle (-) ;

θ_s est la teneur en eau à saturation (-) ;

8 Annexe A

Catalogue de poste	FICHE PRODUIT
CE 19	EB 10 roulement / liaison 35/50
	BBSG 3 0/10 F2
	NF EN 13108-1 — Code : 21

DOSSIER n°	ETUDE				
	NIVEAU	DATE	VALIDITE	LABO.	Référence
13 LIM 0008/14	2	septembre-11	septembre-16	EUROVIA DTSO	11BDX0298-001

FORMULATION		% INTERIEUR	% EXTERIEUR	% PUPITRE	Origine des échantillons
6/10	LAPLEAU	34,8%	36,5%	34,1%	Moyenne livraison 2012
4/6	LAPLEAU	14,0%	14,7%	14,0%	Moyenne livraison 2012
0/4	LAPLEAU	23,0%	24,1%	24,0%	Moyenne livraison 2012
Agrégats	AE 0/10 stock "D" Print. 2012	20,0%	21,0%	20,0%	FTAE 12 LIM 002 P19
Filler d'apport		3,5%	3,7%	2,5%	
Fines d'attrition					
Liant	35/50	4,7%	4,9		
Liant issu des AE	*3,47%*	*0,7%*	(en ppc)		
Liant total		5,4%		5,4%	
Ajout					

MVRG (NF EN 1097-6 et 7) :	2639	Kg/m3
MVRE (NF EN 12697-5) :	2434	Kg/m3
Module de richesse :	3,42	
Surface Spécifique :	12,56	m²/kg
TL min :	5,2	%

	AE	AJOUT	TOTAL	
PENE:	18	42	38	1/10mm
TBA:	67,3	53,4	55,2	°C

Température du mélange : 150 à 170 °C °C

Température max. du mélange : 190 °C

TAMIS	6/10	4/6	0/4	Agrégats	Filler d'apport	MELANGE	ETUDE
20	100	100	100	100	100	100,0	100,0
16	100	100	100	100	100	100,0	100,0
14	100	100	100	100	100	100,0	100,0
12,5	100	100	100	100	100	100,0	100,0
10	88	100	100	94,6	100	94,5	94,5
8	47	100	100	81,4	100	76,7	76,7
6,3	14	91	100	67,6	100	60,5	60,3
4	3	15	97	46,5	100	40,1	41,1
2	2,3	3,3	67	31,0	100	27,7	27,7
1	1,9	2,4	46	21,6	100	20,4	19,7
0,5	1,8	2,1	32	15,9	98	15,6	14,9
0,315	1,7	1,9	25	12,9	96	13,2	12,5
0,250	1,7	1,9	22	11,7	94	12,1	11,8
0,125	1,5	1,7	15	8,6	88	9,5	9,5
0,08	1,3	1,5	11,3	7,0	83,3	8,0	7,9
0,063	1,0	1,3	10,0	6,4	80,2	7,3	7,3
	2,68	2,68	2,63	2,57	2,72	2,639	

Courbe granulométrique du mélange

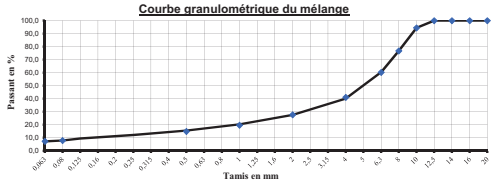


Figure 8.1: Fiche caractéristique de la couche BBSG

EUROVIA VINCI	**Fiche produit**	**Norme**	NF EN 13108-7
	Enrobé hydrocarboné à chaud	**Date étude / validité**	OCT. 2013 / OCT. 2013
	EB14 Roulement 35/50	**Code laboratoire**	EUROVIA
		Référence	
Code centrale	**BBDR 0/14**	**Niveau**	0

Objet	**CHANTIER TEST - CETE CLERMONT**	**Origine des échantillons**	Contrôle Stocks chantier

Formulation

Constituants		% intérieurs	% pupitre
	10/14 CLAIRAVAUX	**47.1%**	
	6/10 CLAIRAVAUX	**32.0%**	
	0/2 CLAIRAVAUX	**14.0%**	
Filler d'apport :	**Filler d'apport**	**2.0%**	
Ajout :			
AE :			
Liant d'apport :	**35/50**	**4.9%**	
Liant total :	***Apport***	**4.9%**	
Additif :			

Caractéristiques de la formule

Nature des granulats :		
MVRG (NF EN 1097-6 et 7) :	2.695	Mg/m^3
MVRE (NF EN 12697-5) volumétrique:		Mg/m^3
MVRE (NF EN 12697-5) calculée :	2.497	Mg/m^3
Module de richesse :	3.59	-
Surface Spécifique :	6.52	m^2/kg
TL min (corrigée par alpha) :	#VALEUR!	%

Caractéristiques des AE

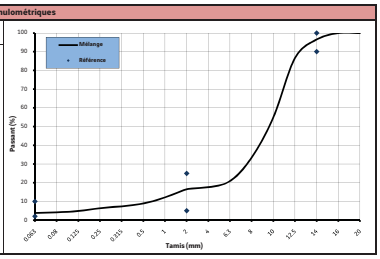
Teneur en liant des AE		%s

Liant du mélange - Caractéristiques et répartitions

	Liant des AE	Liant d'apport	Mélange
Pénétrabilité ($^{1/10}$ mm)		35 - 50	
TBA (°C)		50 - 58	
Répartition (%)		100	

Courbes granulométriques

Tamis	10/14	6/10	0/2	Filler d'apport	Mélange	Courbe étude
20	100.0	100.0	100.0	100.0	**100.0**	
16	100.0	100.0	100.0	100.0	**100.0**	
14	93.0	100.0	100.0	100.0	**96.5**	**90-100**
12.5	73.0	100.0	100.0	100.0	**86.6**	
10	15.0	91.0	100.0	100.0	**54.8**	
8	3.0	45.0	100.0	100.0	**33.4**	
6.3	2.0	9.0	100.0	100.0	**20.8**	
4	1.0	1.0	100.0	100.0	**17.6**	
2	0.8	0.9	93.0	100.0	**16.5**	**5-25**
1	0.6	0.7	64.0	100.0	**12.0**	
0.5	0.6	0.7	43.0	98.0	**8.9**	
0.315	0.5	0.6	33.0	96.0	**7.3**	
0.25	0.5	0.6	27.0	94.0	**6.4**	
0.125	0.4	0.5	18.0	88.0	**4.9**	
0.08	0.4	0.5	14.0	83.3	**4.2**	
0.063	0.4	0.4	12.2	80.2	**3.8**	**2-10**
MVRG	2.69	2.69	2.72	2.72	**2.70**	



Caractéristiques mesurées

Essai PCG (NF EN 12697-31)		
Girations	% de vides	Spécif.
K		
10		
20		
25		
30		
40		
50		
60		
80		
100		
120		
150		
200		

Sensibilité à l'eau - Duriez (NF EN 12697-12-Méthode B)		Spécif. norme	Spécif. produit
MVA (Mg/m^3)			
Vides (%)			
C_0 à 18°C (kPa)			
C_W à 18°C (kPa)			
i/C			

Sensibilité à l'eau - ITSR (NF EN 12697-12-Méthode A)		Spécif. norme	Spécif. produit
MVA (Mg/m^3)			
Vides (%)			
ITS_0 (kPa)			
ITS_W (kPa)			
ITSR			

Module de rigidité (NF EN 12697-26)	ITCY 15°C 124 ms	ITCY 10°C 124 ms	DTCY 15°C 0.02 s	Spécif. Norme	Spécif. Produit
E (Mpa)					
Vides (%)					

Résistance à l'orniérage / Stabilité mécanique (NF EN 12697-22)

T° essai :	Epaisseur :			Vides (%)		
Nb de cycles	100	300	1000	3000	10000	30000	100000
Orniérage (%)							
Spécif. norme							
Spécif. CCTP	≤ 3,5% à 30000 cycles - 5 à 8% de vides						

Résistance à la fatigue (NF EN 12697-24)

	Déformation relative ⌀6	Spécif. norme	Spécif. produit
ε6 (µdef)			
Vides (%)			

Informations générales selon NF P 98-150-1 et fiches produits

Domaine d'emploi		Conditions d'utilisation		Caractéristiques de mise en œuvre	
Niveau de sollicitations :	Trafic VL, pietonnier	T°C Fabrication :	de 150 à 170 °C / 190°C maximum	% de vides :	
Etat du support :	≤ à 1 cm à la règle de 3m	T°C Répandage :	≥ 140 °C	Macrotexture :	
Type Répandage :	Mécanisé	Epaisseur :		Drainabilité :	
		Collage :	350 g/m²		

Version :	30/09/2013

Figure 8.2: Fiche caractéristique de la couche BBDR

Catalogue de poste

CE 19

FICHE PRODUIT

EB 14 assise 10/20

EME 2 0/14

NF EN 13108-1 **Code : 6**

DOSSIER n°	ETUDE				
	NIVEAU	DATE	VALIDITE	LABO.	Référence
13 LIM 0008/14	3	mars-12	mars-17	EUROVIA DTSO	12 BDX 0070-P001

FORMULATION		% INTERIEUR	% EXTERIEUR	% PUPITRE	Origine des échantillons
10/14	LAPLEAU	23,4%	24,9%	23,4%	Moyenne livraison 2012
6/10	LAPLEAU	13,5%	14,3%	13,5%	Moyenne livraison 2012
4/6	LAPLEAU	12,5%	13,2%	12,5%	Moyenne livraison 2012
0/4	LAPLEAU	42,5%	45,0%	43,5%	Moyenne livraison 2012
Agrégats					
Filler d'apport		2,5%	2,6%	1,5%	
Fines d'attrition					
Liant	10/20	5,6%	5,9		
Liant issu des AE			(en ppc)		
Liant total		5,6%		5,6%	
Ajout					

MVRG (NF EN 1097-6 et 7) :	2659	Kg/m3
MVRE (NF EN 12697-5) :	2443	Kg/m3
Module de richesse :	3,56	
Surface Spécifique :	12,70	m²/kg
TL min :	-	%

	AE	AJOUT	TOTAL	
PENE:	-	14	-	1/10mm
TBA:	-	64	-	°C

Température du mélange : 160 à 180 °C

Température max. du mélange : 190 °C

TAMIS	10/14	6/10	4/6	0/4	Agrégats	Filler d'apport	MELANGE	ETUDE
20	100	100	100	100		100	100,0	100,0
16	100	100	100	100		100	100,0	100,0
14	90	100	100	100		100	97,5	97,5
12,5	60	100	100	100		100	90,0	90,1
10	9	88	100	100		100	75,6	75,1
8	4	47	100	100		100	68,5	67,9
6,3	2	14	91	100		100	62,1	62,1
4	1,9	3	15	97		100	49,1	47,0
2	1,7	2,3	3,3	67		100	33,9	34,1
1	1,6	1,9	2,4	46		100	24,3	23,9
0,5	1,6	1,8	2,1	32		98	17,9	17,7
0,315	1,5	1,7	1,9	25		96	14,6	14,3
0,250	1,5	1,7	1,9	22		94	13,2	13,1
0,125	1,3	1,5	1,7	15		88	9,8	9,9
0,08	1,2	1,3	1,5	11,3		83,3	7,9	8,2
0,063	0,8	1,0	1,3	10,0		80,2	7,1	7,1
MVRG	2,68	2,68	2,68	2,63		2,72	2,659	

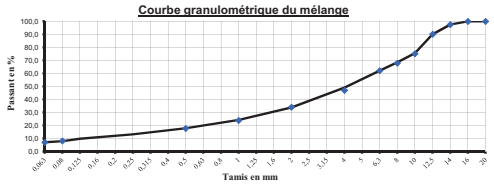


Figure 8.3: Fiche caractéristique de la couche EME

9 Annexe B: Fiches techniques des capteurs et modules d'acquisition

Fiche technique de la sonde hygrothermique LSI DMA672.1

Thermohygrometer (direct output)

Air temperature and RH% sensor. Pt100 output for temperature and 0-1 Vdc output for RH%. For outdoor application it should be coupled with a radiant screen. Precise and reliable, this sensor is suitable for continuous measurements also in severe environments and in presence of steep thermal and hygrometric variations.

Order numb.	DMA672.1	ESU403.1
Output	RH%: 0÷1 Vdc. °C: Pt100 DIN-IEC 751 table (EN 60751)	
Power supply	6÷18 Vdc	
Connector	L = 3 m free wires (8 wires)	L = 3 m and n.2 Mini-Din connectors
Data logger compatibility	M-Log (ELO007-008) R-Log (ELR515), E-Log (all models)	M-Log (ELO009) R-Log (ELR510)

Common features		
Temperature	*Principle*	Pt100 1/3 DIN B
	Measuring range	Depending by the data acquisition system
	Uncertainty	0,1°C (0°C)
	Output	Pt100 DIN-IEC 751 table (EN 60751)
	Resolution	0,01°C (M/R/E-Log)
	Response time (T90)	3 min: with filter; 20 sec: without filter (0,2 m/s air speed)
Relative humidity	*Principle*	Capacitive
	Measuring range	0÷100%
	Uncertainty	±1,5% RH (5-95%)
	Output	0÷1 Vdc
	Response time (T90)	10 min. with filter; 1 min. without filter (0,2 m/s air speed)
General information	*Cable*	L = 3 m
	Protection type	IP54
	Operative temperature	-40÷+80°C

Accessories	Order numb.	
	DYA230	Multi plate natural ventilation radiant screen
	DYA233	Multi plate natural ventilation radiant screen for DYA046 arm
	DYA231	Multi plate forced ventilation radiant screen. 12 Vdc power supply
	DPA232	Multi plate forced ventilation radiant screen. 24 Vac power supply
	DZC301.S	Temperature and RH% calibration certificate. ISO9000 type
	CSIT.T10	Temperature calibration certificate ACCREDIA type
	DZZSIT8	RH% calibration certificate ACCREDIA type
	DYA049	Mast-mounting device for ø 45-65 mm pipe

Surface temperature | Air temperature Relative humidity

MNW9000-ENG

Fiche technique de l'anémomètre LSI DNA807

following | Wind speed (wind cup)

www.lsi-lastem.com

Standard anemometer (direct output)

Wind speed sensor with direct signal output (Hz/m/s). These anemometers are ideal for when requirements calls for low thresholds and good accuracy even at very low wind speed. The wind speed element is a tachometer with 32 steps ensuring very high resolution. DNA302#C is equipped with heater. DNA304#C, with its extreme-low power consumption, can be used in applications with very low energy availability.

Order numb.	DNA301#C	DNA302#C	DNA304#C
Measuring range (damage limit)	0÷75 m/s		
Output	0-883 Hz		
Power supply	5÷12 Vdc	5÷12 Vdc (heater 24 Vac)	5÷12 Vdc
Heater	-	YES (-20°C)	-
Power consumption	Max. 20 mA	20 W	2 mA
Calibration certificate	Included		
Data logger compatibility	M-Log (ELO007-008), R-Log (ELR515), E/X-Log (all models)		

Standard anemometer (analog output)

Wind speed sensor with analog signal output. All models are based on microprocessor technology: Every sensor has, on the basis of its particular geometry, different response on each point of his measuring range; the microprocessor adjusts the signal linearity at any wind speed value, obtaining a precise and stable output. DNA802 and DNA806 are equipped with heaters.

Order numb.	DNA801	DNA802	DNA805	DNA806	DNA807
Output	4÷20 mA		0÷20 mA		0÷5 Vdc
Measuring range	0÷50 m/s				
Power supply	10÷30 Vac/dc	24 Vac/dc	10÷30 Vac/dc	24 Vac/dc	10÷30 Vac/dc
Heater	-	YES (-20°C)	-	YES (-20°C)	-
Heater operative temperature	-	>-20°C	-	>-20°C	-
Power consumption	0,5 W	20 W	0,5 W	20 W	0,5 W
Microprocessor	PIC 18F2620				

Common features

Wind speed	*Principle*	N.32 step optoelectronic disk
	Threshold	0,36 m/s
	Accuracy	0÷3 m/s=1,5%, >3 m/s= 1%
	Resolution	0,06 m/s
	Delay distance	4,8 m (at 10 m/s). According to VDI3786 and ASTM 5096-96
General information	*Operative damage limit*	75 m/s
	Connector	7 pin IP65 watertight connector
	Housing	Anodized aluminum
	Operative temperature	-35÷ +70°C (without ice)
	Mounting	Mast ø 48 ÷ 50 mm

continued

LSI LASTEM S.r.l. 20090 Settala (MI) Italy **tel:** +39 02 954141 **fax:** +39 02 95770594 **e-mail:** info@lsi-lastem.it

Fiche technique du pluviomètre LSI DQA136

Rain
Technical features - MODELS

www.lsi-lastem.com

Rain gauge

Rain gauge is the instrument for the measuring of rain quantity. The device is composed of a collector cone and a double-chamber tipping bucket connected to a magnet that operates one reed switch, which generates impulses that can be counted by external meters: each impulse is equal to 0.2 mm of rainfall. Models are equipped with a siphone placed on the cone's nozzle; it has function during heavy rain, to regulate the flow into the bascule permitting all the water to fall inside. Models are equipped with a siphon placed on the cone's nozzle; it has function during heavy rain, to regulate the flow into the bascule permitting all the water to fall inside. The external body is made of anodized aluminum. For sites with sub-zero temperatures, the thermostatic heated models (DQA131.1-951-136.1), ensure the complete melting of snow, even at extreme temperatures, and avoid ice formation on its body. Data output of the models DQA950-951 is RS485 using Modbus RTU® and TTY-ASCII protocols.

Order numb.	DQA130.1#C (1)	DQA131.1#C (1)	DQA950 (1)	DQA951 (1)	DQA135.1#C (2)	DQA136.1#C (2)
Diameter	200 mm				357 mm	
Collector surface	324 cm²				1000 cm²	
Heater	NO	YES	NO	YES	NO	YES
Heater power supply	-	24 Vac	9÷30 Vac/dc	24 Vac	-	24 Vac
Heater power consumption	-	60 W	0,5 W	60 W	-	60 W
Operative temperature	>0°C	>-20°C	>0°C	>-20°C	>0°C	>-20°C
Weight	2,8 kg	-	-	-	-	-
Output	Pulses. Max load 20 mA/24V non inductive		RS485		Pulses. Max load 20 mA/24V non inductive	
Protocols	-	-	Modbus RTU®, TTY-ASCII		-	-
Programmable data output	-	-	Pulse date/time, Tot. (1÷3600 s)		-	-
RS485 protection	-	-	Galvanic insulation (3 kV, UL1577)		-	-
RS485 speed	-	-	1200÷115 kbps		-	-
Data logger compatibility	M-Log (ELO007-008), R-Log (ELR515), E-Log (all models)		-	-	M-Log (ELO007-008), R-Log (ELR515), E-Log (all models)	

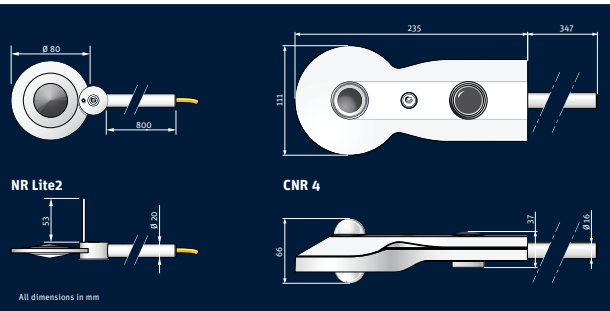
Common features

Rain gauge	*Principle*	Tipping bucket with syphone
	Design	WMO accordance
	Resolution	0,2 mm (opt. 0,1 mm)
	Accuracy	Rain intensity 0÷1 mm/min: ± 0,2 mm Rain intensity 1÷4 mm/min: 1%
	Housing	Aluminum
	Calibration certificate	Included
	Data logger compatibility	M-Log (ELO007-008) R-Log (ELR515) E/X-Log (all models)

continued

LSI LASTEM S.r.l. 20090 Settala (MI) Italy **tel:** +39 02 954141 **fax:** +39 02 95770594 **e-mail:** info@lsi-lastem.it | 38

Fiche technique du combiné pyranomètres et pyrgéomètres Kipp & Zonen CNR4



Specifications	NR Lite2	CNR 4
Number of signal outputs	1 - net total radiation	4 - incoming and reflected short-wave radiation downward and upward long-wave radiation
Pyrgeometer temperature sensors	N/A	10 K thermistor and Pt-100
Response time (95 %) Non-linearity (over full range)	< 60 s < 1 %	< 18 s < 1 %
Temperature dependence of sensitivity	< 0.1 % / °C (typical)	< 5 % from -10 °C to +40 °C
Sensitivity	10 µV/W/m² (nominal)	7 to 20 µV/W/m² short-wave 5 to 10 µV/W/m² long-wave
Operating temperature	-40 °C to +80 °C	-40 °C to +80 °C
Spectral range (50 % points)	200 nm to 100 µm	300 to 2800 nm short-wave 4.5 to 42 µm long-wave
Field of view	180 ° upper and lower sensor	180 ° short-wave upper sensor 170 ° short-wave lower sensor 180 ° long-wave upper sensor 150 ° long-wave lower sensor
Mounting rod	Fixed, 800 mm long x 20 mm Ø	Screw-in, 350 mm long x 16 mm Ø
Standard cable	15 m fixed cable	10 m with connector
Cable lenght options	N/A	25 m, 50 m
Weight with rod (excluding cable(s))	490 g	850 g

Note: The performance specifications quoted are worst-case and/or maximum values

KIPP & ZONEN
SINCE 1830

Go to www.kippzonen.com for your local distributor

HEAD OFFICE

Kipp & Zonen B.V.
Delftechpark 36, 2628 XH Delft
P.O. Box 507, 2600 AM Delft
The Netherlands
T: +31 (0) 15 2755 210
F: +31 (0) 15 2620 351
info@kippzonen.com

4414391 - V1302

Kipp & Zonen B.V. reserve the right to alter specifications of the equipment described in this documentation without prior notice

Fiche technique du pyranomètre Kipp & Zonen CM11

Kipp & Zonen

CM11 Pyranometer

CM11 Features & Benefits

- low dome thermal offset error
- excellent cosine/directional response
- excellent long term stability of sensitivity
- excellent linearity performance

CM11 Pyranometer Specifications:	
Spectral range	305 – 2800 nm (50% points)
Sensitivity	4 - 6 µV/W/m^2
Impedance (nominal)	700 - 1500 Ω
Response time (95%)	15 sec.
Non-linearity	< ± 0.6% (<1000 W/m^2)
Temp. dependence of sensitivity	< ± 1% (-10 to +40°C)
Directional error	< ± 10 W/m^2 (beam 1000 W/m^2)
Tilt error	None
Zero-offset due to temp. changes	< ± 2 W/m^2 at 5 K/h temp. change
Operating temperature	-40°C to +80°C
ISO-9060 Class	Secondary Standard
Dimensions W x H	150.0 mm x 91.5 mm
Weight	850 grams
Cable length	10 m

For high accuracy solar radiation measurement research …

The CM11 pyranometer is intended for high accuracy total global, or diffuse sky, solar radiation measurement research on a plane/level surface.

The CM11 is fully compliant with the ISO-9060 Secondary Standard pyranometer performance category (highest ISO performance criteria for a pyranometer). Instrument cosine response and temperature dependence are verified and documented upon instrument manufacture. Extremely high mechanical tolerances are maintained during manufacture to ensure optimal measurement performance in the field.

The CM11 houses a second built-in complimentary sensing element (temperature compensation element), in addition to the black receiving element/detector. Calibrated to identical sensitivity as the receiving detector, the compensation element is connected in anti-series to the receiving detector. Instrument output signal is measured across the entire anti-series circuit. Any change in body temperature, due to thermal shock or temperature gradient effect, are quickly detected by the built-in compensation element, and an offset correction signal is applied to the instrument output signal.

The receiving element is coated with a highly stable carbon based non-organic coating, which delivers excellent spectral absorption and long term stability characteristics. The sensing element is housed under two concentric fitting Schott K5 glass domes.

Additional CM11 features include an integrated built-in bubble level, reusable desiccant drying cartridge, white sunscreen, and a permanently attached shielded output signal cable.

The CM11 can be used in conjunction with the optional Kipp & Zonen CV2 ventilation system, for enhanced measurement performance and overall reduced instrument maintenance.

Kipp & Zonen B.V. • PO Box 507 • 2600 AM Delft • the Netherlands •Tel: +31-15-2698000 • Fax: +31-15-2620351 • Email: info.kipp@kippzonen.com

Fiche technique du pyranomètre Hukseflux SR20

Hukseflux
Thermal Sensors

Suggested use

- PV system performance monitoring
- scientific meteorological observations
- reference instrument for comparison
- extreme climates (tropical / polar)

Figure 5 *SR20 side view*

See also

- SR20-D2 digital secondary standard pyranometer with Modbus RTU and 4-20 mA output
- SR25 secondary standard pyranometer with sapphire outer dome
- alternative instruments: SR11 and LP02 for lower accuracy measurements
- SR12 first class pyranometer for solar energy testing applications
- the making of SR20 documented
- view our complete product range of solar sensors

SR20 specifications

Measurand	hemispherical solar radiation
ISO classification	secondary standard pyranometer
Calibration uncertainty	< 1.2 % (k = 2)
Zero offset a	5 W/m^2 unventilated
Zero offset a	2.5 W/m^2 ventilated
Calibration traceability	to WRR
Spectral range	285 to 3000 x 10^{-9} m
Sensitivity (nominal)	15 x 10^{-6} V/(W/m^2)
Rated operating temperature range	-40 to +80 °C
Temperature response	<± 1 % (-10 to +40 °C) <± 0.4 % (-30 to +50 °C) with correction in dataprocessing
Temperature response test of individual instrument	report included
Directional response test of individual instrument	report included
Temperature sensor	Pt100 or 10 kΩ thermistor
Heater	1.5 W at 12 VDC
Standard cable length	5 m

Options

- longer cable, in multiples of 5 metres
- ventilated with VU01 ventilation unit

About Hukseflux

Hukseflux Thermal Sensors, founded in 1993, aims to advance thermal measurement. We offer a complete range of sensors and systems for measuring heat flux, solar radiation and thermal conductivity. We also provide consultancy and services such as performing measurements and designing instrumentationaccording to customer requirements. Hukseflux is ISO 9001:2008 certified. Customers are served through the main office in Delft in the Netherlands, and locally owned representations in the USA, Brazil, India, China and Japan.

Interested in this product?
E-mail us at: info@hukseflux.com

Copyright by Hukseflux. Version 1506. We reserve the right to change specifications without prior notice

Fiche technique du cryopédomètre Electronica

1. Présentation

Les cannes cryopédomètrique, placés en des points particulièrement sensibles du réseau routier, permettent le relevé des températures de la chaussée à différentes profondeurs, et de suivre l'évolution de la profondeur du gel.

Associé à une station de télémesures et de télésurveillance, elles permettent l'acquisition des températures respectives en fonction du temps, un traitement en temps réel de la profondeur de gel et une alarme dite « barrière de dégel » d'aide à la décision de pose ou de dépose des barrières de dégel.
Le DataLogger permet d'effectuer manuellement des mesures ponctuelles directement sur site.

Cette notice donne une méthode pour effectuer la pose du capteur, elle n'est en aucun cas exhaustive.

2. Caractéristiques

Longueur	102 cm
Diamètre	Tube : 16 mm Sortie câble : 140mm
Poids	500 grammes
Nombre de sondes	17
Profondeurs mesurées	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100 cm
Alimentation	9 à 16 V continu
Consommation	45 mA en mesure
Disponibilité de la 1ere mesure à la mise sous tension	12 secondes
Etendu de mesure	-30°C à +60°C
résolution	± 0,1°C
Précision	± 0,3°C
Longueur de câble	15 mètres
Diamètre du câble	6 mm
Nombre de conducteur	7
Unité de mesure	Degrés Celsius
Communication	Protocole Modbus en RS485 Protocole SDI12

Fiche technique du capteur d'état de surface Luft IRS31

Lufft IRS31Pro-UMB – Intelligent Passive Road Sensor

Passive road sensor IRS31Pro-UMB is flush-mounted in the road. The two part housing design allows the combined sensor/electronics unit to be removed for maintenance or calibration at any time.

The following variables are recorded:

- **Road surface temperature**
- **Water film height up to 4mm**
- **Freezing temperature for different de-icing materials (NaCl, MgCl, CaCl)**
- **Road condition (dry/damp/wet/ice or snow/moist with salt/wet with salt)**
- **Friction (Grip)**
- **Ice Percentage**

Optional:

- **2 additional depth temperatures, e.g. at 5cm and 30cm**

The sensors are addressable and can be networked.

The measurement data is available for further processing in the form of a standard protocol (Lufft UMB protocol).

Lufft IRS31-UMB Intelligent Road Sensor			Order No.
IRS31Pro-UMB 50m cable length			**8910.U050**
IRS31Pro-UMB 50m cable length, 1 depth temperature sensor			**8910.U051**
IRS31Pro-UMB 50m cable length, 2 depth temperature sensors			**8910.U052**
IRS31Pro-UMB 100m cable length			**8910.U100**
IRS31Pro-UMB 100m cable length, 1 depth temperature sensor			**8910.U101**
IRS31Pro-UMB 100m cable length, 2 depth temperature sensors			**8910.U102**
Technical data	Dimensions	Ø 120mm, height 50mm	
	Weight	Approx. 800g without cable and without external temperature sensor	
	Detectable road conditions	Dry/moist/wet/moist with salt/wet with salt/ice	
	Storage temperature	–40 … 70 °C (in packing)	
	Rated current	<200 mA	
	Interface	RS485, Baudrate: 2400 … 38400 bit/s (Standard: 19200) or SDI-12	
	Protection	IP68	
	Op. power consumption	9 … 14VDC, typical 12V	
	Plug	Cable 0.5mm²	
	Op. temperature range	–40 … 80 °C	
	Operating humidity range	0 … 100% RH	
	Road dampness	Unit: dry/damp/wet/moist with salt/wet with salt	
	Slippery road conditions	Unit: no ice/snow, snow, ice	
Road surface temp./below-ground temp.	Principle	NTC	
	Measuring range	–40 … 80 °C	
	Accuracy	±0.1 °C (-20 … 20 °C), else ±0.2 °C	
	Resolution	< 0.02°C (-20...20 °C), else ±0.1 °C	
Freezing point*	Measuring range	–40 … 0 °C	
	Accuracy	±0.5°C (0…-2.5°C), else ±20% from average value (at de-icing agent NaCl)	
	Resolution	0.1	
Water film height	Principle	Radar	
	Measuring range	0 … 4mm	
	Accuracy	0.2mm to 3mm: better than ±30%	
	Resolution	0.01mm	
Friction (Grip)	Measuring range	0...1 (slippery...dry)	
Ice Percentage	Measuring range	0...100%	
Accessories	UMB Interface converter ISOCON-UMB		**8160.UISO**
	Spare part cap IRS31Pro-UMB		**8910.DEC**
	Surge protection		**8379.USP**
	Digital-analog-converter DACON8-UMB		**8160.UDAC**
	Power supply		**8366.USV1**

*Freezing temperature output already from pre-set dry-damp threshold (e.g. 10µm according to new TLS specification).

Replaceable sensor electronics

Polling via RS485 interface

Low energy consumption (solar operation)

Radar principle to measure water film

Analogue outputs in combination with 8160.UDAC

Bibliographie

[1] Andriopoulou S. A review on energy harvesting from roads. In *KTH*, 2012.

[2] Wu G .and Yu X. Thermal energy harvesting across pavement structure. In *Transportation Research Board (TRB)*, Annual Meeting, Washington, USA, 2011.

[3] Liu X., Rees J.S., and Spitler D.J. Modeling snow melting on heated pavement surfaces. part i: Model development. *Journal of Applied Thermal Engineering*, 27:1115 –1124, 2007.

[4] Dawson R.A., Dehdezi P.K., Hall R.M., Wang J., and Isola R. Thermophusical optimization of asphalt paving materials. In *Transportation Research Board (TRB)*, Annual Meeting, Washington, USA, 2011.

[5] Gao Q., Huang Y., Li M., Liu Y., and Yan Y.Y. Experimental study of slab solar collection on the hydronic system of road. *Journal of Solar Energy*, 84:2096–2102, 2010.

[6] Xu H. and Yi T. Development and testing of a heat and mass coupled snow melting model for hydronic heated pavement. In *Transportation Research Board (TRB)*, Annual Meeting, Washington, USA, 2012.

[7] Mallick R.B., Chen B.L., and Bhowmick S. Harvesting energy from asphalt pavements and reducing the heat island effect. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2:214–228, 2009.

[8] Mallick RB., Chen B., Bhowmick S., and Huken MS. Capturing solar energy from asphalt pavements. In *International ISAP Symposium on Asphalt Pavements and Environment, Zurich, Switzerland*, 2008.

[9] Pan P., Shaopeng W., Xiao X., and Gang L. A review on hydronic asphalt pavement for energy harvesting and snow melting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 2015.

[10] Brusaw S. Solar roadways: A real solution. http://solarroadways.com/main.html, 2012.

[11] Valk G. Solaroad: Amsterdam, 26 january 2011. http://www.tno.nl/downloads/Presentation2011.

[12] Guerin J.Y. Colas invente la route solaire. http://www.lefigaro.fr/societes/2015/10/13/20005-20151013ARTFIG00359-colas-invente-la-route-solaire.php, 2015.

[13] Gonella S., Albert C. To, and Wing Kam L. Interplay between hononic band gaps and piezoelectric microstructures for energy harvesting. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 57:621–633, 2009.

[14] Riffat S.B. and Xiaoli Ma. Review thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, 23:913–935, 2003.

[15] Ma B., Wang S., and Li J. Study on application of pcm in asphalt mixture. *Journal of Advanced Materials Research*, 168:2625–2630, 2006.

[16] Cocu X.and Nicaise D. and Rachidi S. The use of phase change materials to delay pavement freezing. Transport Research Arena (TRA), 2010.

[17] Chen M. *Research on snow melting and solar energy collection for thermal conductive asphalt pavement*. PhD thesis, Wuhan University of Technology, 2011.

[18] Larsson O. and Thelandersson S. Estimating extreme values of thermal gradients in concrete structures. In *Mater Struct 2011*, 2011.

[19] Shaopeng W. and Mingyu C.and Jizhe Z. Laboratory investigation into thermal response of asphalt pavements as solar collector by application of small-scale slabs. *Applied Thermal Engineering*, 31:1582–1587, 2011.

[20] Loomans M., Oversloot H., de Bondt A., Jansen R., and van Rij H. Design tool for the thermal energy potential of asphalt pavements. In *Eighth International IBPSA*, Conference Eindhoven, Netherlands, 2003.

[21] Bijsterveld W.T., Houben L.J.M., Scarpas A., and Molenaar AAA. Using pavement as solar collector. effect on pavement temperature and structural response. In *Transport Res Rec 2001*, 2001.

[22] Bijsterveld W.T. and de Bont A.H. Structural aspects of asphalt pavement heating and cooling systems. In *In: 3rd International Symposium on 3D Finite Element Modeling*, WAmsterdam, Netherlands, 2002.

[23] Nordell B. and Hellstrom G. Underground thermal energy storage with heat pumps – an international overview. In *IEA Heat Pump Centre Newsletter*, 1998.

[24] Nordell B. Large scale thermal energy storage. In *WinterCities 2000*, 2000.

[25] Pavlov G. and Bjarne O. Thermal energy storage—a review of concepts and systems for heating and cooling applications in buildings: Part 1—seasonal storage in the ground. *HVACR Research*, 18:515–538, 2012.

[26] de Montigny S.and Herbaux M. *Opération de recherche- Rapport bibliographie - Géothermie R2I : Chaussée chauffantes.* PhD thesis, Cerema, Direction territoriale Ile-de-France, 2015.

[27] Schmidt T., Mangold D., and Müller-Steinhagen H. Central solar heating plants with seasonal storage in germany. *Solar Energy*, 76:165–174, 2004.

[28] Lottner V., Schulz M.E., and Hahne E. Solar-assisted district heating plants: Status of the german program solarthermie-2000. In *Sol Energy*, 2000.

[29] Bauer D., Marx R., Nußbicker-Lux J., Ochs F., Heidemann W., and Müller-Steinhagen H. German central solar heating plants with seasonal heat storage. *Solar Energy*, 84:612–623, 2010.

[30] Lottner V., Schulz M.E., and Hahne E. 15 years of rd in central solar heating in denmark. In *Sol Energy*, 2000.

[31] Balbay A. and Esen M. Experimental investigation of using ground source heat pump system for snow melting on pavements and bridge decks. *Scientific Research and Essays*, 24:3955–3966, 2010.

[32] Novo A. V., Bayon J.R., Castro-Fresno D., and Rodriduez-Hernandez J. Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel-water pits. *Applied Energy*, 87:390–397, 2010.

[33] Schmidt T., Mangold D., and Müller-Steinhagen H. Seasonal thermal energy storage in germany. In *In Proc.ISES Solar World Congress 2003*, 2003.

[34] Florides G. and Kalogirou S. Ground heat exchangers—a review of systems, models and applications. *Renewable Energy*, 32:2461–2478, 2007.

[35] SIEBERT Nicolas and ZACHARAKIS Eleftherios. *Master's Thesis within Sustainable Energy Systems and Structural Engineering Building Performance Design, Asphalt Solar Collector and Borehole Storage Design study for a small residential building area.* PhD thesis, Department of Energy and Environment, Division of Building Services Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2010.

[36] Lund .J, Sanner B., Rybach L., Curtis R., and Hellström G. Geothermal (ground-source) heat pumps. In *A world overview*, SEPTEMBER 2004.

[37] Wang H. and Chen Z. Study of critical free-area ratio during the snow-melting process on pavement using low-temperature heating fluids. *Energy Conversion and Management*, 50:157–165, 2009.

[38] Sherif Y., Tuan Christopher Y., Ferdon D., and Chen B. Conductive concrete overlay for bridge deck deicing: mixture proportioning, optimization, and properties. *ACI Materials Journal*, 97:172–181, 2000.

[39] Zwaryez K. Snow melting and heating systems based on geothermal heat pumps at goleniow airport poland. *Geothermal Training Program*, 2:431–464, 2002.

[40] Derwin D., Booth P., and Zaleski P. Snoe free-heated pavement system to eliminate ice runways. In *SAE Technical paper Series 2003-01-2145*, 2003.

[41] Minsk L.D. Heated bridge technology: Report on istea sec. In *6005 Program*, 1999.

[42] Spitler J. and Ramamoorthy M. Bridge deck deicing using geothermal heat pumps. In *Proceedings of the 4th International Heat Pumps in Cold Climated Conference*, Aylmer, Quebec, 2000.

[43] Lund J. Pavement snow melting. In *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 1999.

[44] Morita K. and Tago M. Operational characteristics of the gaia snow-melting system in ninohe, iwate, japan. In *Proc. World Geothermal Congress 2000*, 2000.

[45] Morita K. and Tago M. Snow-melting on sidewalks with ground-coupled heat pumps in a heavy snowfall city. In *Proc. World Geothermal Congress 2005, Antalya*, 2005.

[46] Eugster W. and Schatzmann J. Harnessing solar energy for winter road clearing on heavily loaded expressways. In *Proc. XIth PIARC International Winter Road Congress*, 2002.

[47] Lund J.W. Pavement snow melting. In *Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, Klamath Falls*, 2012.

[48] Liu X., Simon R., Spitler J., and Jeffrey D. Modeling snow melting on heated pavement surfaces. part ii: experimental validation. *Applied Thermal Engineering*, 27:1125–1131, 2011.

[49] ooms. http://www.ooms.nl, Accessed 21.12.11.

[50] winnerway. http://www.winnerway.nl, Accessed 28.03.12.

[51] icax. http://www.icax.co.uk, Accessed 21.12.11.

[52] Novotech I. Raodway power system. In *Technical Analysis for Thermal Energy Generation*, 2008.

[53] Morita K., Matsubayashi O., and Kusunoki K. Down-hole coaxial heat exchanger using insulated inner pipe for maximum heat extraction. *GRC Transactions*, 9:45–49, 1985.

[54] Morita K. and Tago M. Development of the downhole coaxial heat exchanger system : Potential for fully utilizing geothermal resources. *GRC Bulletin*, 24:83–92, 1995.

[55] Eugster W. Road and bridge heating using geothermal energy. overview and examples. In *Proceedings European Geothermal Congress 2007 Unterhaching*, 2007.

[56] Pahud D. Bridgesim: outil de simulation pour le dégivrage de pont par énergie solaire. In *SUPSI Instory (SUPSI INSTitutional repositORY)*, 2008.

[57] Barber E.S. Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports. *Highway Research Board Bulletin*, 168:1–8, 1957.

[58] Kennedy T.W. Solaimanian M. Predicting maximum pavement surface temperature using maximum air temperature and hourly solar radiation. *Transportation Research board*, 15:1–11, 1993.

[59] Hermansson A. Mathematical model for paved surface summer and winter temperature: comparison of calculated and measured temperatures. *Cold Region Science and Technology*, 40:1–17, 2004.

[60] Southgate H.F. and Deen R.C. Temperature distribution within asphalt pavements and its relationship to pavement deflection. In *Transportation Research Record 291*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1969.

[61] Ksaibati K. Yavuzturk C. Assessment of temperature fluctuations in asphalt pavement due to thermal environmental conditions using a two-dimensional, transient finite-difference approach. In *Mountain Planes Consortium Report*, 2002.

[62] Chiasson A.D. Yavuzturk C., Ksaibati K. Assessment of temperature fluctuations in asphalt pavement due to thermal environmental conditions using a two-dimensional, transient finite-difference approach. In *J Mater Civil Eng 2005*, 2005.

[63] Hermansson A. Simulation model for calculating pavement temperatures including maximum temperature. *Transportation Research board*, 134:34–41, 2000.

[64] Minhoto M., Pais J., Pereira P., and Picado-Santos L. Predicting asphalt pavement temperature with a three-dimensional finite element method. *Journal of Transportation Research Board*, 1919:96–110, 2005.

[65] Han R., Jin X., and Glover C.J. Modeling pavement temperature for use in binder oxidation models and pavement performance prediction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23:351–359, 2011.

[66] Hall M.R., Dehdezi P.K., Dawson A.R., Grenfell J., and Isola R. Influence of the thermophysical properties of pavement materials on the evolution of temperature depth profiles in different climatic regions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24:32–47, 2012.

[67] Bobes-Jesus V., Pascual-Muñoz P., Castro-Fresno D., and Rodriguez-Hernandez J. Asphalt solar collectors: A literature review. *Applied Energy*, 95:962–970, 2013.

[68] Mallick R.B., Chen B.L., and Bhowmick S. Harvesting heat energy from asphalt pavements: development of and comparison between numerical models and experiment. *International Journal of Sustainable Engineering*, 5:159–169, 2011.

[69] Luca J. and Mrawira D. New measurement of thermal properties of superpave asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17:72–79, 2005.

[70] BILGEN E., , and RICHARD M.A. Horizontal concrete slabs as passive solar collectors. *Solar Energy*, 72:405–413, 2002.

[71] Sedgwick R.H.D. and Patrick M.A. The use of a ground solar collector for swimming pool heating. In *In Proceedings ISES Congress*, Brighton, Vol. 1, pp. 632–636, 1981.

[72] Nayak J. K., Sukhatme S. P., Limaye R. G., and Bopshetty S. V. Performance studies on solar concrete collectors. *Solar Energy*, 42:45–56, 1989.

[73] Al-Saad M. A. and Jubran B. A. Development and testing of concrete solar collectors. *Solar Energy*, 16:27–40, 1994.

[74] Wang H., Zhao J., and Chen Z. Experimental investigation of ice and snow melting process on pavement utilizing geothermal tail water. *Energy Conversion and Management*, 49:1538–1546, 2008.

[75] Wang H. Shaopeng Wu., Chen M. and Zhang Y. Laboratory study on solar collector of thermal conductive asphalt concrete. *International Journal of pavement Research and Technology*, 2:130–136, 2009.

[76] Rees S., Spitler J., and Xia Xiao P.E. Transient analysis of snow-melting system performance. *Published in ASHARE Transactions*, 108:403–409, 2002.

[77] Wang H., Wu S., Chen M., and Zhang Y. Numerical simulation on the thermal response of heat-conducting asphalt pavements. *Physica Scripta*, 2010:70–83, 2010.

[78] Chen M., Wu S., Zhang Y., and Wang H. Effects of conductive fillers on temperature distribution of asphalt pavements. *Physica Scripta*, 2010:21–35, 2010.

[79] Wu S., Wang H., Chen M., and Zhang Y. Numerical and experimental validation of full depth asphalt slab using capturing solar energy. In *In: 4th International Conference of Bioinformatics and Biomedical Engineering 2010*, Chengdu, China, 2010.

[80] Mallick R.B., Chen B., and Bhowmick S. Reduction of urban heat island effect through harvest of heat energy from asphalt pavements. *<http://heatisland2009.lbl.gov/docs/211420-mallick-doc.pdf> [Accessed 28.03.12]*, 2008.

[81] Chen M., Wu S., Wang H., and Zhang J. Study of ice and snow melting process on conductive asphalt solar collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95:3241–3250, 2011.

[82] Wang H. *Analysis on optimization design and viscoelastic response of conductive asphalt pavement using snowmelt.* PhD thesis, Wuhan University of Technology, 2010.

[83] Teba esteban J. *Conception d'un système pour la récupération de l'énergie thermique des chaussées : Projet d'Initiation à la Recherche et Développement.* PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon Département Génie Énergétique et Environnement, 2010-2011.

[84] Yan L., Qing G., and Yong H. Modeling hydronic solar collection on slab of road and bridge and a feature study. In *In: ICEET '09 International Conference on Energy and Environment Technology 2009*, Guilin, Guangxi, China, 2009.

[85] Tang N., Wu S.P, Chen M.Y., Pan P. a, and Sun C.J. Effect mechanism of mixing on improving conductivity of asphalt solar collector. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75:650–655, 2014.

[86] Zhou Z., Wang X.and Zhang X., Chen G., Zuo J., and Pullen S. Effectiveness of pavement-solar energy system – an experimental study. *Applied Energy*, 138:1–10, 2015.

[87] Xiao X. *Modeling of hydronic and electric-cable snow melting systems for pavements and bridge decks.* PhD thesis, Faculty of the Graduate College of the Oklahoma State University, 2002.

[88] Pascual-Muñoz P., Castro-Fresno D., Serrano-Bravo P., and Alonso-Estébanez A. Thermal and hydraulic analysis of multilayered asphalt pavements as active solar collectors. *Applied Energy*, 24:324–332, 2013.

[89] Scaht A., Munk M., Busen C., Osser M., and Steinauer B. Application of a porous interlayer for road temperature control. In *XIV International Winter Road Congress*, Institute for road and traffic engineering, RWTH Aachen university, Deutschland, PIARC, Andoraa la Vella, 2014.

[90] Lencastre A. *Hydraulique générale.* Eyrolles, 1999.

[91] Sochala P. *Méthodes numériques pour les ecoulements souterrains et couplage avec le ruissellement.* PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008.

[92] Musy A. and Soutter M. *Physique du sol.* PPUR presses polytechniques, 1991.

[93] DAVARZANI Houssein. *Déterminations Théoriques et Expérimentale des Coefficients de Diffusion et de Thermodiffusion en Milieu Poreux.* PhD thesis, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), 2010.

[94] Whitaker S. *THE METHOD OF VOLUME AVERAGING.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1999.

[95] Coussy O. *Mécanique des milieux poreux.* Éditions TECHNIP, 1991.

[96] Lerau J. *Geotechnique1, Chapitres 2.* Institut nationnal des sciences appliquées de toulouse, Département de sciences et technologies pour l'ingénieur, 3eme annee Ingenieur de la construction, 2005-2006.

[97] Darcy H. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon.* V. Dalmont, Paris, 1856.

[98] Reddy J.N. and Gartling D.K. *The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics.* Third Edition, CRC Press, 2010.

[99] Ozisik M.-N. *Finite Differences Methods in Heat Transfer.* CRC Press, Boca Raton, 1994.

[100] Mackenzie A. and Robertson M.-L. The numerical solution of one-dimensional phase change problems using an adaptative moving mesh method. *J. Comput. Phys.*, 161:537–557, 2000.

[101] Duncan D. B. A simple and effective self-adaptive moving mesh for enthalpy formulations of phase change problems. *IMA J. Numer. Anal.*, 11:55–78, 1991.

[102] Farrell K. and Drury L. An explicit, adaptive grid algorithm for one-dimensional initial value problems. *Appl. Numer. Math.*, 26:3–12, 1997.

[103] Salteli A., Ratto M., Terry A., Campolongo F., Cariboni J., Gatelli D., Saisana M., and Tarantola S. *Global Sensitivity Analysis: The Primer.* John Wiley & Sons, 2008.

[104] Sobol I.M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. In *Mathematical Modelling and Computational Experiments*, 1993.

[105] Saltelli A. and Scott E.M. The role of sensitivity analysis in the corroboration of models and its link to model structural and parametric uncertainty. In *Reliability Engineering and System Safety*, 1977.

[106] Saltelli A., Chan K., and Scott E.M. Sensitivity analysis. In *Wiley*, 2000.

[107] Saltelli A., Tarantola S., and Campolongo F. Sensitivity analysis as an ingredient of modeling. statistical science. In *Statistical Science*, 2000.

[108] Saltelli A. and Tarantola S. On the relative importance of input factors in mathematical models : safety assessment for nuclear waste disposal. *Journal of the American Statistical Association*, 97:702–709, 2002.

[109] *NF P98-150-1, Bituminous asphalts - Laying of pavement bases, binder and wearing courses - Part 1: hot-mix asphalts- Constituents, formulation, fabrication, transport, laying and site inspection*, 2010.

[110] Liu. Induction healing of porous asphalt concrete. In *Master of Science in Materials Science Wuhan University of Technology*, U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC) Construction Engineering Research Laboratory (CERL): ASPRS 2006 Annual Conference, P.R China, GeborenteXihua Henan, P.R China, 2012.

[111] Mcinerney M., Trvillion J., Lozar R., Abdallah T., and Majumdar A. Classifying infrastructure using thermal ir signatures. In *Proceedings European geothermal Congress 2007*, U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC) Construction Engineering Research Laboratory (CERL): ASPRS 2006 Annual Conference, Reno, Nevada, 2006.

[112] *NF EN ISO 15927-4 Janvier 2006,Performance hygrothermique des bâtiments - Calcul et présentation des données climatiques - Partie 4 : données horaires pour l'évaluation du besoin énergétique annuel de chauffage et de refroidissement*, 2006.

[113] S. Asfour, F. Bernardin, C. Mauduit, E. Toussaint, and J.-M. Piau. Hydrothermal study of roads with de-freezing surface, obtained by the circulation of a warm uid in a bonding porous asphalt layer. *RILEM Bookseries*, vol 10, 2016.

[114] Asfour S. *rapport de stage M2: Instrumentation d'une chaussée pour un suivi thermique*. PhD thesis, Polytech Clermont-Ferrand, 2013.

[115] Hiller J. Qin Y. Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. *Energy and Buildings*, 85:389–399, 2014.

[116] Alifanov O. *Inverse Heat Transfer Problems*. Springer Science Business Media, Springer-Verlag, 2012.

[117] Beck J. and Arnold K. *Parameter Estimation in Engineerin and science*. Wiley series in probability and mathematical statistics, John wiley sons, 1977.

[118] Hung Huang C. and Wang S. A three-dimensional inverse heat conduction problem in estimating surface heat Øux by conjugate gradient method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42:3387–3403, 1999.

[119] S. Asfour, F. Bernardin, E. Toussaint, and J.-M. Piau. Hydrothermal modeling of porous pavement for its surface de-freezing. *Applied thermal engineering*, vol 107, p 493-500, 2016.

[120] http://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO201114.

[121] infoclimat. http://www.infoclimat.fr/observations-meteo/temps-reel/macon-charnay/07385.html, 27 avril 2016.

[122] Pouteau B., Balay J.M., Chabot A., and De Larrard F. Fabac accelerated loading test of bond between cement overlay and asphalt layers, in pavement cracking. *Al-qadi,Scarpas Loizos (eds)*, 1:671–681, 2008.