

Développement d'un démonstrateur de stockage thermique intersaisonnier

Etude Bibliographique

Fébron SEVI

30 mars 2020

Table des matières

1	Introduction	3
2	Les routes récupératrices d'énergie	3
2.1	Les différents systèmes de récupération d'énergies dans les chaussées	3
2.1.1	Les échangeurs thermiques routiers	3
2.1.2	Routes récupératrice d'énergie avec du photovoltaïque	9
2.2	Comparaison des différents projets	10
3	Les composantes du système utilisé dans le projet Dromotherm	11
3.1	L'échangeur routier Dromotherm	11
3.1.1	Description	11
3.1.2	Rôles de l'échangeur Dromotherm	12
3.2	La géothermie	13
3.2.1	La géothermie haute température	14
3.2.2	La géothermie (très) basse température	14
3.2.3	Les capteurs géothermiques	15
3.2.4	Les corbeilles géothermiques	16
3.2.5	Les systèmes de stockage géothermique	17
3.2.6	Pompe à chaleur (PAC)	20
3.3	L'habitat (Les bâtiments)	22
4	Les modélisations existantes des différents composants du projet DROMOTHERM	24
4.1	Modelisation hydro-thermique de la chaussée	24
4.2	Expérimentation des performances énergétiques de l'échangeur Dromotherm	28
4.2.1	Description du démonstrateur	28
4.2.2	Évaluation du dispositif en période neigeuse	29
4.2.3	Evaluation du dispositif en période estivale	31
4.3	Modelisation existante du stockage géothermique	32
4.4	Modelisation du bâtiment	33
4.4.1	Les modèles existants	33
4.4.2	La modélisation RC d'un bâtiment	35
5	Bilan	37

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. Cette étude bibliographique vient justement faire le point sur les différentes technologies qui existent dans ce domaine.

Nous allons d'abord présenter quelques uns des différents projets innovants de routes récupératrices d'énergies. Ensuite, la deuxième partie décrira les différentes composantes du projet Dromotherm sur lequel nos travaux se déroulent. Enfin, la dernière partie expose les différentes modélisations existantes dans la littérature sur chacune des composantes dudit projet.

2 Les routes récupératrices d'énergie

2.1 Les différents systèmes de récupération d'énergies dans les chaussées

Dans plusieurs pays, des chaussées innovantes dites récupératrices d'énergie ont émergés ces dernières années. Pour récupérer de l'énergie dans les chaussées, différents systèmes sont utilisés entre autres : les échangeurs thermiques routiers, les dalles photovoltaïques.

2.1.1 Les échangeurs thermiques routiers

Plusieurs projets sur des échangeurs thermiques routiers ont émergé ces dernières années. Le principe de fonctionnement de ces derniers se repose généralement sur le transfert d'énergie entre la chaussée et un fluide caloporeur circulant dans la chaussée. Dans la documentation, nous retrouvons quelques projets les plus marquants :

- Projet Serso**

Le projet Serso est né de l'idée de vouloir dégivrer un pont avec de l'énergie solaire. Il en résulte un concept qui met en œuvre un stockage saisonnier de chaleur dans le terrain. En effet, l'énergie solaire est captée par le pont en été, stockée dans le terrain par l'intermédiaire d'un ensemble de sondes

géothermiques, puis restituée en hiver pour le dégivrage du pont. Le pont est équipé de serpentins qui permettent de collecter les gains solaires estivaux et de chauffer la chaussée en hiver pour empêcher la formation de glace ou de givre[5]. L'énergie spécifique de chauffage annuelle du projet Serso varie entre 100 et 132 kWh/m² (figure 2) correspondant à une puissance variant entre 30 et 45 W/m².



FIGURE 1: Pont SERSO en fonctionnement

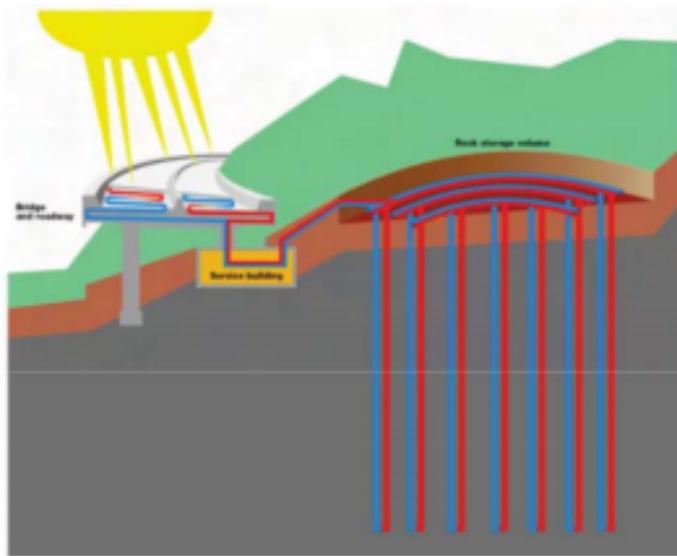


FIGURE 2: Principe de fonctionnement du pont Serso

- **Projet Power Road**

Avec Power Road®, Eurovia ajoute une nouvelle fonction à la route : la production d'énergie thermique. Captée par le biais des rayonnements solaires, l'énergie peut être stockée puis restituée aux bâtiments et infrastructures environnantes, via un système de pompes à chaleur.

L'énergie ainsi produite contribue à chauffer des bâtiments résidentiels, des immeubles de bureaux, des commerces, des éco-quartiers ou des équipements publics tels que les piscines, en améliorant leur mix énergétique. Elle peut être utilisée également, en hiver, pour déneiger et dévergler les voiries ou pistes d'aéroports en réduisant les interventions de salage, et en été pour refroidir les chaussées et contribuer à résorber les îlots de chaleur urbains grâce au captage de chaleur en surface[13].

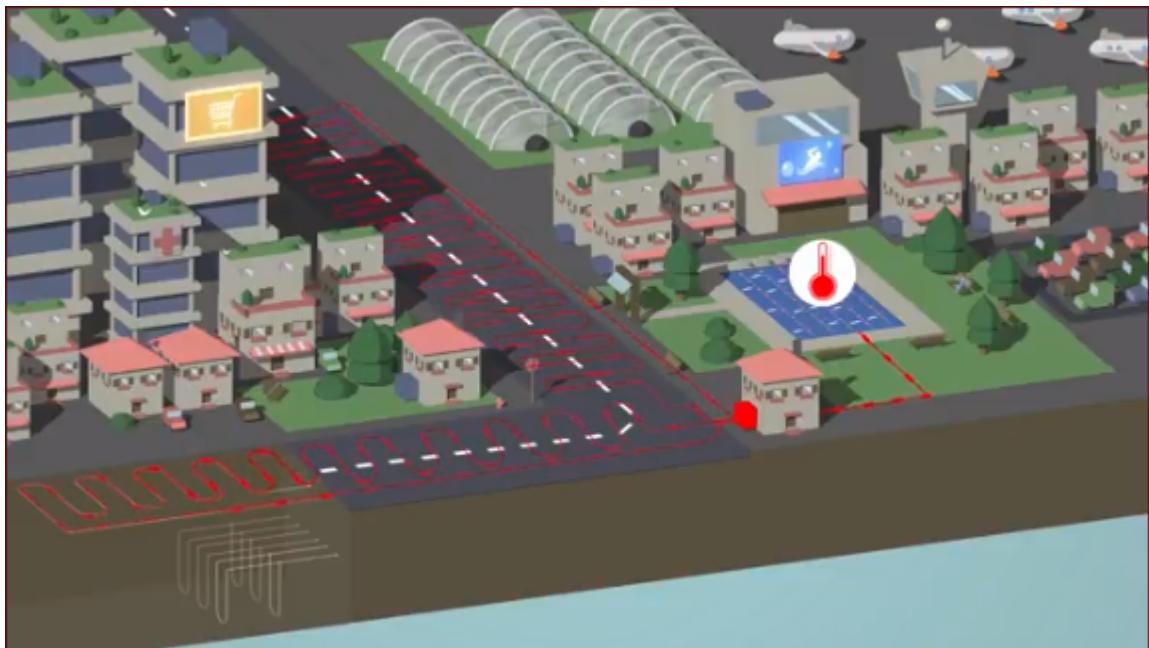


FIGURE 3: Chauffage avec Power Road

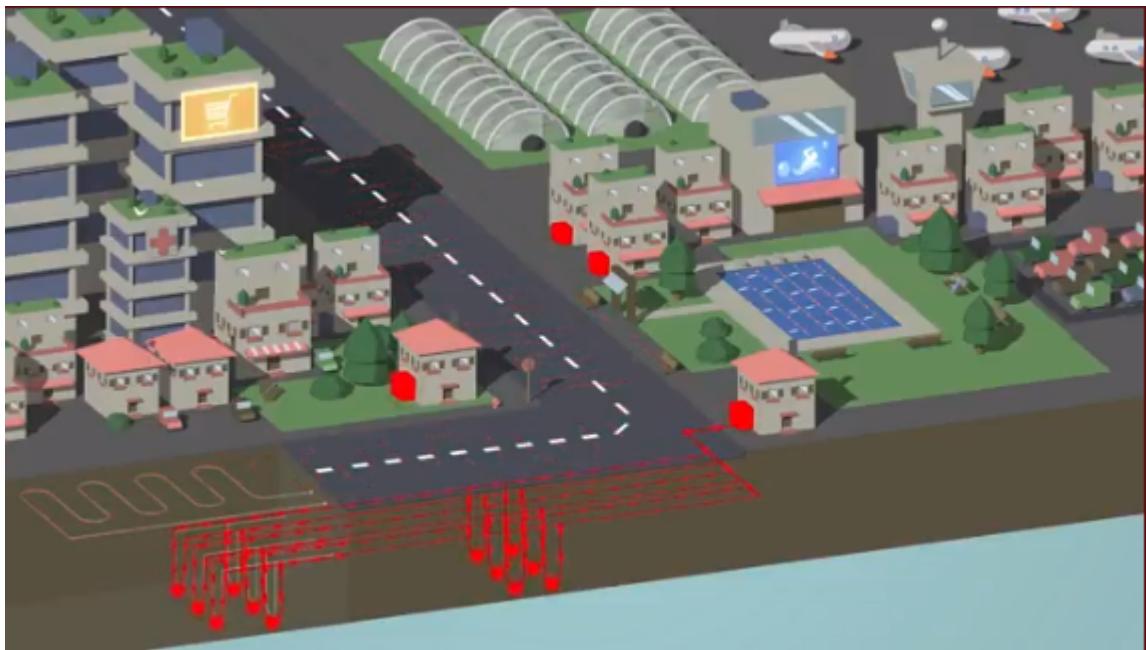


FIGURE 4: Réduction des îlots de chaleur

- **Projet Pavirex**

Initié par Eiffage, le projet Parvirex a pour but de produire de l'énergie thermique grâce aux routes. L'énergie solaire des routes est captée via un serpentin implanté dans le revêtement routier. Même principe que le projet Power Road.[14]

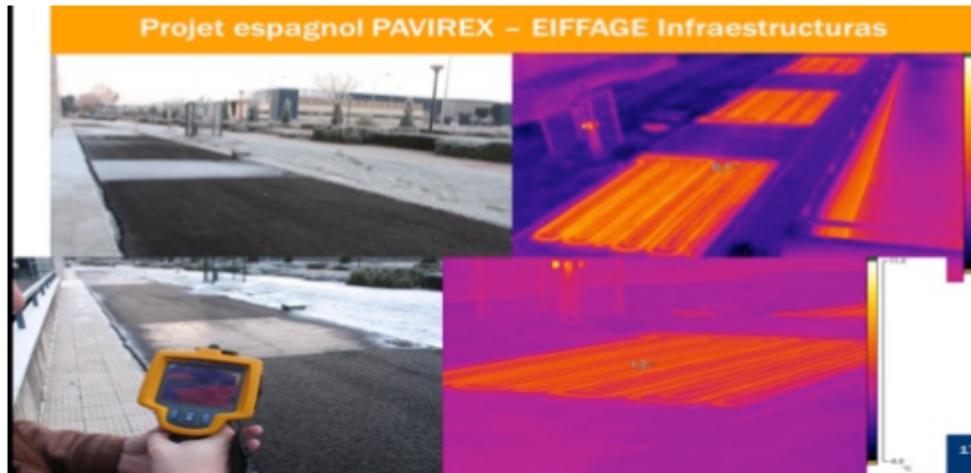


FIGURE 5: Réduction des îlots de chaleur



FIGURE 6: Réduction des îlots de chaleur

- **Le projet d'échangeur Dromotherme**

Développé par le CEREMA, le projet Dromotherm vise à récupérer l'énergie thermique des chaussées jouxtant les bâtiments via la mise en œuvre d'échangeurs thermiques routiers poreux baptisés Dromothermes, à la stocker à la base des bâtiments, et à l'utiliser pour les besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire (ECS) via la mise en œuvre de pompes à chaleur et de réseaux basse température.

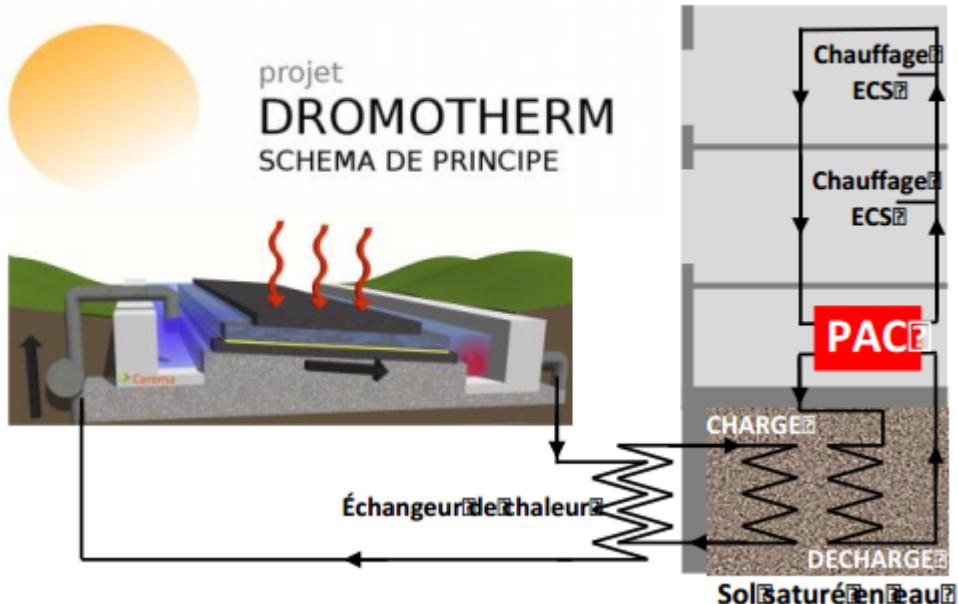


FIGURE 7: Schéma de principe du projet DROMOTHERM

2.1.2 Routes récupératrice d'énergie avec du photovoltaïque

Une autre technique de production d'énergie à partir des routes est l'utilisation du photovoltaïque sur ces dernières. Le projet le connu est le projet WattWay de COLAS.

Projet Wattway

Développé par COLAS et l'INES, le projet Wattway est le premier revêtement routier photovoltaïque au monde. A la fois très fines et résistantes, les dalles photovoltaïques sont collées sur le revêtement existant des routes, pistes cyclables, parkings, etc., sans qu'il soit nécessaire de réaliser de grands travaux de génie civil. Wattway présente l'avantage de produire de l'énergie électrique sans empiéter sur les surfaces agricoles et les paysages naturels.

Chaque dalle est composée de cellules photovoltaïques classiques qui transforment l'énergie solaire en électricité. Extrêmement fragiles, ces cellules sont enrobées

dans un substrat multicouche composé de résines et de polymères, suffisamment translucides pour laisser passer la lumière du soleil et assez résistants pour supporter la circulation de véhicules [12].



FIGURE 8: Piste cyclable Wattway

2.2 Comparaison des différents projets

Les différents projets (hormis le projet Dromotherm) présentés précédemment ont quelques faiblesses. En effet, ces concepts sont peu adaptés au milieu urbain :

- les effets de masque limitent sensiblement l'intérêt du déploiement de capteurs photovoltaïques routiers en ville ;
- intégration de tuyaux dans l'enrobé rajoute un surcoût à la construction et complexifie l'exploitation et l'entretien des chaussées.

Le projet Dromotherm contrairement aux autres, présente l'avantage de ne reposer que sur l'utilisation des matériaux usuels de construction des chaussées.

Dans la suite, nous nous intéressons plus particulièrement à décrire le système utilisé par le projet Dromotherm sur lequel se déroule nos travaux.. Nous allons décrire les différents composants du système. Ensuite, nous présenterons les différentes modélisations des composantes du projet Dromothermr. Enfin, nous ferons un bilan de l'étude bibliographique.

3 Les composantes du système utilisé dans le projet Dromotherm

Le projet Dromotherm vise à produire de l'énergie thermique grâce au couplage d'un échangeur routier dit Dromotherm, un stockage géothermique et les bâtiments.

3.1 L'échangeur routier Dromotherm

3.1.1 Description

L'échangeur routier est un dispositif de chaussée fondé sur l'utilisation d'une couche de liaison en enrobés bitumineux poreux permettant la circulation de fluide caloporteur sous écoulement gravitaire (dévers, pente longitudinale).

Un prototype (figure 9) de l'échangeur routier a été réalisé en laboratoire. Il s'agit d'une maquette tricouche de dimensions $0.8 * 1 \text{ m}^2$ constitué de haut en bas :

- Une couche de roulement en béton bitumineux semi-grenu (BBSG) d'épaisseur 6cm ;
- une couche de liaison d'enrobé drainant (béton bitumineux drainant (BBDr) 0/14 de 8 cm d'épaisseur ;
- une couche de base d'enrobé à module élevé(EME) de 5 cm d'épaisseur[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.Une pompe de relevage prélève le fluide du réservoir aval et le réinjecte dans le réservoir amont[1].

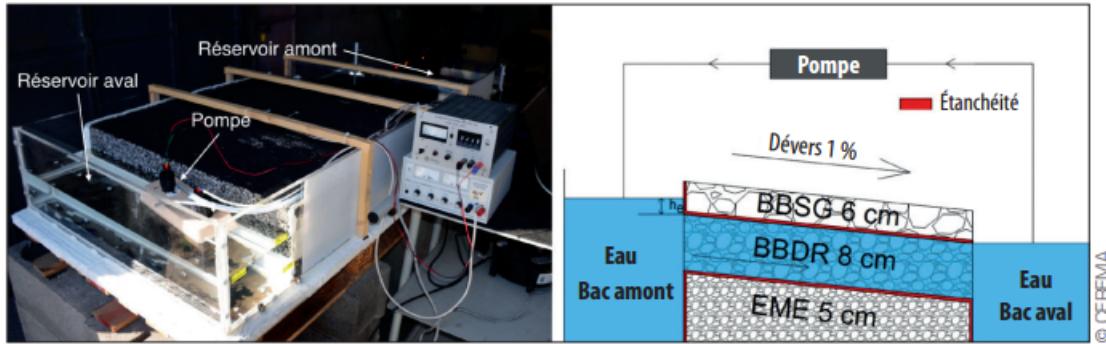


FIGURE 9: Maquette de laboratoire et son principe d’expérimentation hydraulique [1]

3.1.2 Rôles de l’échangeur Dromotherm

Il permet d’assurer une fonction de récupération d’énergie en été et une fonction de chauffage en hivers (figure 10).

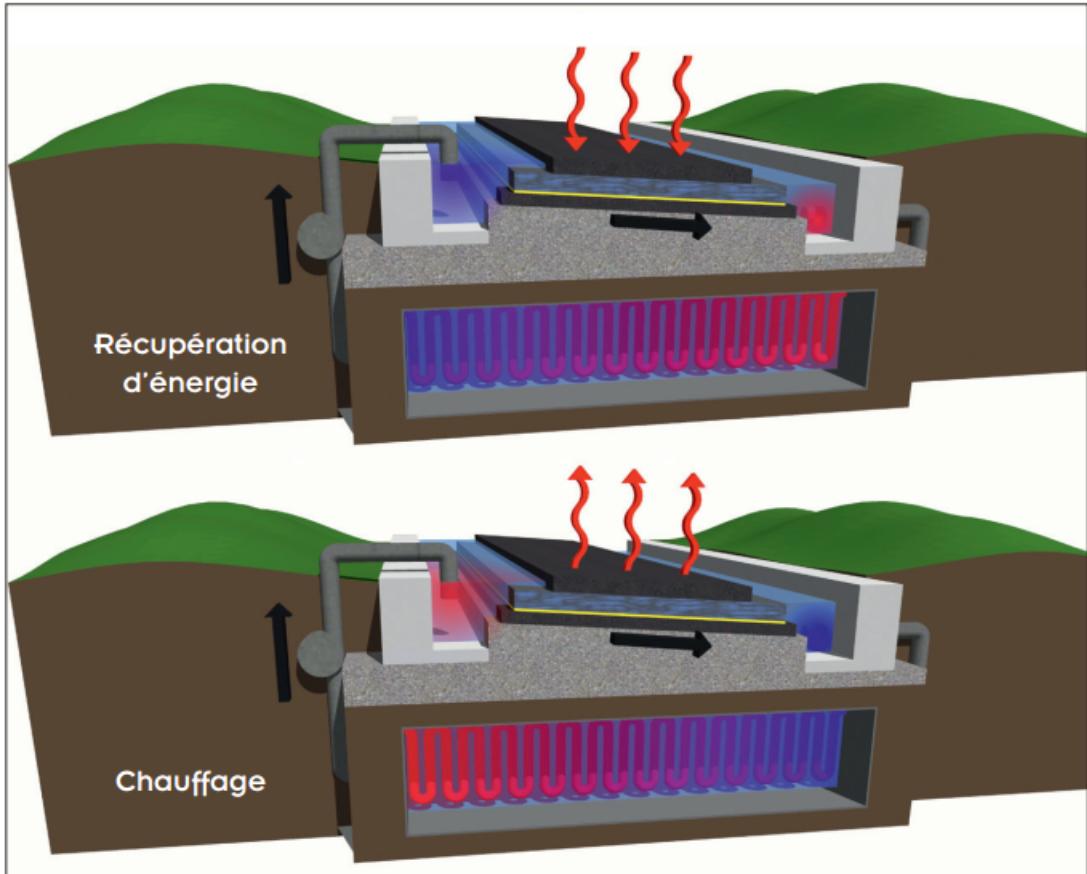


FIGURE 10: Fonction de récupération et de chauffage de l'échangeur routier[1]

3.2 La géothermie

L'énergie géothermique est une source d'énergie renouvelable particulièrement attractive notamment en raison des faibles taux d'émission de gaz à effet de serre associés. Pour répondre au processus de transition énergétique, les systèmes d'exploitation des réservoirs géothermiques peu à très profonds se sont développés lors des dernières décennies[7]. Ainsi, on distingue deux catégories de géothermie : la géothermie à haute température et la géothermie à basse température.

3.2.1 La géothermie haute température

La température d'exploitation dépasse 150C. En général ce type de géothermie concerne les centrales de production d'électricité. L'ordre de grandeur des forages pour ce type d'installation est de 1500m à 4000m.

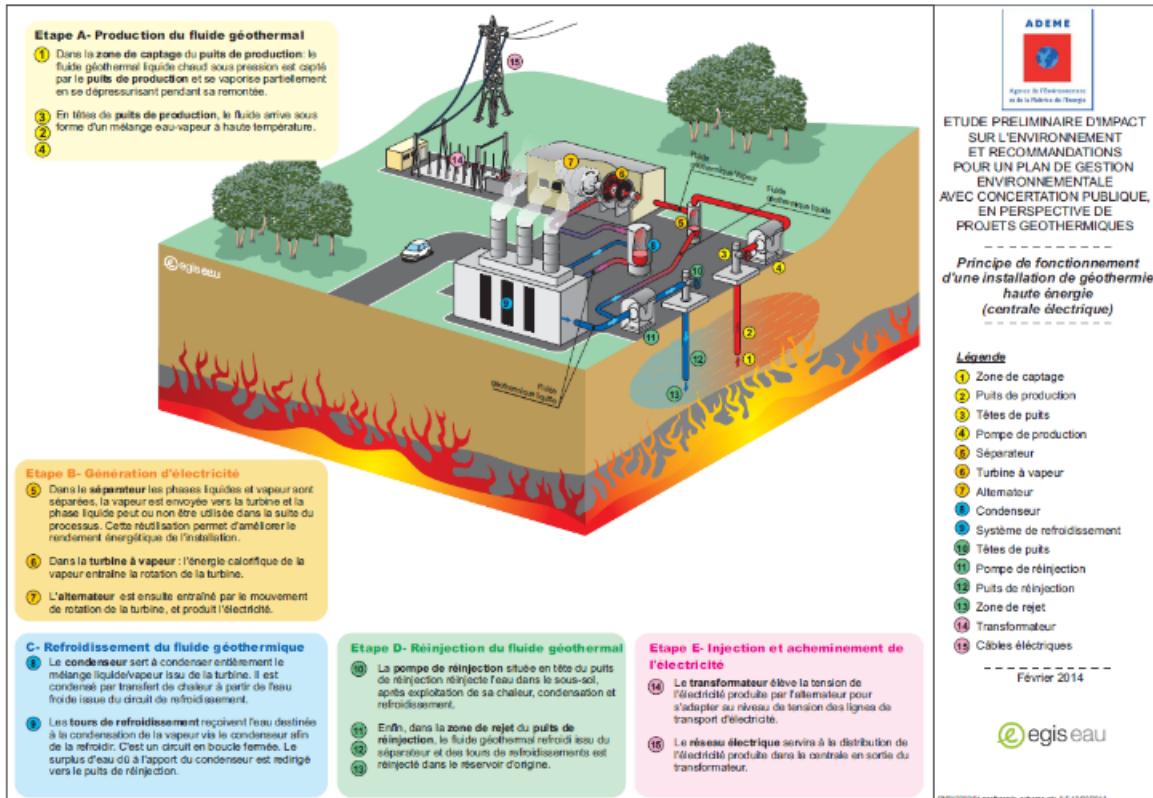


FIGURE 11: Centrale géothermique

3.2.2 La géothermie (très) basse température

Les températures sont beaucoup plus faibles et tournent autour de 10C à 30C et les profondeurs de forage sont inférieures à 200m. Les faibles températures imposent l'utilisation d'une pompe à chaleur (PAC) pour permettre une restitution de chaleur suffisante. C'est pourquoi il parfois évoqué le terme de géothermie assistée par pompe à chaleur. Pour alimenter les PAC en énergie du sous-sol, il est nécessaire d'utiliser des capteurs ou échangeurs géothermiques.

Les travaux durant ce stage se feront sur la géothermie basse température.

3.2.3 Les capteurs géothermiques

Les échangeurs thermiques les plus utilisés actuellement sont les sondes verticales, et en France les échangeurs horizontaux. Ces derniers sont beaucoup moins utilisés en Europe, et moins encore aux Etats-Unis.

La plupart des sondes verticales sont composées d'un ou de deux tube(s) en forme de U, insérées dans un forage dont la profondeur classique varie de cent à deux-cent mètres. Cette technique permet de profiter de températures de sous-sol relativement élevées ; mais les forages initiaux sont coûteux. Selon l'ADEME et le BRGM , la puissance récupérée est de l'ordre de 50 W/m.

Les capteurs horizontaux sont enfouis sous la surface du sol, dans la zone hors-gel. Les profondeurs typiques d'installation sont de soixante à cent vingt centimètres. Il faut compter avec une puissance thermique de l'ordre de 15 'a 20 W pour un mètre linéaire de tube posé.

Mikael Philippe (cité par Xavier MOCH dans sa thèse de doctorat[8]) évoque également les échangeurs compacts ou corbeilles géothermiques . Il s'agit de compromis entre la solution verticale , considérée efficace et coûteuse, et la solution horizontale , considérée moins efficace mais également moins coûteuse.[8]

Selon la société Ryp-Terra, fabriquant des corbeilles, chaque corbeille permet de capter entre 1 260 et 2 160 kWh/an. La quantité maximale d'énergie qui peut être extraite varie selon la nature du sol : 1 260 kWh/an pour un sol sec, 1 800 kWh/an pour un sol humide et 2 160 kWh/an pour un sol saturé d'eau.

Nous donnerons dans la suite une description plus approfondie des corbeilles géothermiques, faisant partie du système utilisé dans le projet DROMOTHERM.

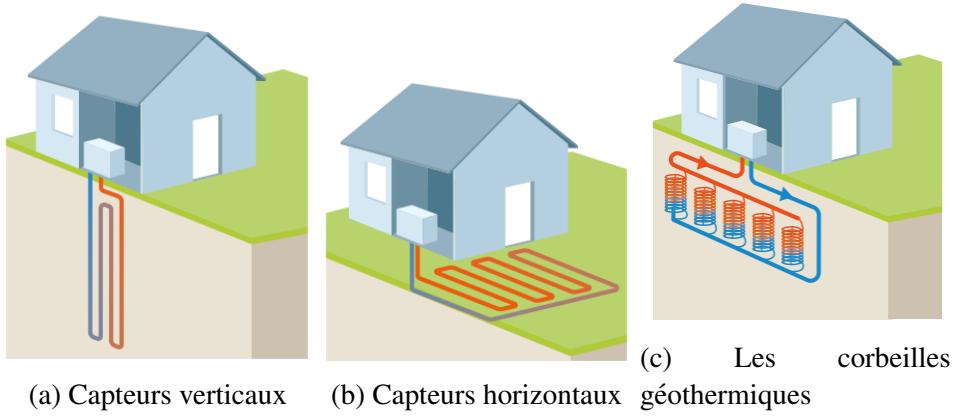


FIGURE 12: Les capteurs géothermiques [10]

3.2.4 Les corbeilles géothermiques

Encore appelée échangeur géothermique hélicoïdal, il s'agit d'un tube, généralement en cuivre ou en polyéthylène, qui s'enroule en hélice. Le résultat a une forme conique ou cylindrique. On peut le caractériser par sa hauteur totale, l'évolution de son rayon selon la hauteur, et le pas entre spires consécutives. Ces indications sont suffisantes pour déduire la longueur totale de tube enroulé[8].

Ces échangeurs peuvent être mis en série ou en parallèle. Chaque échangeur ou chaque série d'échangeurs est relié(e) à des collecteurs, afin d'équilibrer les débits. Les collecteurs disposent de vannes de débit, grâce auxquelles il est possible de modifier les pertes de charge, et de finir d'équilibrer les débits si besoin est[8]. Ces collecteurs sont eux-mêmes reliés à la pompe à chaleur dont nous décrirons un peu plus loin le fonctionnement.



FIGURE 13: Corbeille en cuivre, sur le site du BRGM (Orléans)[8]

3.2.5 Les systèmes de stockage géothermique

Le stockage géothermique est l'une des technologies les plus prometteuse de stockage inter saisonnier. On a quatre types de stockage (figure) : 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) [2].

- **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[2].

- **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 . 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[2].

C'est ce système de stockage que nous utiliserons dans le cadre de nos travaux sur le développement du démonstrateur.

- **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. 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 aquifères, circule dans la chaussée où elle se refroidit pour être ensuite réinjectée dans l'aquifère. L'aquifère est utilisé comme stockage saisonnier à basse température avec une plage de température comprise entre 10 et 50 °C [2].

- **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. En raison de la faible capacité de charge et de décharge, une mémoire tampon (réservoirs d'eau) est intégrée dans le système[2].

Le tableau ci-dessous fait une comparaison entre ces différents systèmes de stockage géothermique.

TABLE 1: Comparaison entre les différents types de stockage

Type de stockage	Réservoir	Fosse graviereau	Nappe phréatique	Puits
Capacité de stockage	60 à 80 kWh/m ³	60 à 80 kWh/m ³	30 à 40 kWh/m ³	15 à 30 kWh/m ³
Volume de stockage (en eau équivalent)	1 m ³	1.3 à 2m ³	2 à 3m ³	3 à 5m ³
Conditions géologiques requise	Sol stable (pas de tassement). De préférence sans eau souterraine. Profondeur 5 15 m	Sol stable (pas de tassement). De préférence sans eau souterraine. Profondeur 5 15 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 m.

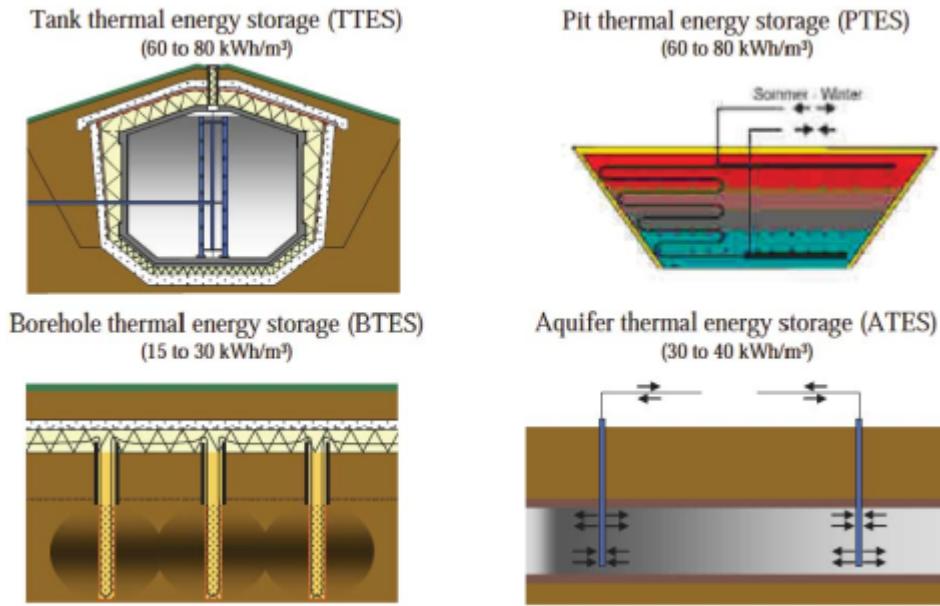


FIGURE 14: Types de stockage géothermique[2]

3.2.6 Pompe à chaleur (PAC)

La pompe à chaleur permet d'exploiter les calories du sol et de les transformer en chaleur ou en froid. Elle est composée de plusieurs éléments dont les quatre principaux sont l'évaporateur, le compresseur, le condenseur et le détendeur[10].

LE CYCLE THERMODYNAMIQUE D'UNE POMPE À CHALEUR

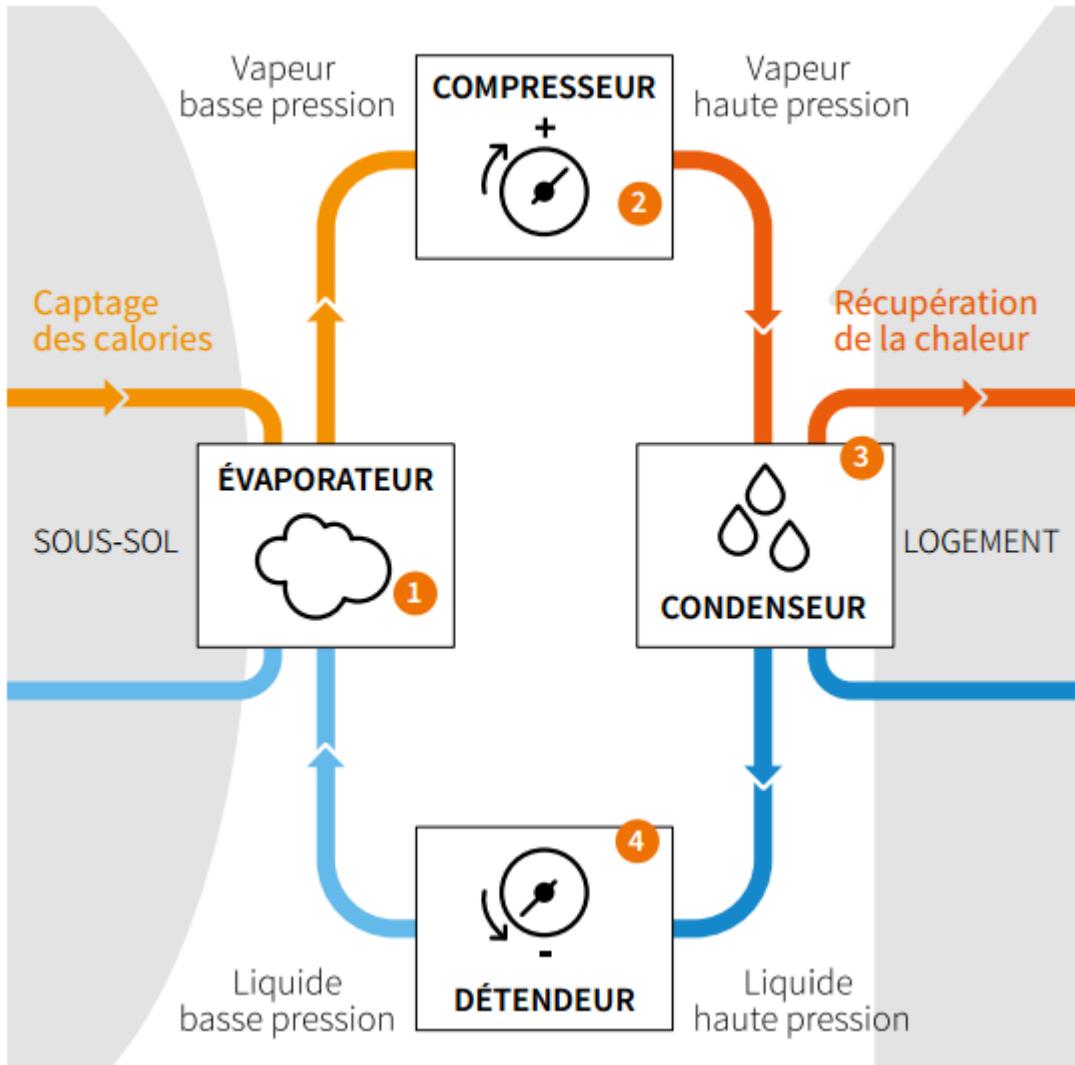


FIGURE 15: LE CYCLE THERMODYNAMIQUE D'UNE POMPE À CHALEUR[10]

1. **Évaporation** : Le fluide frigorigène est évaporé à basse pression et à basse température, en utilisant l'énergie de la source de chaleur (capteur horizontal, capteur vertical ou forage sur eau de nappe)[10].
2. **Compression** : La vapeur du fluide frigorigène est comprimée à une pres-

sion supérieure au moyen du compresseur électrique, ce qui entraîne une élévation de la température[10].

3. **Condensation :** La vapeur du fluide frigorigène à haute pression est condensée à haute température puis la chaleur dissipée dans l'émetteur (plancher chauffant, radiateurs, ventilo-convection, etc.)[10].
4. **Détente :** Le fluide frigorigène liquide est détendu depuis une pression élevée à une pression basse. Il s'en suit une chute de la température, et le cycle recommence[10].

La pompe à chaleur est caractérisé par une coefficient appelé Coefficient de Performance (COP). Le COP représente le rapport entre la quantité d'énergie produite et la quantité d'énergie utilisée par cette pompe[2] En géothermie, d'après le rapport technique du Projet Ground Reach sur les pompes à chaleur géothermiques (cité dans [8]), les COP habituels varient de 3,5 'a 5,0.

3.3 L'habitat (Les bâtiments)

Selon l'ADEME[11],en 2012 le secteur du bâtiment (résidentiel-tertiaire) représente 44 % (68,7 Mtep) de l'énergie finale consommée en France, loin devant le secteur des transports (31,3 %).

La figure suivante montre la répartition de la consommation finale du secteur du bâtiment par types d'énergie.

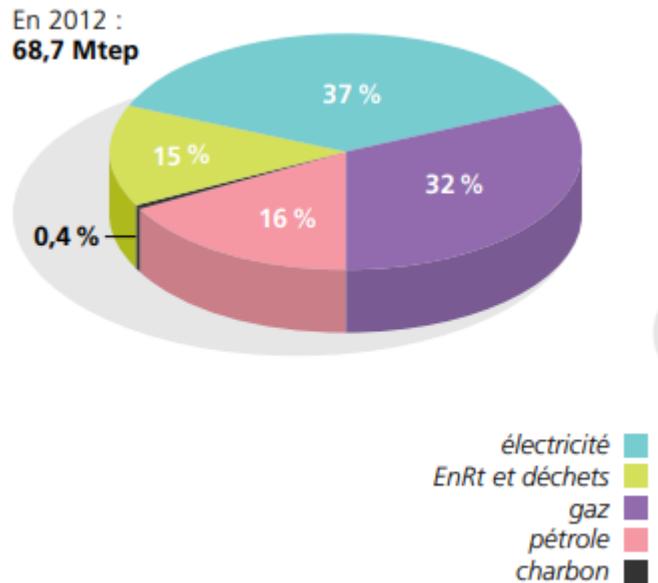


FIGURE 16: Répartition de la consommation d'énergie finale du bâtiment par type d'énergie[11]

Les énergies renouvelables et la valorisation des déchets représentent près de 15 % de la consommation totale. Des projets de valorisation des EnR (comme le projet DROMOTHERM) dans ce secteur viendront hausser davantage ce chiffre. Selon toujours l'ADEME, toujours en 2012, les énergies les plus utilisées pour le chauffage dans le résidentiel sont le gaz (44 %), l'électricité (33,5%) et le fioul (14%).

Quant à l'eau chaude sanitaire (ECS), il s'agit de l'électricité (46,5%), du gaz (38,4%) et du fioul (9%).

Il aussi important de noter que le secteur du résidentiel fait partie des principaux émetteurs de CO₂ avec près de 22% de l'émission totale en 2011 (352 Mt) ADEME2. Après avoir décrit les généralités sur les différents composants du système mis en oeuvre dans le projet DROMOTHERM, nous présentons dans ce qui suit les différentes modélisations de ces composants que sont l'échangeur routier, le stockage géothermique et le bâtiment.

4 Les modélisations existantes des différents composants du projet DROMOTHERM

4.1 Modelisation hydro-thermique de la chaussée

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].

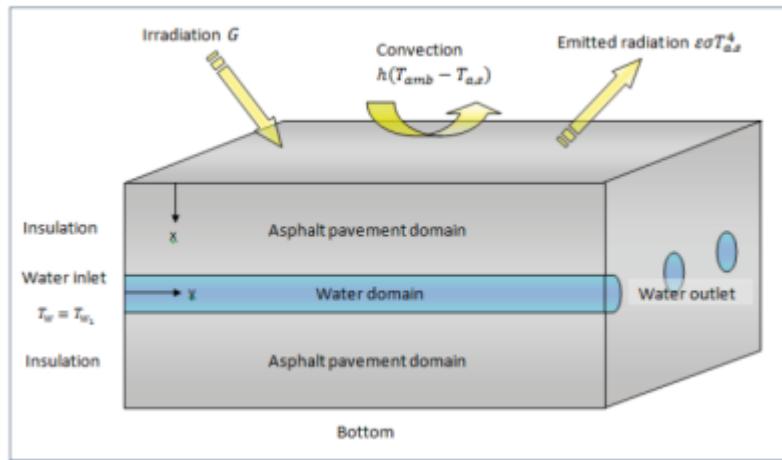


FIGURE 17: Procédé de transfert de chaleur[2]

- **La conduction thermique :** 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 :

$$q = -\lambda \cdot \nabla T \quad (4.1)$$

Avec :

q : le flux de chaleur par conduction (W/ m²);

λ T la conductivité de la chaussée (W/mK)

∇T : gradient de température (K/m).

- **La convection thermique :** 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 échangeur routier : une entre la surface de la chaussée et de l'air au-dessus, et l'autre entre le fluide en circulation et la couche de liaison poreuse. Le flux de chaleur par convection est exprimé par la relation[2] :

$$\mathbf{q} = -\mathbf{hA}(\mathbf{T}_s - \mathbf{T}_{inj}) \quad (4.2)$$

où

h est le coefficient de convection de la surface ($\text{W/m}^2\text{K}$) 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 ($^\circ\text{C}$) ;

T_{inj} est la température de fluide ($^\circ\text{C}$) ;

- **Le rayonnement thermique émis par la surface de la chaussée :** L'émissivité 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 [2] :

$$\mathbf{q}_r = \sigma \varepsilon (\mathbf{T}_s + 273.15)^4 \quad (4.3)$$

Avec :

q_r : le rayonnement émis par la surface (W/m^2)

σ la constante de Stephan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$)

ε : l'émissivité de la surface de la chaussée

- **Rayonnement thermique absorbé de l'atmosphère :** Outre les radiations émises, la surface de la chaussée absorbe également les rayonnements infrarouge provenant de l'atmosphère [2]

$$\mathbf{R}_{atm} = \sigma \varepsilon (\mathbf{T}_{ciel} + 273.15)^4 \quad (4.4)$$

Avec

$$\mathbf{T}_{ciel} = \mathbf{T}_{air} \left(0.8 + \left(\frac{\mathbf{T}_{rose} + 273.15}{250} \right)^{0.25} \right) \quad (4.5)$$

où

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

T_{ciel} est la température du ciel ($^{\circ}C$);
 T_{rose} est la température du rosée ou point de rosée ($^{\circ}C$).

- **Le rayonnement solaire :** 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. Le rayonnement solaire absorbé par la chaussée est donné par la relation[2] :

$$\mathbf{q}_s = (1 - \alpha) \mathbf{q}_i \quad (4.6)$$

Avec

q_s : le rayonnement absorbé par la surface (W/m^2);

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

α l'albédo.

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 17).

Equation de conservation d'énergie :

- dans la chaussée (sauf la couche poreuse) :

$$(\rho C_p)_s \frac{\partial T_{ch}}{\partial t} + \nabla(-\lambda_s \nabla T_{ch}) = 0 \quad (4.7)$$

- dans la couche poreuse

$$(\rho C_p)_s \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho C_p)_f V \frac{\partial T_f}{\partial t} + \nabla(-(\lambda_s + \phi \lambda_f) \nabla T_f) = 0 \quad (4.8)$$

Où :

$(\rho C_p)_s$ est la capacité thermique volumique de l'eau ($J/m^3 K$);

$(\rho C_p)_f$ est la capacité thermique volumique de l'eau ($J/m^3 K$);

T_{ch} est la température de la chaussée ($^{\circ}C$);

T_f est la température de l'eau circulant dans le tube ($^{\circ}C$);

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

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

V est la vitesse de circulation de leau (m/s).

A ces équations, s'ajoute la loi de Darcy donnant l'expression du débit d'un fluide en milieu poreux par[9] :

$$Q = AK \frac{H_1 - H_2}{L} \quad (4.9)$$

Où :

Q est le débit volumique du fluide ;

A est l'aire des supports poreux normale à l'écoulement ;

L est la longueur du trajet d'écoulement ;

H_1 et H_2 désignent respectivement les pressions hydrauliques amont et aval.

Conditions de bords : Les conditions sont résumées sur le schéma suivant :

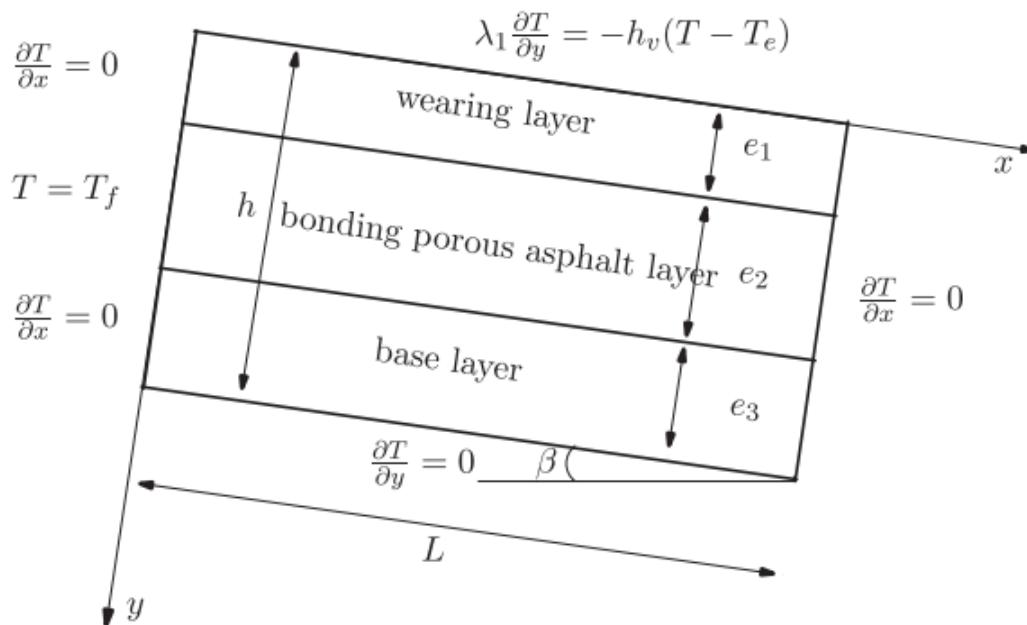


FIGURE 18: Les conditions de bords[?]

Les performances énergétiques de l'échangeur thermique routier Dromotherme ont fait l'object d'une expérimentation dans le cadre de la thèse de S. Asfour.

4.2 Expérimentation des performances énergétiques de l'échangeur Dromotherm

Les expérimentations ont été faites par la mise en place d'un démonstrateur de chaussée chauffante à couche de liaison poreuse réalisé à échelle 1 sur le site de l'EATP(École d'Application des Travaux Publics) d'Égletons soumis aux conditions climatiques naturelles mais non soumise au trafic.

4.2.1 Description du démonstrateur

Le démonstrateur (figure 19) est constitué de :

- La chaussée, d'une longueur de 50 m et d'une largeur de 4 m, de pente nulle et de dévers 2 %,est constituée de trois couches : la couche de liaison est un enrobé drainant reposant sur une chape d'étanchéité de type ouvrages d'art pour la partie où circule le fluide , la zone témoin sans fluide n'ayant pas d'étanchéité.
- L'instrumentation est constituée de jauge de température placées dans les bacs amont et aval, ainsi que sur des profils verticaux situés dans la chaussée en parties amont, médiane et aval de l'écoulement.

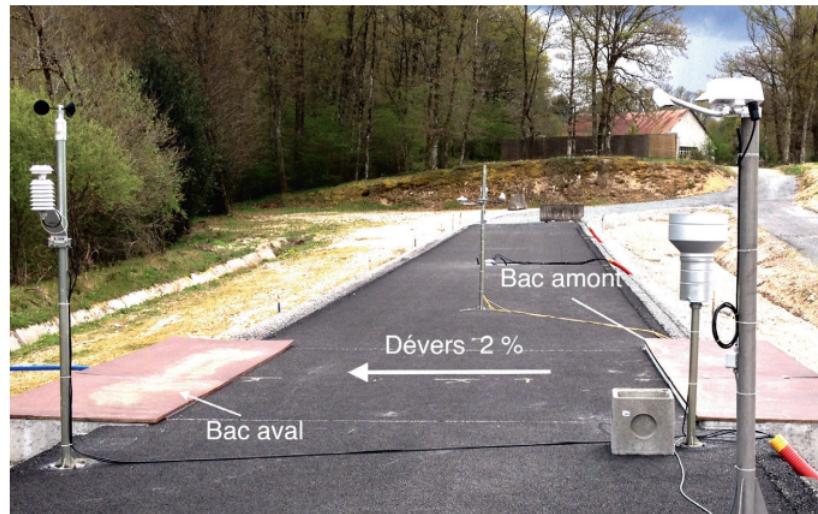


FIGURE 19: Démonstrateur d'Égletons[1]

un logiciel de pilotage du démonstrateur (Figure 20) permet d'injecter dans la couche de liaison un fluide (eau) à une température déterminée

tout en régulant son débit. Il assure ainsi l'acquisition des paramètres de la chaussée (température, état de surface, débit du fluide) et des paramètres atmosphériques.

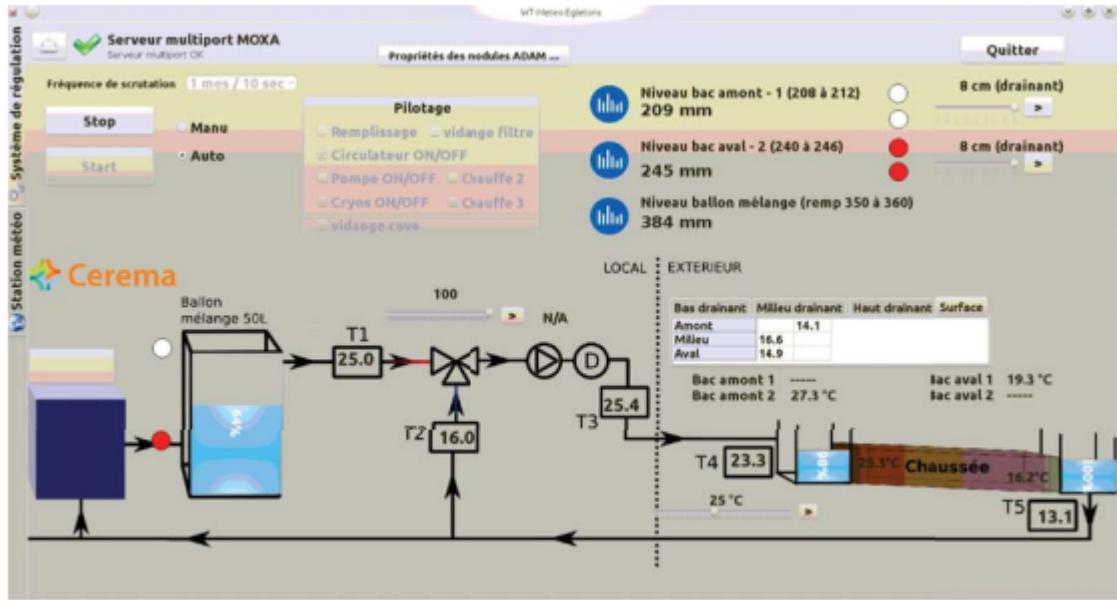


FIGURE 20: Logiciel de pilotage du démonstrateur[1]

4.2.2 Évaluation du dispositif en période neigeuse

Un épisode neigeux a eu lieu sur le site du démonstrateur le 18 janvier 2016 entre 9 h 30 et 20 h 30.



© CEREMA

FIGURE 21: Prise de vue pendant l'épisode neigeux du 18 janvier 2016.[1]

Les différents profils de températures ont été tracés lors de cette expérience :

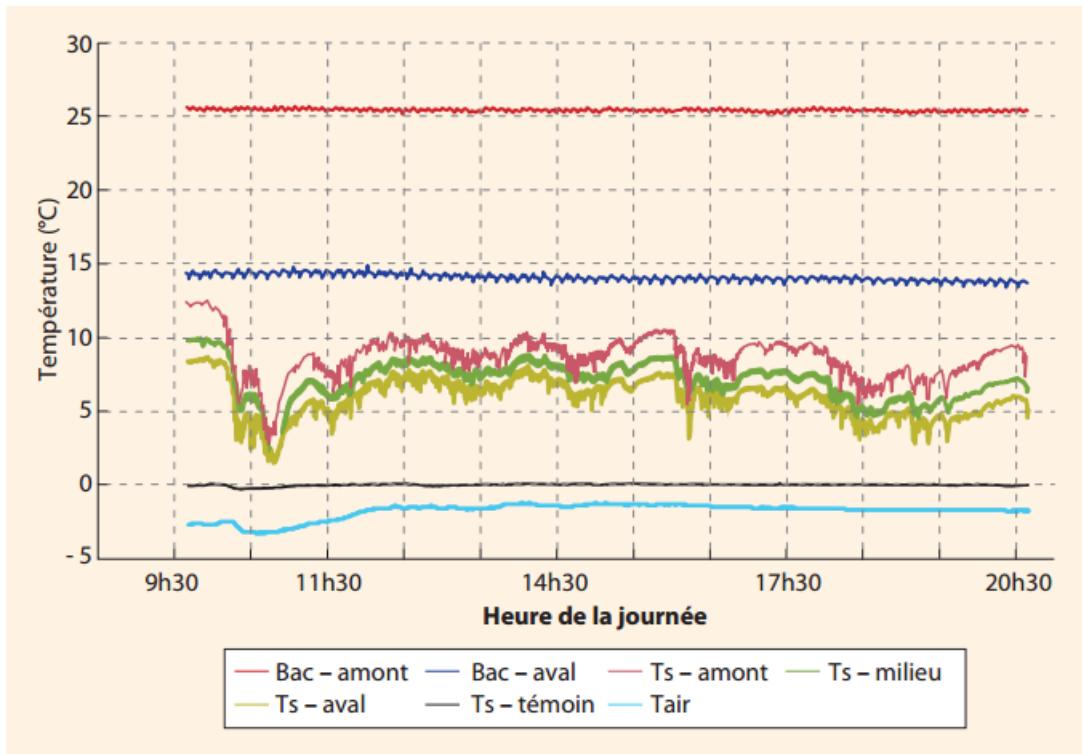


FIGURE 22: Profils des températures[1]

Ces profils de températures montrent une perte de température du fluide d'environ 10 C entre le bac amont et le bac aval. On déduit de la perte de température du fluide et du débit d'écoulement une énergie de chauffage transférée vers la chaussée de 92 MJ sur 11 h soit, pour les 16 m² de la zone soumise au test, une puissance moyenne développée de 145 W/m² suffisante pour la fonte de la neige.

4.2.3 Evaluation du dispositif en période estivale

Les mesures ont été relevées entre les 10 et 28 juillet 2015 afin d'étudier le gain de température du fluide lorsqu'il circule à travers la chaussée entre l'amont et l'aval.

Au cours de cette période, le rayonnement solaire a atteint certains jours plus de 1 000 W/m².

Les mesures relevées au cours de cette périodes sont présentée ci-après :

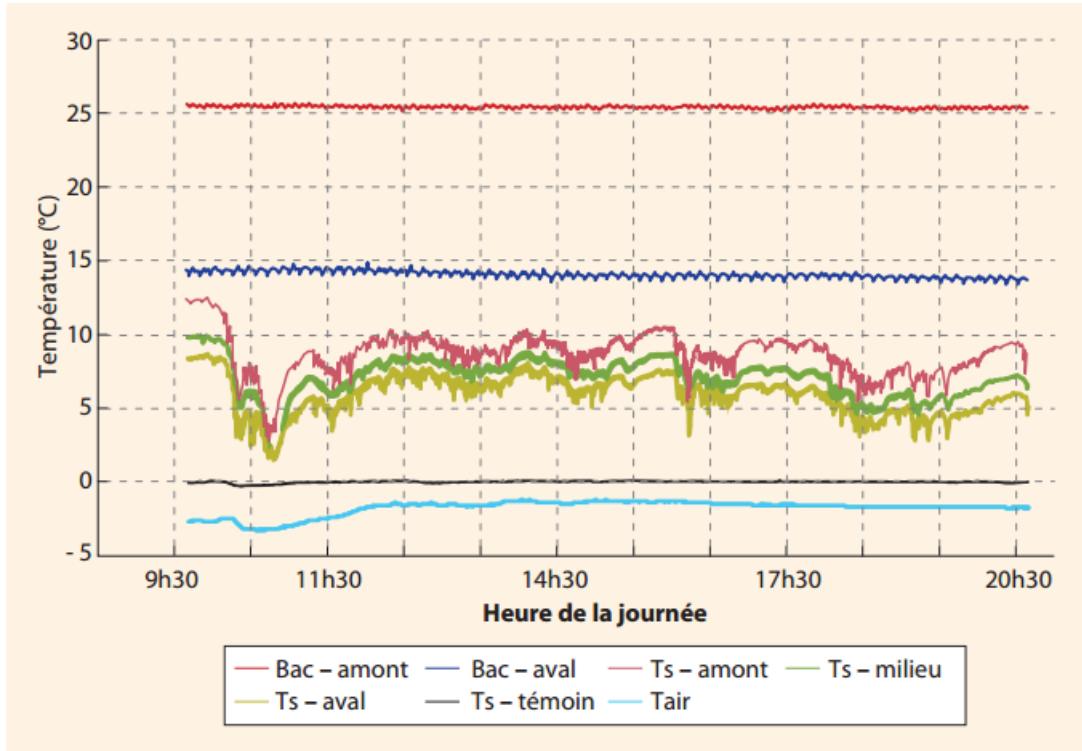


FIGURE 23: Profils des températures[1]

Le fluide est injecté à un débit de 50 l/h. L'énergie récupérée par le fluide est de 130 MJ/m². L'énergie solaire reçue par la surface soumise au test est de 400MJ/m². Soit un taux de récupération de 32% .

4.3 Modelisation existante du stockage géothermique

Xavier MOCH dans le cadre de sa thèse (Cf [8]), a procédé à une modélisation du sous-sol qui servira de stockage géothermique. En effet, il a considéré le sous-sol comme étant à la fois résistif et capacitif et à procéder à une analogie électrique avec les circuits RC comme suit :

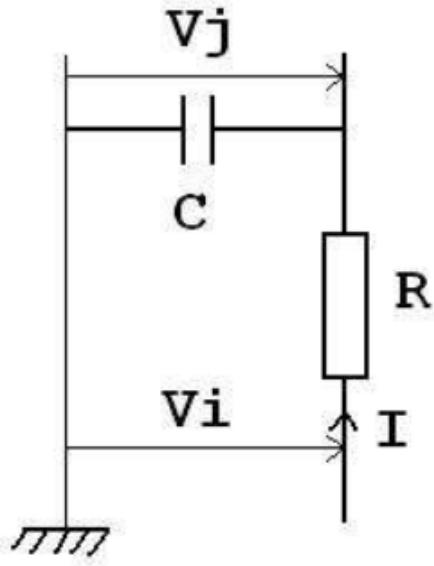


FIGURE 24: circuit RC série [8]

Les analogies sont les suivantes :

1. La masse électrique correspond à la température sans perturbation du sous-sol
2. Les tensions V correspondent aux déficits de température
3. L'intensité I correspond au flux total ϕS
4. La résistance R correspond à la résistance thermique $\frac{e}{\lambda s}$
5. La capacité C correspond à la capacité thermique $\rho C_p S e$

4.4 Modelisation du bâtiment

4.4.1 Les modèles existants

La modélisation thermique du bâtiment est un préalable au calcul des besoins énergétiques pour la simulation ou la prédiction[3]. Il existe de nombreuses méthodes pour prévoir la consommation des bâtiments. Ce paragraphe présente un inventaire de celles présentes dans la littérature et un aperçu des avantages et des inconvénients de chacune d'elles. Les modèles peuvent-être regroupés en trois catégories (Tableau 2) qui diffèrent par l'approche utilisée (Li et Wen cité par [3])

- **modèles « boîte noire »** : ce sont des modèles empiriques construits sur la base de mesures et des relations entrées/sorties, ils nécessitent des mesures sur une grande période pour s'entraîner etêtre capable de prédire le comportement du bâtiment dans plusieurs conditions. C'est la phase d'apprentissage, le domaine de validité du modèle ne peut s'étendre au-delà des données d'entrée ayant servies à celle-ci[3].
- **modèles « boîte blanche »** : La modélisation complète d'un bâtiment (« boite blanche » ou « modèle de connaissance ») permet de prévoir ses besoins thermiques. Cela nécessite de connaitre avec précision la composition des parois et les mètrées (Da silva, 2011, cité dans [4]), ce qui n'est pas toujours facilement accessible. De plus, il est souvent nécessaire de regrouper les pièces en zones thermiques homogènes, ce qui oblige à prendre des hypothèses fortes et à disposer de bonnes connaissances du comportement thermique du bâtiment. Même avec un tel modèle précis du bâtiment, les besoins thermiques simulés sont souvent éloignés de la réalité, ce qui oblige à caler certains paramètres du bâtiment pour mieux représenter la réalité (Bertagnolio, 2012, cité dans [4]). Une fois le modèle « boite blanche » du bâtiment réalisé, il est possible de prévoir les besoins thermiques du bâtiment par simulation. Il faut tout de même avoir la possibilité de prévoir les entrées du modèle comme les données climatiques (température, ensoleillement), les profils d'occupation et connaitre les consignes (température et ventilation).Un autre point négatif des modèles « boite blanche » est le temps de calcul. En effet, environ 10 minutes de calcul sont nécessaires à un ordinateur de bureau pour simuler une année entière au pas de temps 6 minutes (contre environ 0.01 seconde pour un modèle simplifié type « RC »)[4].
- **modèles hybrides dits « boîte grise » ou de type RC** correspondant à une modélisation semi-physique lorsque le modèle de connaissance est imparfait. Ils prennent en considération à la fois les connaissances et les mesures tout en restant de taille réduite pour un meilleur compromis avec l'application de contrôle. Ces modèles combinent les avantages de l'intelligibilité d'un modèle « boîte blanche » avec la souplesse d'un modèle ayant des paramètres ajustables et en petit nombre[3].
Ce dernier type de modèle est retenu par la suite car c'est un bon compromis évitant la complexité des modèles « boîte blanche » et nécessitant moins de mesures qu'un modèle « boîte noire »

4.4.2 La modélisation RC d'un bâtiment

Le principe de la modélisation « boite grise » est d'utiliser une représentation physique simplifiée du système étudié et d'identifier les paramètres de ce modèle afin de minimiser les erreurs de prévision. Les bâtiments peuvent être modélisés par des équations différentielles dynamiques simples représentant les phénomènes de conduction, de convection et des phénomènes capacitifs[4]. Ce modèle utilise une équivalence entre grandeurs électriques et grandeurs thermiques comme suit :

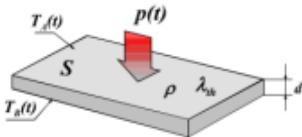
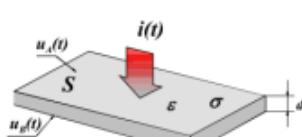
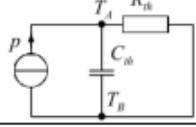
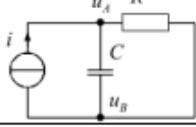
Grandesurs thermiques			Grandesurs électriques		
T	Température	[K]	U	Tension	[V]
ϕ	Densité de flux	[W/m ²]	J	Densité de courant	[A/m ²]
P	Puissance	[W]	I	Courant	[A]
Q	Quantité de chaleur	[J]	Q	Charge	[C]
λ	Conductivité thermique	[W/K.m]	σ	Conductivité électrique	[1/Ω.m]
R _{th}	Résistance thermique	[K/W]	R	Résistance électrique	[Ω]
C _{th}	Capacité thermique	[J/K]	C	Capacité électrique	[F]
					
					
$C_{th} \frac{d(T_A - T_B)}{dt} = \frac{(T_B - T_A)}{R_{th}} + p$			$C \frac{d(U_A - U_B)}{dt} = \frac{(U_B - U_A)}{R} + i$		

FIGURE 25: Analogie électrique et thermique [3]

Les différents modèles RC

Un modèle dit « RxCy » est construit à partir de « x » résistances et « y » capacités.

Le modèle R4C2 est un des modèles physiques les plus simples décrits dans la littérature. Il est souvent appelé R3C2 ou 3R2C lorsque la ventilation mécanique n'est pas variable (pour les bâtiments d'habitation). Il décompose le comportement thermique du bâtiment en deux dynamiques : l'une rapide, qui correspond à l'air intérieur et les meubles et l'autre, plus lente, qui correspond aux parois (murs, planchers, plafonds). La répartition des éléments physiques du bâtiment entre ces deux dynamiques reste floue, c'est pourquoi on parle de « boîte grise » et non de modèle physique. En plus de ces phénomènes dynamiques, le modèle R4C2 représente 3 phénomènes statiques qui sont la conduction dans les murs du bâtiment (T_m), la convection entre l'air intérieur (T_i) et les murs, et un phénomène mixte (convection, conduction et porosité) qui correspond aux vitres (inertie faible) et aux infiltrations d'air. Le débit (variable) de la ventilation mécanique est modélisé par une résistance variable qui tend vers l'infini lorsque la ventilation est éteinte. Le modèle R4C2 sert de base à la formation de 3 modèles plus complexes appelés R6C2, R6C3 et R7C3.

Le modèle R6C2 est supposé mieux prendre en compte les apports solaires. En effet, deux nœuds spécifiques (T_s et T_h) divisent les gains solaires en deux flux. Pour le flux arrivant sur les murs intérieurs, une partie impacte directement le nœud du mur et l'autre le nœud de l'air. Le ratio est déterminé lors de l'identification des paramètres R_i et R_s . Pour le flux solaire arrivant sur les murs extérieurs, une partie impacte la capacité des murs à travers l'isolation et l'autre est directement dissipée dans l'air extérieur par un phénomène de convection (à travers R_e). Le modèle R6C3 a une capacité en plus au niveau du nœud T_s . Ainsi, le flux solaire impactant les murs intérieurs n'est stocké que dans les premiers centimètres de la paroi. Cela permet de mieux modéliser les décharges rapides entre la capacité du mur et la capacité de l'air.

Le modèle R7C3 a une architecture proche du R6C2 sauf que le mur est représenté par deux capacités et résistances égales. Même si les modèles complexes représentent mieux la réalité, ils ont le désavantage d'avoir plus de paramètres à identifier[4]

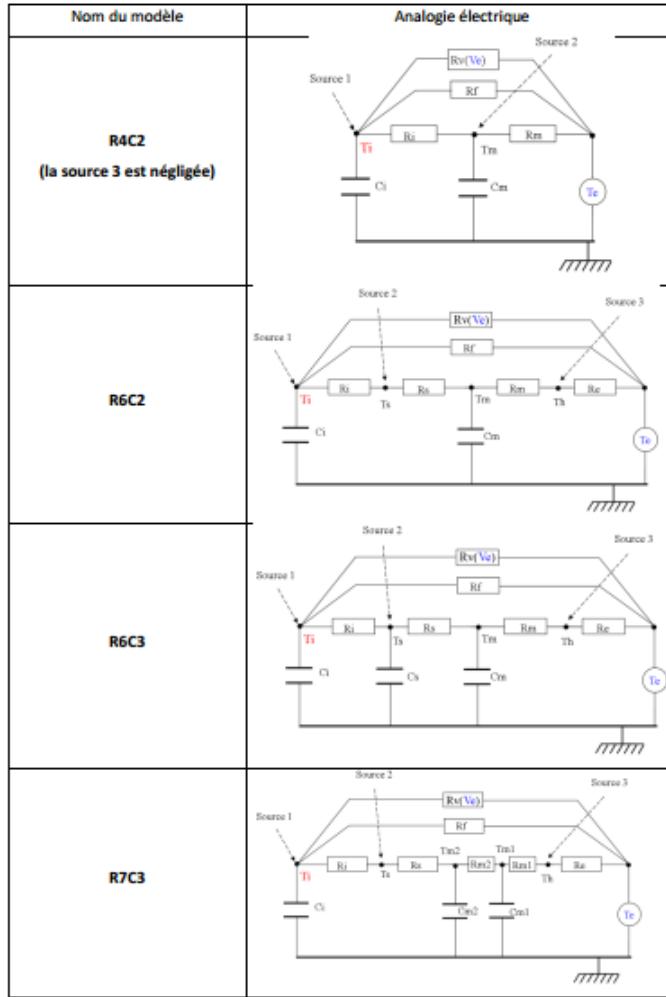


FIGURE 26: Présentation des modèles de bâtiment étudiés sous la forme d'analogie électrique [4]

5 Bilan

A travers cette étude bibliographique, nous avons parcouru la littérature existante sur les routes récupératrices d'énergie. Les différentes descriptions et modélisations présentées nous serviront dans la suite pour la représentation de l'architecture et la simulation du démonstrateur que nous allons développer dans le cadre de nos travaux.

Références

- [1] Sarah Asfour, Frédéric Bernardin,Alexandre Cuer. *Les Chaussées hors gel, récupératrices d'énergie.* Octobre-Novembre 2016.
- [2] Sarah Asfour. *Récupération d'énergie dans les chaussées pour leur maintien hors gel.* Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2016.
- [3] Hugo Viot. *Modélisation et instrumentation d'un bâtiment et de ses systèmes pour optimiser sa gestion énergétique.* Université de Bordeaux, 2016.
- [4] Thomas Berthou. *Développement de modèles de bâtiment pour la prévision de charge de climatisation et l'élaboration de stratégies d'optimisation énergétique et d'effacement.*Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2013
- [5] Dr. Daniel Pahud, *Rapport final.* Office Fédéral de l'Energie, Novembre 2007.
- [6] W. J. Eugster, *Road and Bridge Heating Using Geothermal Energy. Overview and Examples* Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterrhaching, Allemagne, 30 mai-1er juin 2007.
- [7] Jérôme De La Bernardie. *Modélisation et caractérisation expérimentale du transport de chaleur en milieu fracturé. Sciences de la Terre..* Université Rennes 1, 2017.
- [8] Xavier MOCH. *Etude théorique et expérimentale d'échangeurs géothermiques hélicoïdaux : Production de chaud et de froid et dimensionnement d'installations.* Université de Grenoble, 2013.
- [9] G. O. Brown *Henry Darcy and the making of a laws.* Oklahoma State University, 2002.
- [10] ADEME. *La géothermie pour chauffer et rafraîchir sa maison.* Novembre 2017.
- [11] ADEME. *Le Bâtiment : les chiffres clés.* Edition 2013.
- [12] <https://www.wattwaybycolas.com/la-route-solaire.html>, consulté le 06/03/2020 à 11h00
- [13] <https://www.power-road.com/> consulté le 06 mars 2020 à 11h 30.
- [14] <http://www.developpementdurable.eiffage.com/fr/preparer-l-avenir/l-innovation-au-service-du-construire-autrement>, consulté le 06/03/2020 à 11h00