



DÉVELOPPEMENT D'UN DÉMONSTRATEUR DE STOCKAGE THERMIQUE INTER-SAISONNIER COUPLÉ A UN ÉCHANGEUR THERMIQUE ROUTIER

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE ET ENERGETIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 30/09/2020 par

Fébron Lionel Prince SEVI (20170473)

**Encadrant 2iE: Dr.-Ing. habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE (HDR),
Maître Assistant CAMES**

Encadrant INSA Rouen : Prof. Frédéric Grisch, Professeur des Universités

**Maître de stage : Prof. Benoit STUTZ, Professeur au LOCIE (Université Savoie
Mont Blanc)**

**Co-encadrants : Frédéric BERNARDIN, Chercheur HDR, Chef d'Unité Adjoint
Mobilités Durable et Sécurité/ Cerema Clermont-Ferrand**

Alexandre CUER, Directeur Adjoint Cerema Clermont-Ferrand

Structure d'accueil du stage : Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de
L'Environnement (LOCIE)

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Dr. Daniel YAMEGUEU**

Membres et correcteurs : **Dr.-Ing. habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE
Ing. Francis SEMPORE**

Promotion [2019/2020]

DEDICACES

Ce travail est dédié :

A Dieu Tout-Puissant, pour toute sa grâce qu'il m'a accordée durant ma vie.

A ma défunte Mère, feu AMOUSSOU Adjoua Victorine, pour ton amour inconditionnel et ta protection maternelle que tu m'as accordée durant ton séjour sur terre. Que le paradis soit ta récompense.

A mon père, SEVI Honoré Azémakpégo et à mes grands frères et soeurs Pulchérie, Emilie, Yvonne, Jean-José, Laurenda et Brian pour tout votre soutien inconditionnel et votre amour infini.

A mon neveu, feu Consolé, qui nous a quitté un peu tôt. Repose en paix.

CITATION

"Nous savons du reste, que toutes choses concourent au bien de ceux qui aiment Dieu, de ceux qui sont appelés selon son dessein" Romains 8 : 28

REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements à l'endroit de :

- L'ensemble du personnel pédagogique et administratif de l'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de L'Environnement (2iE) dirigé par le **Prof. Mady KOANDA**, pour m'avoir accueilli et formé pendant trois bonnes et riches années ;
- L'ensemble du personnel pédagogique et administratif de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Rouen pour m'avoir donné l'occasion d'effectuer dans de bonnes conditions, une année d'échange international au sein de cet Institut ;
- **Dr. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE** pour avoir toujours été présent quand j'ai eu besoin de son soutien et de ses recommandations. Je vous considère comme mon "mentor" et votre parcours m'inspire et me sert d'exemple ;
- **Prof. Frédéric GRISCH**, mon tuteur à l'INSA Rouen, pour tout son accompagnement durant mon séjour dans cet Institut ;
- L'ensemble du personnel du LOCIE dirigé par la **Prof. Monika WOLOSZYN**, pour m'avoir accueilli et permis d'effectuer ce stage au sein ce Laboratoire ;
- **Prof. Benoit STUTZ**, pour m'avoir accueilli et guidé dans mes travaux. Travailler avec vous a été un honneur et un grand plaisir pour moi. Malgré vos différentes occupations, vous avez toujours été disponible pour encadrer ce mémoire ;
- **M. Alexandre CUER**, directeur du Cerema Clermont-Ferrand, et **M. Frédéric BERNARDIN**, Responsable Adjoint Unité Mobilités Durable et Sécurité/ Cerema Clermont-Ferrand, pour avoir co-encadré ce travail. Merci pour votre disponibilité sans faille, vos conseils et vos encouragements ;
- **La Banque Africaine de Développement (BAD) et au programme Erasmus+** pour avoir respectivement financé toutes mes études au sein de l'Institut 2iE et de l'INSA Rouen ;
- A tous mes camarades et amis de promotion pour ce parcours qu'on a fait ensemble dans la fraternité et la convivialité. En particulier à **Rainatou COULIBALY, Elvyr SOP MATCHI, Drich MAMPASSA, Eva Joyce METUE, Aicha DJIBO, Abdon KINGLO, Falonne TEKAM, Marie-Anne KINI, Alexandre TEVI, Vital KPADEVI, Audrey CEZERA, Cécilia MALONGA.**
- A tous ceux qui ont d'une manière ou d'une autre contribué à la réalisation de ce travail et qui n'ont pas été mentionnés.

RÉSUMÉ

En France, le réseau national routier peut capter près de 196 TWh par an. Pour mieux exploiter ce potentiel énergétique des routes, plusieurs projets ont vu le jour. L'un de ces projets, est le projet Dromotherm (<http://www.dromotherm.com>) sur lequel porte cette étude. Ce projet vise à récupérer l'énergie thermique des chaussées grâce à la circulation d'un fluide caloporteur dans une couche poreuse, à la stocker à la base des bâtiments et à l'utiliser pour les besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire. A travers cette étude, nous concevons un démonstrateur de stockage inter saisonnier couplé à un échangeur de chaleur routier de type Dromotherm. Le dispositif conçu comprend : une chaussée récupératrice de chaleur de 30 m² ; un stockage thermique de 45 m³ constitué d'une cuve isolée en béton remplie de sable saturé et comprenant des échangeurs de chaleur géothermique et un bâtiment en bois de 20 m². Nous avons développé un modèle global de simulation d'un tel dispositif afin d'étudier son comportement énergétique dynamique sur une année type. Il ressort de nos simulations qu'avec un tel dispositif, environ 8 à 20 % de l'énergie solaire qui arrive sur la surface de la chaussée est transmise au fluide caloporteur circulant dans la chaussée. Cette énergie solaire thermique reçue par le fluide est stockée et par le biais d'une pompe à chaleur, elle permet de produire de l'eau chaude sanitaire pour une famille de 6 personnes occupant un bâtiment basse consommation de 120 m² en été et à chauffer ce même bâtiment en hiver dont les besoins de chauffage s'élèvent à 3149 kWh/an.

La réalisation du démonstrateur est prévue pour février 2021 sur le site de l'Université Savoie Mont Blanc. Cette plateforme expérimentale sera utilisée pour valider le concept du système et les modèles numériques développés.

Mots Clés

- 1- Échangeur de chaleur routier**
- 2- Énergie solaire thermique**
- 3- Pompe à Chaleur**
- 4- Stockage thermique inter-saisonnier**
- 5- Echangeurs géothermiques**

ABSTRACT

In France, the national road network can capture nearly 196 TWh per year. To better exploit this potential energy of roads, several projects have emerged. One of these projects is the Dromotherm project (<http://www.dromotherm.com>) on which this study relates. This project aims to recover the thermal energy of the pavements through the circulation of a heat transfer fluid in a layer porous, to store it at the base of buildings and to use it for heating and domestic hot water needs. Through this study, we are designing an inter-seasonal storage demonstrator coupled to a Dromotherm type road heat exchanger. The designed device comprises a 30 m², a thermal storage of 45 m³, consisting of an insulated concrete tank filled with saturated sand and including geothermal heat exchangers and a wooden building of 20 m². We have developed a global simulation model of such a device in order to study its dynamic energy behavior over a typical year. It emerges from our simulations that with such a device, approximately 8 to 20 % of the solar energy which arrives on the surface of the roadway is transmitted to the heat transfer fluid circulating in the roadway. This solar thermal energy received by the fluid is stored and the use of a heat pump makes it possible to produce domestic hot water for a family of 6 people occupying a low consumption building of 120 m² in summer and to heat the same building in winter, whose heating needs amount to 3149 kWh per year.

The demonstrator is scheduled for February 2021 on Savoie Mont Blanc University site. This experimental platform will be used to validate the concept of the system and the digital models developed.

Keywords

- 1- Road heat exchanger**
- 2- Solar thermal energy**
- 3- Heat pump**
- 4- Inter-seasonal thermal storage**
- 5- Geothermal heat exchanger**

Table des matières

DEDICACES	ii
CITATION	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vi
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xii
I INTRODUCTION	1
I.1 Contexte global	1
I.2 Présentation du projet	1
I.3 Les objectifs du stage	2
I.4 Présentation de la structure d'accueil	2
I.5 Structure du document	3
II SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	4
II.1 Les routes récupératrices d'énergie	4
II.1.1 Les différents systèmes de récupération d'énergies dans les chaussées .	4
II.1.2 Comparaison des différents projets	7
II.2 Les systèmes de stockage géothermique	7
II.3 Modélisation du bâtiment	9

DÉVELOPPEMENT D'UN DÉMONSTRATEUR DE STOCKAGE THERMIQUE INTER SAISONNIER COUPLÉ A UN ÉCHANGEUR THERMIQUE ROUTIER

II.3.1	La modélisation RC d'un bâtiment	9
II.3.2	Les différents modèles RC	10
II.4	Point sur les travaux réalisés dans le cadre du projet Dromotherm	12
II.4.1	Expérimentation des performances énergétiques de l'échangeur Dromotherm	12
II.4.1.1	Description du démonstrateur	13
II.4.1.2	Expérimentation du dispositif en période estivale	13
II.5	Bilan	14
III PRÉSENTATION DU DÉMONSTRATEUR		15
III.1	Architecture globale du système	15
III.1.1	La chaussée Dromotherm	16
III.1.2	Le stockage thermique	17
III.1.3	Pompe à chaleur (PAC)	17
III.1.4	L'habitat	18
III.1.5	Autres composants	18
III.2	Fonctionnement envisagé du dispositif	19
III.2.1	Fonctionnement en été	19
III.2.2	Fonctionnement en hiver	19
IV MODÉLISATION DU DÉMONSTRATEUR		20
IV.1	Modélisation de l'échangeur Dromotherm	20
IV.1.1	Modélisation 1D de la chaussée	21
IV.2	Modélisation de l'échangeur thermique	23
IV.3	Modélisation de la PAC	24
IV.4	Modélisation du stockage thermique	25
IV.5	Modélisation du bâtiment	28
IV.5.1	Besoin en chauffage	28
IV.5.2	Besoin en ECS	30
IV.5.3	Besoin total du bâtiment	31
IV.6	Récapitulatif des équations	31
IV.7	Résolution numérique	32

V	RÉSULTATS ET DISCUSSION	33
V.1	Validation du modèle 1D	33
V.1.1	Données météo	33
V.1.2	Géométrie de la chaussée	35
V.1.3	Simulation modèle 1D	35
V.1.4	Simulation modèle 2D du Cerema	36
V.1.5	Comparaison des deux modèles	37
V.2	Simulation du système couplé	38
V.2.1	Caractéristiques du démonstrateur	38
V.2.2	Les stratégies de pilotage	39
V.2.3	Cas d'usage 1 : Recharge annuelle du stock sans consommation aucune	39
V.2.4	Cas d'usage 2 : Consommation estivale d'ECS	41
V.2.5	Cas d'usage 3 : Recharge du stockage en été puis utilisation du chauffage en hiver	43
V.2.6	Cas d'usage 4 : Recharge du stockage en été puis utilisation d'ECS + chauffage(en hiver)	45
V.2.7	Cas d'usage 5 : Recharge annuelle du stockage puis utilisation de chauffage en hiver	47
V.2.8	Cas d'usage 6 :Recharge annuelle du stockage puis utilisation de ECS+chauffage(en hiver)	49
V.3	Implantation du démonstrateur	51
V.4	Bilan	52
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	53
	Bibliographie	55
A	Modélisation 1D de l'échangeur dromotherm	58
A.1	Phénomènes de transfert de chaleur au sein de la chaussée	58
A.2	Calcul des coefficients d'échanges surfaciques	59
A.3	Schéma numérique	61
A.3.1	Maillage	61
A.3.2	Discrétisation	61
A.3.3	Conditions initiales	63
A.3.4	Conditions aux bords	63
B	Données sur le démonstrateur	64
B.1	Paramètres thermo-hydrauliques du dromotherm	64
B.2	Données sur le stockage	65
B.3	Données sur le bâtiment	65

Liste des tableaux

Tableau III.1	Composition granulométrique des couches de l'échangeur dromotherm [1]	17
Tableau V.1	Géométrie de la chaussée	35
Tableau V.2	Écart absolu maximum entre les températures des modèles 1D et 2D	38
Tableau V.3	Stratégies de pilotage	39
Tableau B.1	Données sur la chaussée	64
Tableau B.2	Données sur le stockage	65
Tableau B.3	Données sur le bâtiment	65
Tableau B.4	Données sur le bâtiment (suite)	66

Liste des figures

FIGURE I.1	Un smart grid route-bâtiment [3]	2
FIGURE II.1	Pont SERSO en fonctionnement [6]	5
FIGURE II.2	Principe de fonctionnement du pont SERSO [6]	5
FIGURE II.3	Chauffage avec Power Road[7]	6
FIGURE II.4	Réduction des ilots de chaleur[7]	6
FIGURE II.5	Les serpentins de captage de l'énergie solaire [8]	6
FIGURE II.6	Schéma de principe du projet Dromotherm[3]	7
FIGURE II.7	Types de stockage géothermique[4]	8
FIGURE II.8	Analogie électrique et thermique [13]	9
FIGURE II.9	Les modèles RC d'un bâtiment [12]	11
FIGURE II.10	Fonction de récupération d'énergie de la chaussée[4]	12
FIGURE II.11	Démonstrateur d'Égletons[1]	13
FIGURE II.12	Profils des températures expérimentales[1]	14
FIGURE III.1	Architecture globale du démonstrateur	15
FIGURE III.2	Schéma simplifié du démonstrateur	16
FIGURE III.3	Les couches de la chaussée Dromotherm (coupe transversale)	16
FIGURE III.4	Le stockage thermique (coupe transversale)	17
FIGURE III.5	Le cycle thermodynamique d'une PAC[10]	18
FIGURE III.6	Un habitat en bois	18
FIGURE IV.1	Procédé de transfert de chaleur au sein de la chaussée [4]	20
FIGURE IV.2	La chaussée avec ses différentes couches (coupe transversale)	21
FIGURE IV.3	Échangeur thermique à contre courant	23

FIGURE IV.4	Volume représentatif du stockage	25
FIGURE IV.5	Modèle R3C du bâtiment	28
FIGURE IV.6	La paroi du bâtiment	29
FIGURE IV.7	Logigramme	32
FIGURE V.1	Température de l'air sur une année type dans la zone climatique H1c .	34
FIGURE V.2	Rayonnements solaire global et atmosphérique sur une année type dans la zone climatique H1c	34
FIGURE V.3	Vitesse du vent pour une altitude de 10m sur une année type dans la zone climatique H1c	35
FIGURE V.4	Profils de température de la chaussée modèle 1D	36
FIGURE V.5	Profils de température de la chaussée modèle 2D	36
FIGURE V.6	Comparaison des modèles 1D et 2D	37
FIGURE V.7	Simulation de la recharge annuelle du stock sans consommation aucune	40
FIGURE V.8	Bilan énergétique de la recharge annuelle sans consommation aucune .	41
FIGURE V.9	Simulation de la consommation estivale d'ECS	42
FIGURE V.10	Bilan énergétique de la consommation estivale d'ECS	43
FIGURE V.11	Simulation recharge estivale du stockage en été et utilisation du chauf- fage en hiver	44
FIGURE V.12	Bilan énergétique du cas d'usage 3	45
FIGURE V.13	Simulation recharge estivale du stockage en été et utilisation du ECS+ chauffage(en hiver)	46
FIGURE V.14	Bilan énergétique du cas d'usage 4	47
FIGURE V.15	Simulation de la recharge annuelle du stockage et utilisation du chauf- fage en hiver	48
FIGURE V.16	Bilan énergétique du cas d'usage 5	49
FIGURE V.17	Simulation de la recharge annuelle du stockage et utilisation de ECS+Chauffage(en hiver)	50
FIGURE V.18	Bilan énergétique du cas d'usage 6	51
FIGURE V.19	Les potentiels sites d'implantation du démonstrateur	52
FIGURE A.1	Maillage de la chaussée de largeur L	61

Nomenclature

Alphabet latin

Notation	Unité	Signification
a	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	Diffusivité thermique du sous-sol
BBSG		Béton Bitumineux Semi-Grenu
BBDr		Béton Bitumineux Drainant
<i>besoin</i>	W	Besoin en chauffage et eau chaude sanitaire du bâtiment
C_d	$\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$	Capacité thermique volumique de la couche drainante
C_{bi}	$\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$	Capacité thermique volumique de la couche de base i
<i>COP</i>	(-)	Coefficient de Performance
C_s	$\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$	Capacité thermique volumique de la couche de surface
$C_{p_{dro}}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Capacité thermique massique du fluide circulant dans le Dromotherm
$C_{p_{sable}}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Capacité thermique massique du sable humide
$C_{p_{sto}}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Capacité thermique massique du fluide circulant de l'échangeur vers le stockage
ECS		Eau Chaude Sanitaire
EME		Enrobé à Module Elevé
h_{bi}	m	Épaisseur de la couche de base i
h_d	m	Épaisseur de la couche drainante
h_s	m	Épaisseur de la couche de surface
H_v	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	Coefficient d'échange convectif entre la surface de la route et l'air
k	$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$	Coefficient global d'échange thermique
L_{tube}	m	Longueur d'un tube
\dot{m}_{dro}	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	Débit massique du fluide circulant dans le Dromotherm
\dot{m}_{pac}	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	Débit massique de l'eau glycolée de la PAC
\dot{m}_{sto}	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	Débit massique du Dromotherm vers le stock
N_{pers}		Nombre d'occupants du bâtiment

DÉVELOPPEMENT D'UN DÉMONSTRATEUR DE STOCKAGE THERMIQUE INTER
SAISONNIER COUPLÉ A UN ÉCHANGEUR THERMIQUE ROUTIER

Alphabet latin (suite et fin)

Notation	Unité	Signification
N_{tubes}		Nombre de tubes
N_u	(-)	Nombre de Nusselt
PAC		Pompe à Chaleur
P_{geo}	W	Puissance géothermique extraite
P_{elec}	W	Puissance électrique de la PAC
q_f	$m^3 \cdot s^{-1}$	Débit volumique du fluide du Dromotherm
$Q_{chauffage}$	W	Puissance de chauffage
q_{cond}	W	flux de chaleur par conduction
Q_{ECS}	W	Puissance instantanée de production de l'ECS
R_{atm}	$W \cdot m^{-2}$	Rayonnement atmosphérique
R_e	m	Rayon extérieur du tube
R_f	$K \cdot W^{-1}$	Résistance de fuite
R_g	$W \cdot m^{-2}$	Rayonnement solaire global
R_i	m	Rayon intérieur du tube
$r_{i/j}$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Coefficient d'échange surfacique entre les couches i et j
R_m	$K \cdot W^{-1}$	Résistance thermique de conduction des murs
R_{si}	$K \cdot W^{-1}$	Résistance superficielle intérieure
S_{iso}	m^2	Surface de l'isolant
t	s	Temps
t_f	s	Date la plus froide de l'année
T_{amp}	$^{\circ}C$	Amplitude annuelle de la température du sous-sol
T_{bi}	K	Température de la couche de base i
$T_{consigne}$	$^{\circ}C$	Température de consigne de chauffage
T_{ECS}	$^{\circ}C$	Température de l'ECS
T_{ext}	$^{\circ}C$	Température extérieure
T_{inj_dro}	$^{\circ}C$	Température d'injection du fluide dans le Dromotherm
T_{inj_pac}	$^{\circ}C$	Température d'injection du fluide du stockage vers la PAC
T_{inj_sto}	$^{\circ}C$	Température d'injection du fluide du Dromotherm dans le stock
T_{int}	$^{\circ}C$	Température intérieure du bâtiment
T_{reseau}	$^{\circ}C$	Température de l'eau du réseau
T_{sor_dro}	$^{\circ}C$	Température de sortie du fluide du Dromotherm
T_{sor_pac}	$^{\circ}C$	Température de sortie du fluide de la PAC
T_{sor_sto}	$^{\circ}C$	Température de sortie du fluide du stockage vers le Dromotherm
$T_{sous-sol}$	$^{\circ}C$	Température du sous-sol
T_{stock}	$^{\circ}C$	Température du stockage
V	l	Consommation d'eau moyenne journalière d'ECS d'une personne
z	m	La profondeur par rapport à la surface du sol

Alphabet grec

Notation	Unité	Signification
α	(-)	Albédo
ε	(-)	Émissivité ou efficacité
λ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Conductivité thermique
ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Masse volumique
σ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$	Constante de Stefan-Boltzmann
ϕ	(-)	Porosité de la couche drainante
ω_a	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	Pulsation annuelle

Sigles

Désignation	Signification
2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
Cerema	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
INSA	Institut National des Sciences Appliquées
LOCIE	Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement

I

INTRODUCTION

I.1 Contexte global

Dans le contexte actuel où prévaut une diminution des ressources d'énergies fossiles ainsi que d'importants changements climatiques, l'humanité se doit d'innover dans l'exploitation des énergies renouvelables. L'un des concepts, objet de recherches et d'innovations actuellement est celui des routes à énergie positive énoncé lors de la COP 21 en 2015 à Paris. En France, en considérant une énergie solaire moyenne de 1400 kWh/(m²·an) sur l'ensemble du territoire, le réseau routier national capte à lui seul 196 TWh par an[1]. Cette énergie peut être exploitée au profit du secteur du bâtiment qui représente près de 43% de la consommation totale d'énergie utile en France [2]. L'un des problèmes qui se pose dans l'exploitation de cette énergie solaire captée par les routes est celui du décalage entre les périodes de captage (été) et celle de consommation (hiver). Le stockage thermique inter saisonnier constitue une solution pour mieux exploiter le potentiel énergétique de ces routes à long terme et les rendre plus efficaces. C'est dans cette optique que le présent travail s'inscrit dans le cadre du développement d'un démonstrateur de stockage thermique inter saisonnier couplé à un échangeur routier.

I.2 Présentation du projet

Le projet **Dromotherm**, financé par le dispositif **Pack Ambition Recherche de la région Auvergne-Rhône-Alpes** sur la période 2020 – 2025, combine des recherches en matière d'énergie, de bâtiment, de route et d'objets connectés visant à développer un smart-grid (figure I.1) permettant de pourvoir aux besoins de chauffage des bâtiments, au moyen d'une route "solaire thermique", ne mobilisant pour sa construction que des techniques de mise en œuvre éprouvées et maîtrisées.

Plus explicitement, 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 Dromotherms, à la stocker à la base des bâtiments, et à l'utiliser pour les besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire (ECS) grâce aux pompes à chaleur et aux réseaux basse température.

Dromotherm est un projet de recherche soutenu par le pôle de compétitivité **Tenerrdis**, mené par le **Cerema** en partenariat avec le laboratoire **LOCIE**, l'**institut Pascal** de l'Université Clermont Auvergne et les entreprises de travaux publics **Eiffage** et **Ryb/groupe Elydan**[3].

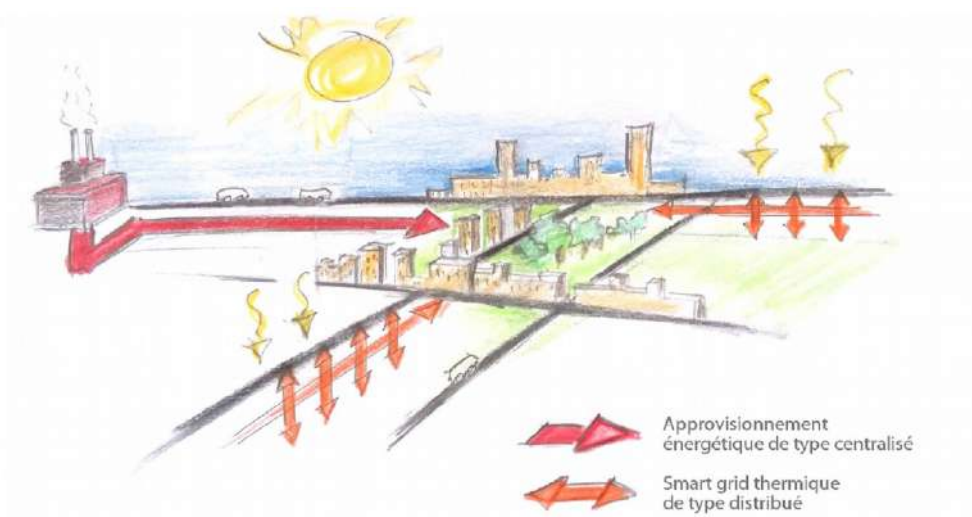


FIGURE I.1: Un smart grid route-bâtiment [3]

I.3 Les objectifs du stage

Ce stage vise de manière globale à étudier le comportement énergétique dynamique d'un démonstrateur couplant :

- un échangeur routier Dromotherm ;
- un stockage inter saisonnier basse température ;
- un habitat thermiquement représentatif d'un bâtiment de $150 m^2$.

De manière spécifique, il s'agit de :

- développer un modèle dynamique du démonstrateur ;
- simuler le comportement du démonstrateur ;
- choisir son implantation sur le site de l'Université de Savoie Mont Blanc.

I.4 Présentation de la structure d'accueil

Le stage s'est déroulé au sein du Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (**LOCIE**). Le LOCIE est un laboratoire de recherche créé en 2002 qui fédère ses activités autour d'un axe unique à forts enjeux sociétaux : « Énergie et bâtiment durables ». Il est le laboratoire de recherche amont représentant l'Université de Savoie et le CNRS au sein de l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES). Le LOCIE oriente ses activités autour de 4 thèmes :

- **Thème 1 : conversion locale de l'énergie pour l'autonomie électrique des bâtiments.**
- **Thème 2 : systèmes solaires thermiques et stockage.**
- **Thème 3 : maîtrise des flux pour la qualité des ambiances.**
- **Thème 4 : caractérisation du bâtiment, évaluation et amélioration des performances.**

I.5 Structure du document

Le présent rapport s'organise en quatre chapitres :

- le premier chapitre fait la synthèse bibliographique sur les routes récupératrices d'énergie ;
- le deuxième chapitre décrit le démonstrateur, objet de cette étude ;
- le troisième chapitre présente la modélisation des différents composants du démonstrateur ;
- le quatrième et dernier chapitre expose les différents résultats obtenus.

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

La récupération d'énergie suscite un grand intérêt dans la problématique mondiale sur l'énergie et la diminution des ressources naturelles. L'étude des structures routières dans le but de capter l'énergie et de la réutiliser pour leurs besoins propres ou pour ceux de leur environnement proche est un axe de recherche qui se développe [4]. Cette étude bibliographique vient faire le point sur les différentes technologies qui existent dans ce domaine.

D'une part, nous présentons quelques projets portant sur les routes récupératrices d'énergie, les systèmes de stockage utilisés et modélisations de bâtiments et d'autre part, nous passons en revue les travaux déjà menés dans le cadre du projet Dromotherm, objet de notre étude.

II.1 Les routes récupératrices d'énergie

II.1.1 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. Encore appelées Echangeurs thermiques routiers, ces chaussées ont un principe de fonctionnement se reposant généralement sur le transfert d'énergie entre la chaussée et un fluide caloporteur circulant dans la chaussée. Dans la documentation, nous retrouvons quelques projets marquants :

- **Le Projet Serso**

Initié par l'Office Fédérale Suisse de l'Energie, le projet Serso a pour but de dégivrer un pont avec de l'énergie solaire (figure II.1). Pour y parvenir, un concept de stockage saisonnier a été mis en oeuvre : l'énergie solaire est captée par le pont en été grâce à des serpentins, stockée dans le sous-sol par l'intermédiaire d'un ensemble de sondes géothermiques, puis restituée en hiver pour le dégivrage du pont (figure II.2). L'énergie spécifique de chauffage annuelle du projet Serso varie entre 100 et 132 kWh par m^2 de route [4, 6].



FIGURE II.1: Pont SERSO en fonctionnement [6]

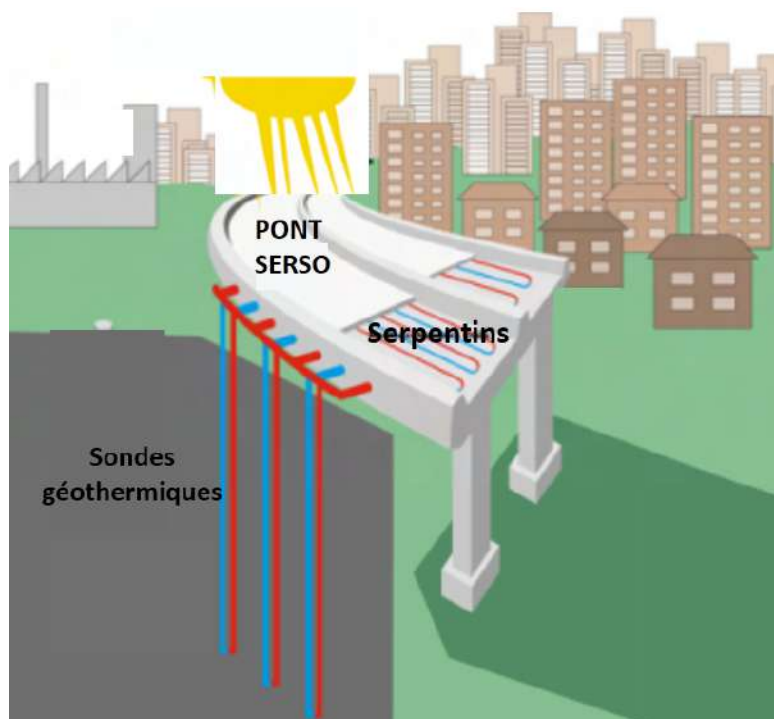


FIGURE II.2: Principe de fonctionnement du pont SERSO [6]

- **Le Projet Power Road**

A travers le projet Power Road, Eurovia produit de l'énergie thermique grâce aux routes. Cette énergie est captée par le biais des rayonnements solaires, stockée puis restituée aux bâtiments et infrastructures environnants, via un système de pompes à chaleur.

L'énergie ainsi produite contribue au chauffage 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 (figure II.3). Elle peut être également utilisée en hiver pour déneiger et déverglacer les voiries ou pistes d'aéroports tout en réduisant les interventions de salage. En été pour refroidir les chaussées et contribuer à résorber les îlots de chaleur urbains grâce au captage de chaleur en surface (figure II.4) [7].



FIGURE II.3: Chauffage avec Power Road[7]



FIGURE II.4: Réduction des îlots de chaleur[7]

- **Le Projet Pavirex**

Initié par Eiffage, le projet Pavirex 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 (figure II.5). Le principe est le même que celui du projet Power Road[8].

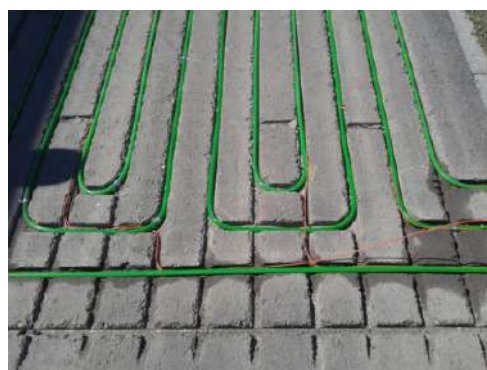


FIGURE II.5: Les serpentins de captage de l'énergie solaire [8]

- **Le projet Dromotherm**

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 II.6).

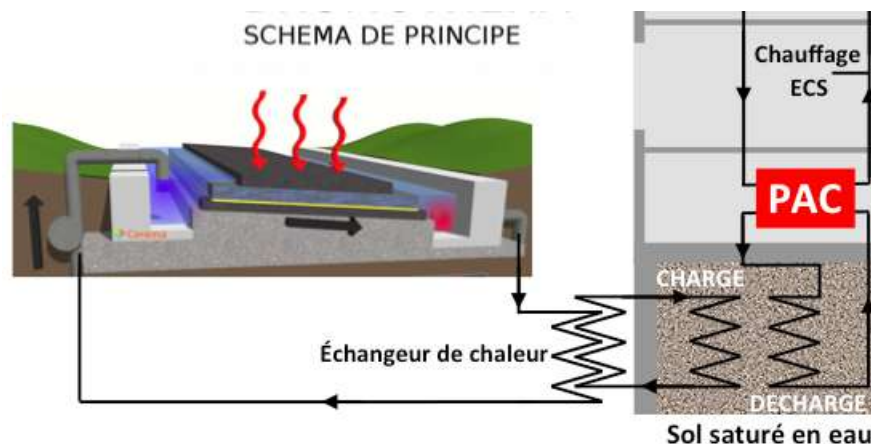


FIGURE II.6: Schéma de principe du projet Dromotherm[3]

II.1.2 Comparaison des différents projets

Les différents projets présentés ont comme avantages communs :

- la diminution de la demande en électricité pour le chauffage et l'ECS[4] ;
- la réduction de la quantité de produits chimiques pour le dégivrage des routes[4].

Cependant, le projet Dromotherm se distingue des autres par le fait qu'il ne repose que sur l'utilisation des matériaux usuels de construction des chaussées contrairement aux autres innovations qui intègrent des tuyaux dans les enrobés, complexifiant ainsi l'exploitation et l'entretien des chaussées.

Ces différentes technologies de routes utilisent le plus souvent des systèmes de stockage pour la conservation de l'énergie solaire récupérée.

II.2 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 II.7) : 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) [4].

- **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 [4].

- **Systèmes de stockage dans des fosses remplies de gravier :**

Les fosses de gravier sont habituellement enfouies dans le sol à une profondeur entre 5 et 15 m. Elles ont besoin d'être étanches à l'eau et isolées 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 [4].

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 [4].

- **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[4].

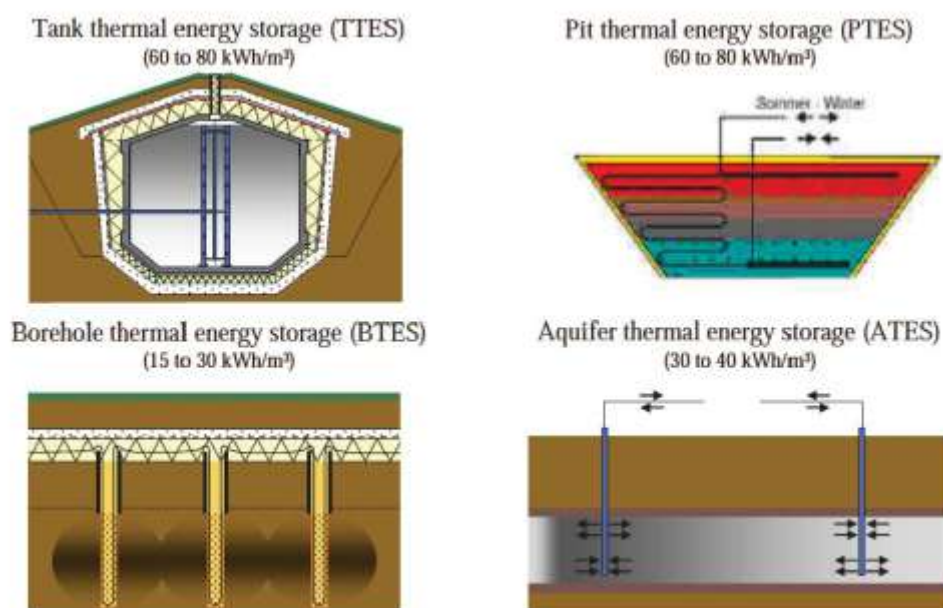


FIGURE II.7: Types de stockage géothermique[4]

II.3 Modélisation du bâtiment

La modélisation thermique du bâtiment est un préalable au calcul des besoins énergétiques pour la simulation ou la prédiction [13]. Il existe de nombreuses méthodes pour prévoir la consommation des bâtiments dont la modélisation RC.

II.3.1 La modélisation RC d'un bâtiment

Le principe de la modélisation RC ou « boîte 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[12]. Ce modèle utilise une équivalence entre grandeurs électriques et grandeurs thermiques comme suit :

Grandeurs thermiques			Grandeurs 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 II.8: Analogie électrique et thermique [13]

II.3.2 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[12]

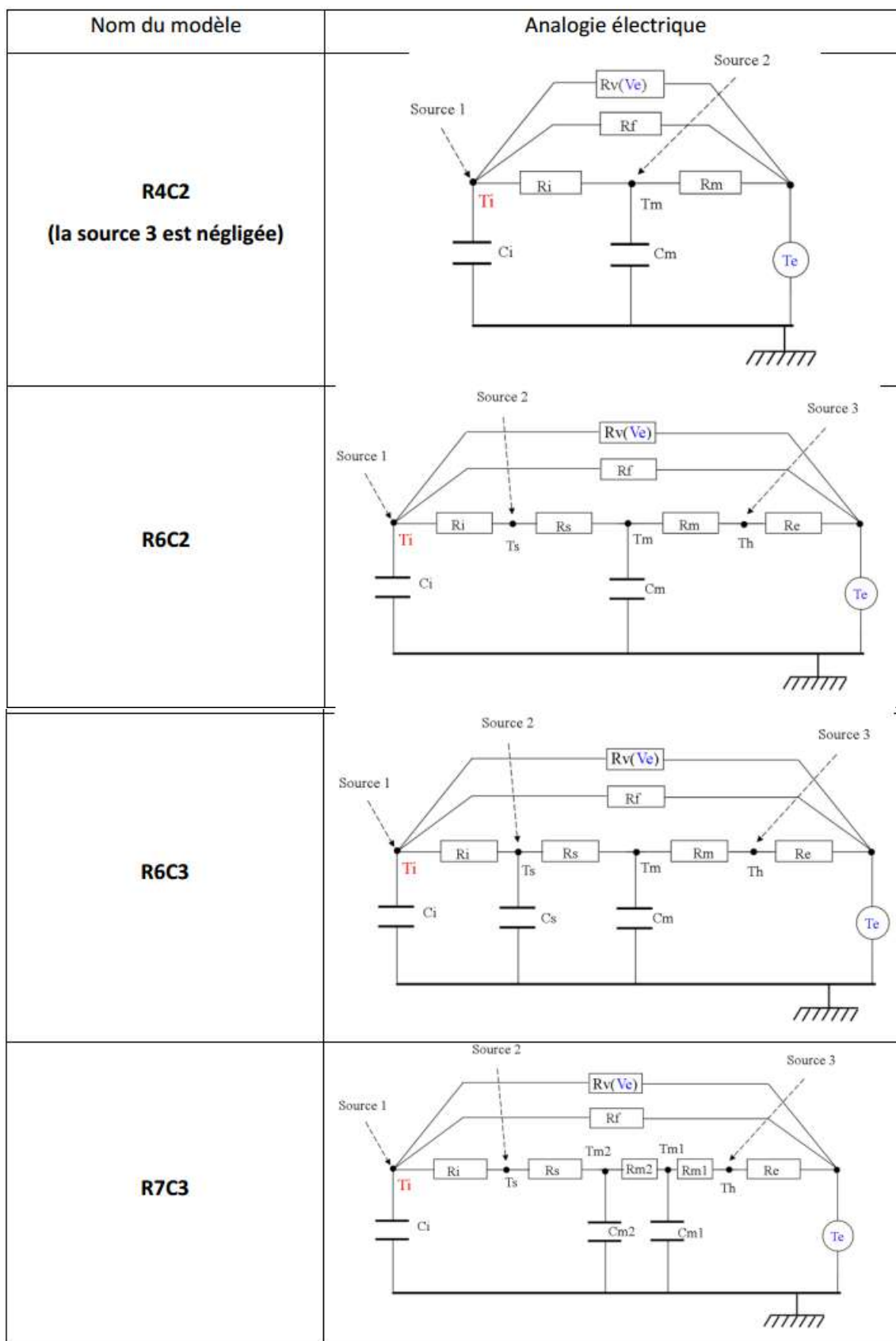


FIGURE II.9: Les modèles RC d'un bâtiment [12]

Dans la suite, nous présentons les différents travaux déjà réalisés dans le cadre du projet Dro-

motherm, objet de notre étude.

II.4 Point sur les travaux réalisés dans le cadre du projet Dromotherm

Les travaux réalisés à ce jour ont porté sur la mise au point de l'échangeur Dromotherm. Sarah Asfour, dans le cadre de sa thèse [4] a étudié entre autres, la fonction de récupération d'énergie thermique de la chaussée en été. Cette fonction consiste à injecter un fluide caloporteur (de l'eau dans ce cas) en amont de la chaussée pour la récupérer en aval après sa circulation dans les pores tout au long de la chaussée. Le fluide étant injecté à une température inférieure à celle de la chaussée en été, il récupère de l'énergie thermique de la chaussée et devient chaud à la sortie. C'est ce transfert de chaleur ayant lieu au sein de la chaussée qui lui confère le nom de Echangeur.

Cet échangeur permet d'assurer une fonction de récupération d'énergie en été comme le montre la figure II.10 :

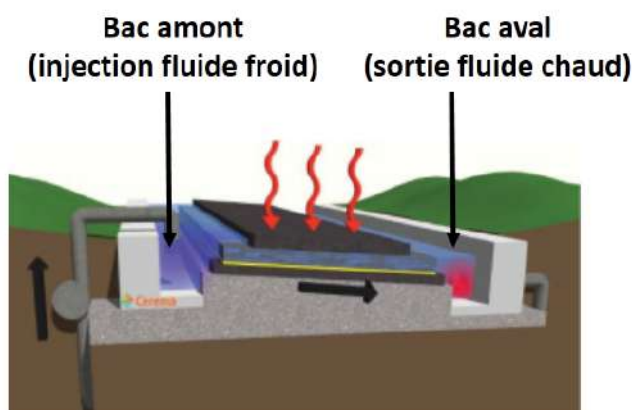


FIGURE II.10: Fonction de récupération d'énergie de la chaussée[4]

Pour tester cette fonction de récupération d'énergie, une plateforme a été installée par le Cerema en vue de faire des expérimentations.

II.4.1 Expérimentation des performances énergétiques de l'échangeur Dromotherm

Les expérimentations ont été faites par la mise en place d'un démonstrateur d'échangeur thermique routier 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.

II.4.1.1 Description du démonstrateur

Le démonstrateur (figure II.11) est une chaussée d'une longueur de 50 m et d'une largeur de 4 m, de pente nulle et de dévers 2 %, constituée de trois couches : une couche de surface, une couche de liaison poreuse et une couche de base. 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. Cette chaussée est instrumentée par des capteurs de températures pour la mesure de la température à certains endroits du démonstrateur [1].

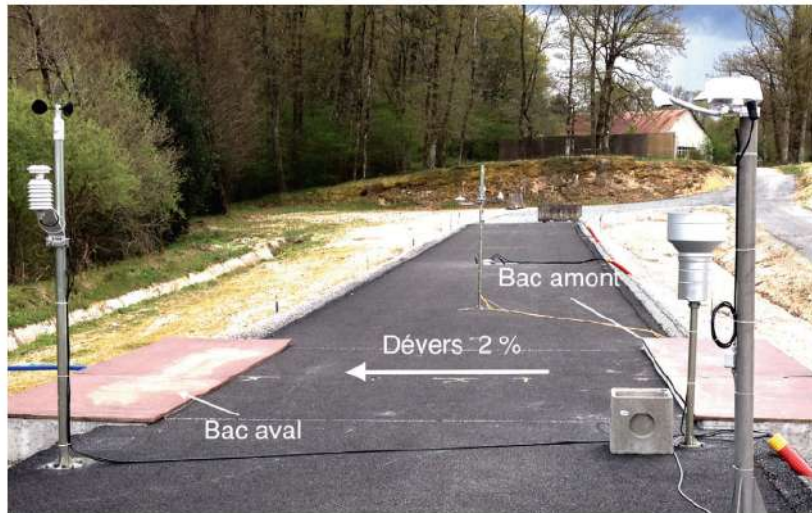


FIGURE II.11: Démonstrateur d'Égletons[1]

II.4.1.2 Expérimentation 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 de celle-ci. Au cours de cette période, le rayonnement solaire a atteint certains jours plus de $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Les mesures relevées au cours de cette période sont présentées sur la figure II.12 :

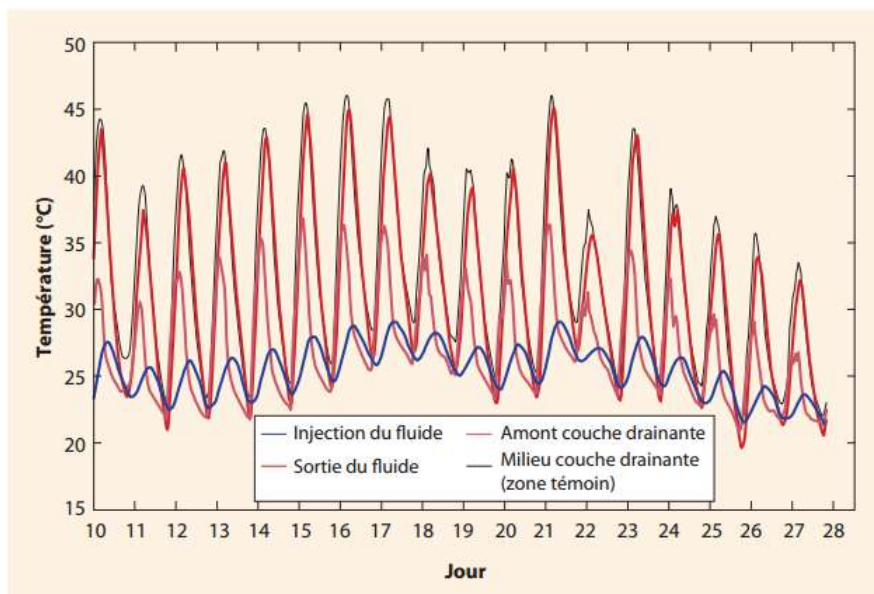


FIGURE II.12: Profils des températures expérimentales[1]

La courbe représentant la température du fluide à la sortie de la chaussée (courbe rouge) est toujours au-dessus de la courbe représentant la température d'injection du fluide dans la couche poreuse de la chaussée (courbe bleue). Ce constat montre effectivement que le fluide s'échauffe après sa circulation dans la chaussée. Au cours de cette expérience, l'énergie récupérée par le fluide est de 130 MJ/m^2 pour un débit d'injection de 50 l/h . L'énergie solaire reçue par la surface soumise au test est de 400 MJ/m^2 . Soit un taux de récupération de 32% [1].

II.5 Bilan

A travers cette étude bibliographique, nous avons parcouru la littérature existante sur les routes récupératrices d'énergie avec les systèmes de stockage thermique utilisés ainsi que les modèles thermiques de bâtiments. Les travaux de Mme Sarah Asfour et du Cerema ont montré que l'échangeur Dromotherm joue effectivement un rôle de chaussée chauffante ou récupératrice d'énergie. Nos travaux constituent une suite à ceux déjà réalisés. Nous décrivons dans la suite, le démonstrateur que nous voulons mettre en place et qui inclut l'échangeur Dromotherm.

PRÉSENTATION DU DÉMONSTRATEUR

Ce chapitre décrit la composition du démonstrateur qui sera implanté à l'issue de ce travail. Ce démonstrateur a été conçu durant le stage et constitue une étape importante dans l'atteinte des objectifs fixés. Nous présentons dans une première partie les différents équipements composant le démonstrateur et dans la deuxième partie, nous exposons les différents types de fonctionnement envisagés pour le démonstrateur.

III.1 Architecture globale du système

Le démonstrateur comprend quatre grands composants : L'échangeur routier (chaussée) Dromotherm, le stockage thermique, la pompe à chaleur (PAC) et l'habitat comme le montrent les figures III.1 et III.2 :

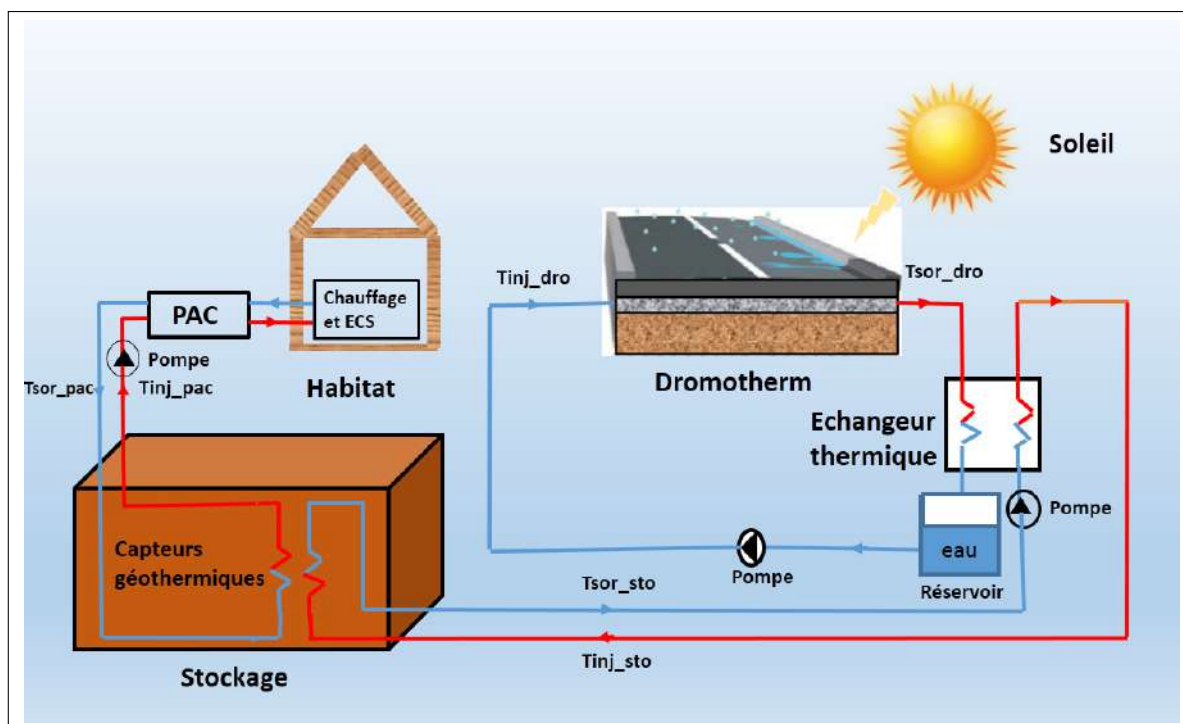


FIGURE III.1: Architecture globale du démonstrateur

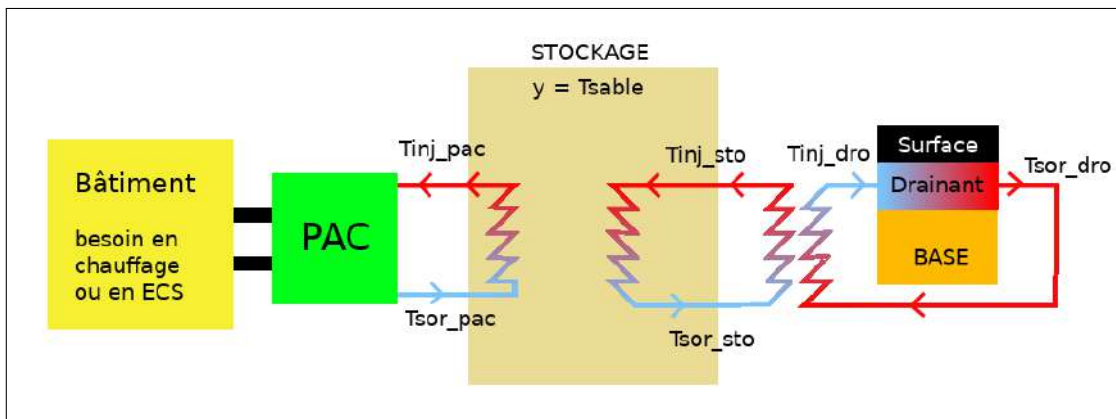


FIGURE III.2: Schéma simplifié du démonstrateur

III.1.1 La chaussée Dromotherm

La chaussée Dromotherm est une chaussée d'une surface rectangulaire avec un dévers de 2 % et une pente longitudinale de 0,5 % constituée de trois couches du haut vers le bas comme suit :

- une couche de roulement en béton bitumineux semi-grenu (BBSG) ;
- une couche de liaison d'enrobé drainant (béton bitumineux drainant BBDR) 0/14 ;
- une couche de base d'enrobé à module élevé (EME) [1].

L'ensemble de ces couches repose sur du sol naturel compact comme le montre la figure III.3 :

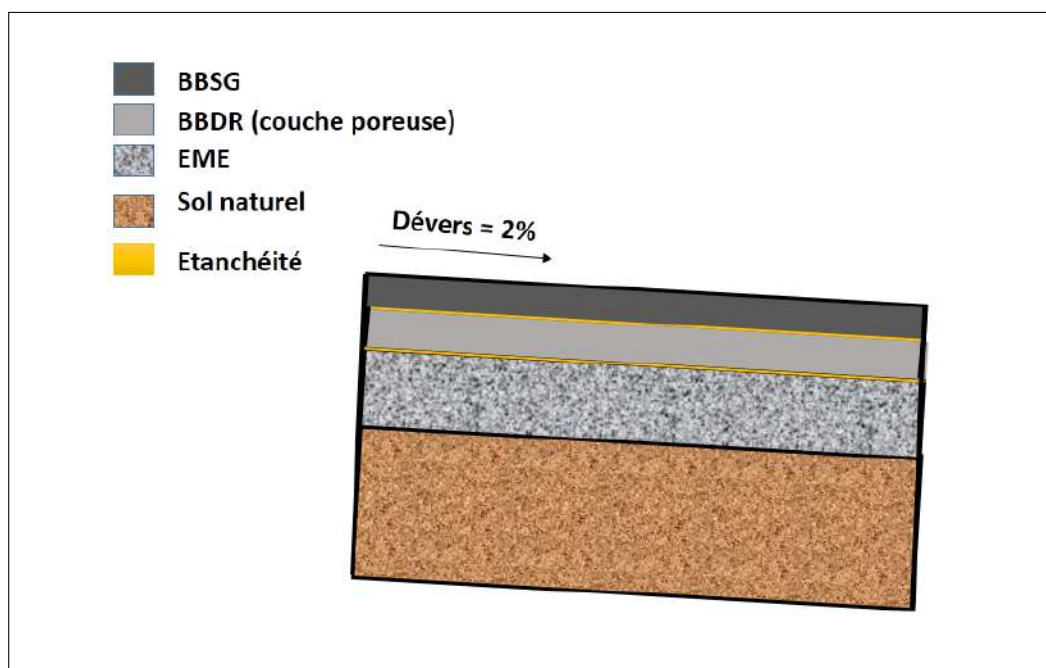


FIGURE III.3: Les couches de la chaussée Dromotherm (coupe transversale)

Le tableau III.1 donne la composition granulométrique de chaque couche.

Tableau III.1: Composition granulométrique des couches de l'échangeur dromotherm [1]

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

III.1.2 Le stockage thermique

Le stockage thermique d'un volume V_{sable} est constitué d'une cuve isolée en béton remplie de sable saturé et comprenant des échangeurs de chaleur géothermique. Dans le cadre de notre étude, nous utilisons des échangeurs géothermiques horizontaux. Ils sont disposés en série sur des nappes en circuit fermé et raccordés alternativement au dromotherm et à la PAC comme le montre la figure III.4 :

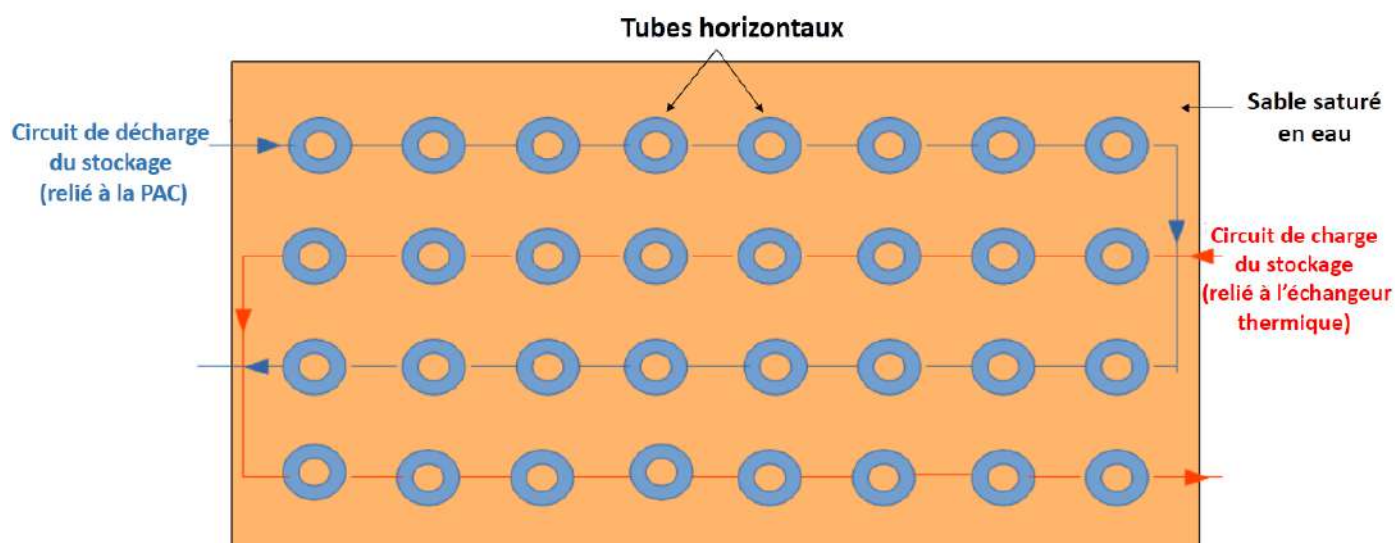


FIGURE III.4: Le stockage thermique (coupe transversale)

III.1.3 Pompe à chaleur (PAC)

La pompe à chaleur permet de chauffer ou de produire de l'ECS à partir de la chaleur basse température du stockage thermique. Elle est composée de plusieurs éléments dont les quatre principaux sont l'évaporateur, le compresseur, le condenseur et le détendeur présentés sur la figure III.5 [10].

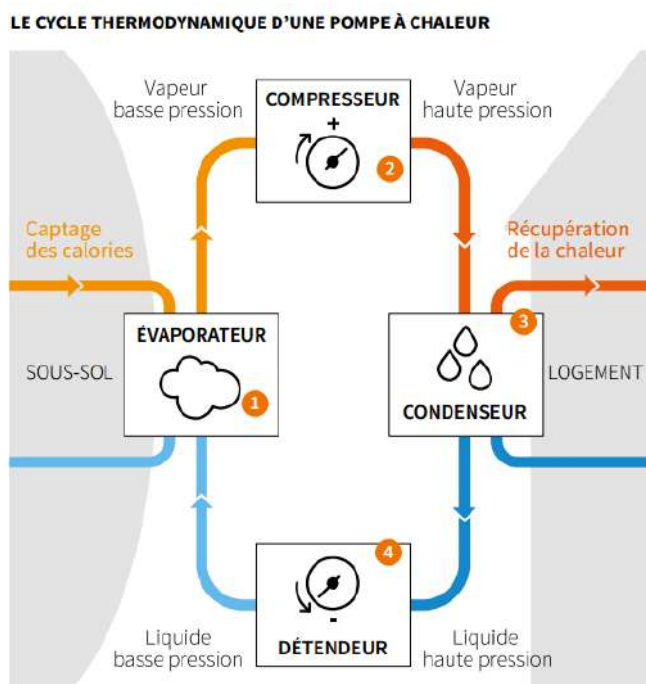


FIGURE III.5: Le cycle thermodynamique d'une PAC[10]

III.1.4 L'habitat

L'habitat à alimenter est un bâtiment en ossature bois de surface S_{bat} , posé sur le stockage. Ce bâtiment est considéré comme mal isolé afin d'être l'équivalent en terme de déperditions thermiques d'un bâtiment basse consommation d'une surface plus grande. La figure III.6 donne un aperçu d'un habitat en ossature bois.



FIGURE III.6: Un habitat en bois

III.1.5 Autres composants

En plus des quatre grandes composantes, le dispositif comprend :

- un échangeur thermique à plaques ayant pour rôle de séparer ou d'isoler le Dromotherm du reste du système ;
- trois pompes pour faire circuler les fluides.

III.2 Fonctionnement envisagé du dispositif

De manière globale, le dispositif sera mis en marche en été pour récupérer l'énergie solaire à l'aide du Dromotherm et la restituer en hiver pour le chauffage de l'habitat.

III.2.1 Fonctionnement en été

En été, l'échangeur Dromotherm est mis en marche pour la recharge du stockage pour la production d'ECS. En effet, on met le fluide (l'eau) en circulation grâce à une pompe dans la couche poreuse de l'échangeur dromotherm. La chaussée lui cède de l'énergie (le rayonnement solaire). Le fluide réchauffé cède à son tour ses calories au fluide (l'eau) circulant dans la deuxième boucle via l'échangeur thermique : c'est la phase de charge du stockage.

La PAC peut être mise en marche pour la production d'ECS durant cette période.

III.2.2 Fonctionnement en hiver

En hiver, la chaleur stockée sert à chauffer le bâtiment par circulation directe puis via une pompe à chaleur et à produire de l'ECS via la pompe à chaleur.

En effet la chaleur emmagasinée dans le sous-sol est récupérée grâce aux échangeurs géothermiques horizontaux. Le fluide caloporteur (l'eau glycolée) circulant dans les tubes géothermiques remonte en surface pour combler les besoins en chauffage et ECS de l'habitat par l'intermédiaire de la PAC : c'est la phase de la décharge du stockage.

A l'inter-saison, le Dromotherm recharge partiellement le stockage.

MODÉLISATION DU DÉMONSTRATEUR

L'objectif de ce travail est de prédire le comportement énergétique du dispositif. La modélisation est la méthode idéale pour y arriver. Elle consiste à mettre au point un ensemble d'équations pour décrire les différents phénomènes au sein du dispositif. Dans un premier temps, nous procédons à la modélisation de chaque composant du démonstrateur et dans un second temps, nous présentons un logigramme, décrivant l'algorithme utilisé pour la résolution des équations établies lors de la modélisation.

IV.1 Modélisation de l'échangeur Dromotherm

Avant de passer à la mise en équation, il est utile de faire le point des phénomènes de transfert de chaleur ayant lieu au sein de la chaussée. Sarah Asfour dans le cadre de ses travaux [4] a identifié les phénomènes de transferts thermiques qui ont lieu au niveau de la chaussée. Il s'agit de la conduction thermique dans la chaussée, la convection entre la chaussée et l'air ambiant, la convection entre l'eau circulant dans la couche poreuse et la chaussée et le phénomène de rayonnement thermique (voir figure IV.1).

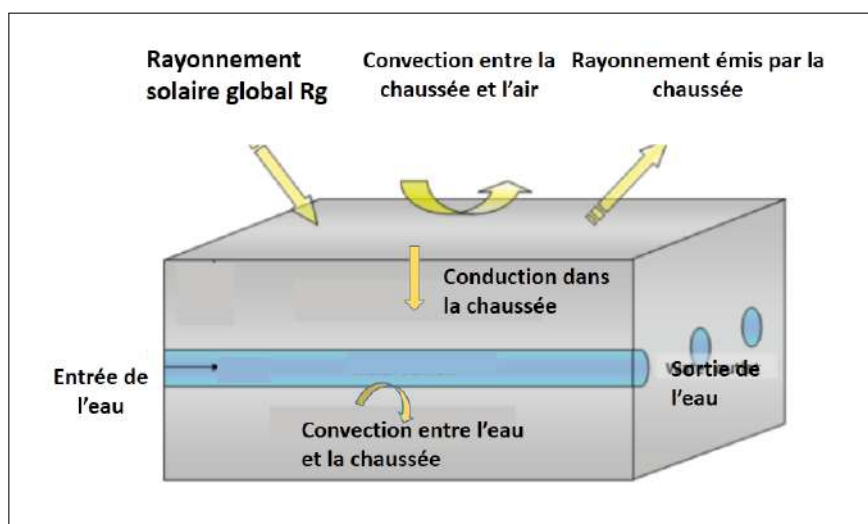


FIGURE IV.1: Procédé de transfert de chaleur au sein de la chaussée [4]

Ces différents phénomènes sont traduits par des lois ou équations (en annexe A) que nous utilisons pour la modélisation de notre chaussée.

IV.1.1 Modélisation 1D de la chaussée

On considère une chaussée constituée de quatre couches (figure IV.2) :

- une couche de roulement ou de surface d'une épaisseur h_s ;
- une couche drainante poreuse d'une épaisseur h_d ;
- deux couches de base d'épaisseurs respectives h_{b1} et h_{b2} .

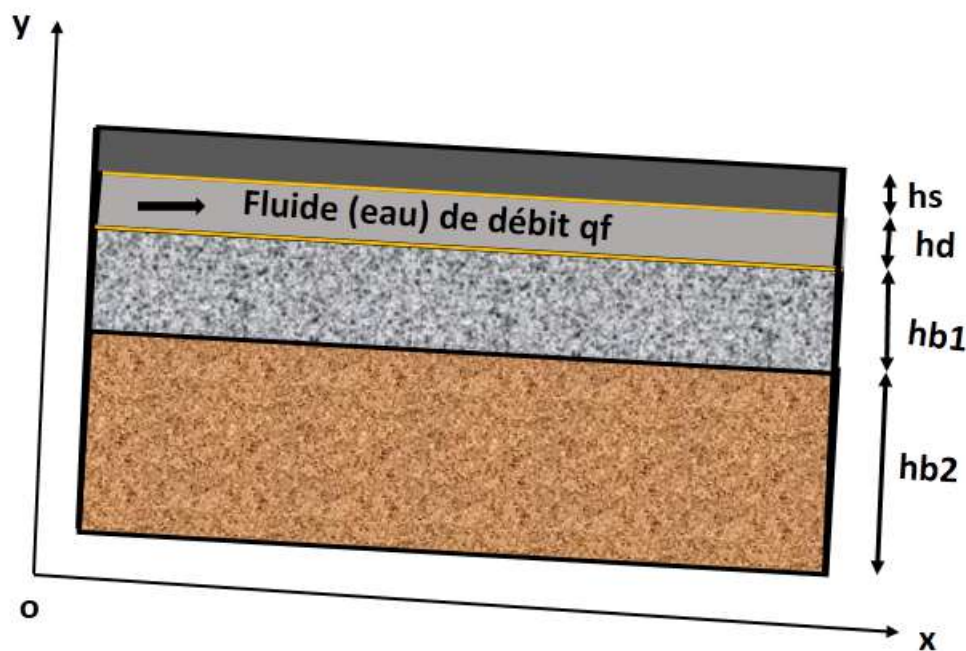


FIGURE IV.2: La chaussée avec ses différentes couches (coupe transversale)

Quelques hypothèses :

- Dans chacune des couches, la température est supposée quasi homogène suivant l'épaisseur ;
- La température du fluide est égale à celle de la couche drainante dans laquelle elle circule ;
- le dessous de la deuxième couche de base est supposée adiabatique.

Le bilan d'énergie couche par couche se présente comme suit :

- **Couche de surface**

$$C_s h_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \alpha) R_g + R_{atm} - \epsilon \sigma T_s^4 - H_v (T_s - T_{ext}) - r_{s/d} (T_s - T_f) \quad (IV.1)$$

Avec :

C_s : la capacité thermique volumique de la couche de surface en $(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$;

α : l'albédo (-);

R_g : le rayonnement solaire global en $W \cdot m^{-2}$;

R_{atm} : le rayonnement atmosphérique en $W \cdot m^{-2}$;

ε : l'émissivité de la chaussée (-);

T_s : la température de la couche de surface en (K);

T_f : la température du fluide en (K);

H_v : le coefficient d'échange convectif entre la surface de la route et l'air en $(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$.

Ce coefficient est fonction de la vitesse du vent et s'exprime par [11] :

$$H_v = \rho_{air} C_{p_{air}} (C_d V_{vent} + C_{d1}) \quad (IV.2)$$

où : ρ_{air} , $C_{p_{air}}$, C_d et C_{d1} (supposés constants) représentent respectivement la masse volumique de l'air ($kg \cdot m^{-3}$), la capacité calorifique massique de l'air ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), et deux coefficients de convection. V_{vent} quant à lui désigne la vitesse du vent ($m \cdot s^{-1}$).

$r_{s/d}$: coefficient d'échange surfacique ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) entre la couche de surface et la couche drainante. Ce coefficient caractérise la conduction entre les couches et s'exprime par :

$$r_{s/d} = \frac{2\lambda_s \lambda_d}{h_s \lambda_d + h_d \lambda_s} \quad (IV.3)$$

(Voir démonstration en annexe A.2).

- **Couche drainante**

$$((1 - \phi)C_d h_d + \phi C_f h_d) \frac{\partial T_f}{\partial t} + q_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial x} = r_{s/d} (T_s - T_f) - r_{d/b1} (T_f - T_{b1}) \quad (IV.4)$$

Avec :

ϕ : la porosité de la couche drainante (-);

C_d : la capacité thermique volumique de la couche drainante en $(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$;

C_f : la capacité thermique volumique du fluide en $(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$;

q_f : le débit volumique du fluide en $(m^3 \cdot s^{-1})$;

T_{b1} : la température de la couche de base 1 en (K);

$r_{d/b1}$: le coefficient d'échange surfacique entre la couche drainante et la couche de base 1 en $(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$.

- **Couche de base 1**

$$C_{b1} h_{b1} \frac{\partial T_{b1}}{\partial t} = r_{d/b1} (T_f - T_{b1}) - r_{b1/b2} (T_{b1} - T_{b2}) \quad (IV.5)$$

Avec :

C_{b1} : la capacité thermique volumique de la couche de base 1 en $(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$;

$r_{b1/b2}$: le coefficient d'échange surfacique entre les deux couches de bases en $(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$;

T_{b2} : la température de la couche de base 2 en (K).

- **Couche de base 2**

$$C_{b2} h_{b2} \frac{\partial T_{b2}}{\partial t} = r_{b1/b2} (T_{b1} - T_{b2}) \quad (IV.6)$$

où C_{b2} est la capacité thermique volumique de la couche de base 2 en $(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$.

Bilan critique du modèle 1D

Ce modèle présente l'avantage de sa rapidité en terme de programmation et de temps d'exécution informatique. Avec ce modèle, nous décrivons facilement les phénomènes thermiques au sein de la chaussée en fonction du temps et suivant l'axe d'écoulement du fluide.

Son inconvénient est qu'il faut considérer deux couches de base induisant ainsi plus d'inconnues à déterminer.

La détermination des différentes températures des couches de la chaussée est faite par un modèle numérique présenté en annexe A.3. La modélisation de la chaussée étant faite, nous passons à celle de l'échangeur thermique servant de séparation de réseau.

IV.2 Modélisation de l'échangeur thermique

On considère un échangeur thermique à contre courant d'efficacité ε permettant le transfert de chaleur entre un fluide chaud (l'eau circulant dans le dromotherm) et un fluide froid (l'eau circulant dans le stockage thermique) comme le montre la figure IV.3 :

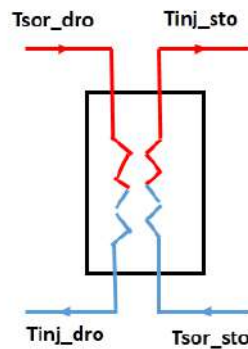


FIGURE IV.3: Échangeur thermique à contre courant

On note :

- \dot{m}_{dro} le débit massique du fluide dans le Dromotherme en ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$);
- Cp_{dro} la capacité thermique massique du fluide circulant dans le Dromotherme en ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$);
- \dot{m}_{sto} le débit massique du fluide dans le système géothermique du stockage en ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$);
- Cp_{sto} Capacité thermique massique du fluide circulant du dromotherm vers le stockage ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$);

On pose

$$coeff = \frac{\dot{m}_{dro} Cp_{dro}}{\dot{m}_{sto} Cp_{sto}} \quad (\text{IV.7})$$

La température d'entrée de chaque fluide étant supposée connue, nous pouvons déterminer les températures de sortie (T_{inj_dro} et T_{inj_sto}) des deux fluides à partir de l'efficacité de l'échangeur comme suit :

- **1er cas : $coeff < 1$ soit $\dot{m}_{dro}Cp_{dro} < \dot{m}_{sto}Cp_{sto}$**

$$\varepsilon = \frac{T_{sor_dro} - T_{inj_dro}}{T_{sor_dro} - T_{sor_sto}} \quad (IV.8)$$

soit :

$$T_{inj_dro} = T_{sor_dro} - \varepsilon * (T_{sor_dro} - T_{sor_sto}) \quad (IV.9)$$

Le fluide chaud sortant du dromotherm transmet sa chaleur au fluide froid circulant dans le stockage, on a donc :

$$Q = \dot{m}_{dro}Cp_{dro}(T_{sor_dro} - T_{inj_dro}) = \dot{m}_{sto}Cp_{sto}(T_{inj_sto} - T_{sor_sto}) \quad (IV.10)$$

soit :

$$T_{inj_sto} = T_{sor_sto} + coeff * (T_{sor_dro} - T_{inj_dro}) \quad (IV.11)$$

- **2ème cas : $coeff \geq 1$ soit $\dot{m}_{dro}Cp_{dro} \geq \dot{m}_{sto}Cp_{sto}$**

Dans ce cas , l'efficacité de l'échangeur est donnée par :

$$\varepsilon = \frac{T_{inj_sto} - T_{sor_sto}}{(T_{sor_dro} - T_{sor_sto})} \quad (IV.12)$$

soit :

$$T_{inj_sto} = T_{sor_sto} + \varepsilon * (T_{sor_dro} - T_{sor_sto}) \quad (IV.13)$$

Et :

$$T_{inj_dro} = T_{sor_dro} - \frac{T_{inj_sto} - T_{sor_sto}}{coeff} \quad (IV.14)$$

Dans la suite de notre modélisation, nous allons utiliser les équations (IV.9) et (IV.11) du 1er cas du fait des débits que nous utilisons pour nos simulations.

IV.3 Modélisation de la PAC

On note :

- P_{geo} : la puissance géothermique extraite en (W) ;
- P_{elec} : la puissance électrique de la PAC en (W) ;
- $besoin$: le besoin en chauffage et en ECS du bâtiment en (W) ;
- \dot{m}_{pac} : le débit massique de l'eau glycolée circulant dans la PAC en ($kg \cdot s^{-1}$).
- Cp_{pac} : la capacité thermique massique de l'eau glycolée en ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) ;
- T_{inj_pac} : la température d'injection du fluide venant du stockage vers la PAC en ($^{\circ}C$) ;
- T_{sor_pac} : la température de sortie du fluide de la PAC vers le stockage en ($^{\circ}C$).

La PAC est caractérisée par son coefficient de performance (COP) qui représente le rapport entre la puissance utile (besoin du bâtiment) et la puissance électrique fournie au compresseur de la PAC :

$$COP = \frac{besoin}{P_{elec}} \quad (IV.15)$$

Par hypothèse, on suppose que le COP de la PAC est fixe.
La puissance utile de la PAC s'exprime par :

$$besoin = P_{elec} + P_{geo} \quad (IV.16)$$

De ces deux expressions (IV.16) et (IV.15), on obtient la relation entre la puissance géothermique et le besoin du bâtiment :

$$P_{geo} = \frac{COP - 1}{COP} * besoin \quad (IV.17)$$

La puissance géothermique s'exprime aussi par :

$$P_{geo} = \dot{m}_{pac} C_{p_{pac}} (T_{inj_{pac}} - T_{sor_{pac}}) \quad (IV.18)$$

On en déduit la température de sortie du fluide dans la PAC par :

$$T_{sor_{pac}} = T_{inj_{pac}} - \frac{P_{geo}}{\dot{m}_{pac} * C_{p_{pac}}} \quad (IV.19)$$

IV.4 Modélisation du stockage thermique

Le stockage est l'élément central du système.

Considérons un volume élémentaire représentatif de ce stockage comme le montre la figure IV.6

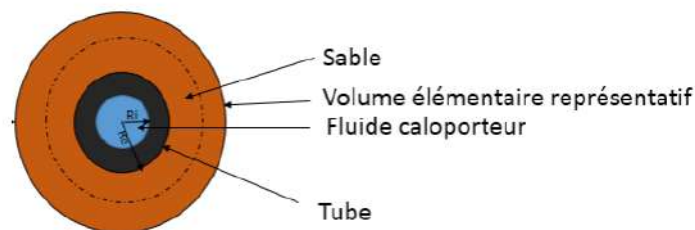


FIGURE IV.4: Volume représentatif du stockage

On note :

- m_{sable} : la masse du sable humide (sable sec + eau) en (kg) ;
- $C_{p_{sable}}$: la capacité calorifique massique du sable humide en ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) ;
- T_{stock} : la température du stockage en ($^{\circ} C$) ;
- $T_{sous-sol}(z, t)$: la température du sous-sol environnement du stockage à une côte z en ($^{\circ} C$)
- e_{iso} : épaisseur de l'isolant (du polystyrène) autour du stockage en (m) ;

- λ_{iso} : la conductivité thermique de l'isolant en ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$);
- S_{iso} : la surface de l'isolant en (m^2).

Le stockage est couplé au Dromotherm via l'échangeur thermique et est couplé au bâtiment via la PAC.

Le bilan d'énergie au niveau du stockage donne :

$$m_{sable} C_{p_{sable}} \frac{dT_{stock}}{dt} = \dot{m}_{sto} C_{p_{sto}} (T_{inj_{sto}} - T_{sor_{sto}}) + \dot{m}_{pac} C_{p_{pac}} (T_{sor_{pac}} - T_{inj_{pac}}) - \frac{T_{stock} - T_{sous-sol}(z, t)}{\frac{e_{iso}}{\lambda_{iso} S_{iso}}} \quad (IV.20)$$

Xavier MOCH, dans sa thèse [9] a modélisé la température annuelle du sous-sol de Chambéry par :

$$T_{sous-sol}(z, t) = T_{moy} - T_{amp} \cos(\omega_a(t - t_f) + z\sqrt{\frac{\omega_a}{2a}}) \exp(z\sqrt{\frac{\omega_a}{2a}}) \quad (IV.21)$$

Où :

T_{moy} : est la température moyenne annuelle du sous-sol (environ 11 °C);

T_{amp} : est l'amplitude annuelle de la température du sous-sol (environ 9,1 °C);

ω_a : la pulsation annuelle en (rad/s);

t_f : est le jour le plus froid (le 18 janvier à Chambéry);

a : la diffusivité thermique du sous-sol en ($m^2 \cdot s^{-1}$).

Ce bilan d'énergie faite sur le stockage thermique nous a conduit à l'obtention d'une équation différentielle d'ordre 1 à plusieurs inconnues.

Exprimons toutes les températures en fonction de la température du stockage T_{stock} pour obtenir une équation différentielle à une inconnue dont on connaît les méthodes de résolution.

Le fluide venant du Dromotherm et le stockage échangent de la chaleur par convection et conduction et la quantité de chaleur échangée s'exprime par :

$$q_1 = \dot{m}_{sto} C_{p_{sto}} (T_{inj_{sto}} - T_{sor_{sto}}) = k \left(\frac{T_{inj_{sto}} + T_{sor_{sto}}}{2} - T_{stock} \right) \quad (IV.22)$$

Soit :

$$T_{inj_{sto}} \left(\dot{m}_{sto} * C_{p_{sto}} - \frac{k}{2} \right) = \left(\dot{m}_{sto} * C_{p_{sto}} + \frac{k}{2} \right) T_{sor_{sto}} - k T_{stock}$$

Ou encore :

$$T_{inj_{sto}} = \frac{\left(\dot{m}_{sto} * C_{p_{sto}} + \frac{k}{2} \right) T_{sor_{sto}} - k T_{stock}}{\dot{m}_{sto} * C_{p_{sto}} - \frac{k}{2}} \quad (IV.23)$$

Où k désigne le coefficient global d'échange thermique en ($W \cdot K^{-1}$).

En égalant les équations (IV.11) et (IV.23), on a :

$$T_{sor_{sto}} + coeff * \varepsilon * (T_{sor_{dro}} - T_{sor_{sto}}) = \frac{\left(\dot{m}_{sto} * C_{p_{sto}} + \frac{k}{2} \right) T_{sor_{sto}} - k T_{stock}}{\dot{m}_{sto} * C_{p_{sto}} - \frac{k}{2}}$$

En posant $B = coeff * \varepsilon * (\dot{m}_{sto} * Cp_{sto} - \frac{k}{2})$

On obtient :

$$(\dot{m}_{sto} * Cp_{sto} - \frac{k}{2}) * T_{sor_sto} + B * (T_{sor_dro} - T_{sor_sto}) = (\dot{m}_{sto} * Cp_{sto} + \frac{k}{2}) T_{sor_sto} - k T_{stock}$$

Soit :

$$(\dot{m}_{sto} * Cp_{sto} - \frac{k}{2} - B - \dot{m}_{sto} * Cp_{sto} - \frac{k}{2}) * T_{sor_sto} = -B * T_{sor_dro} - k T_{stock}$$

Ou encore :

$$(k + B) * T_{sor_sto} = k T_{stock} + B * T_{sor_dro}$$

On obtient finalement la température de retour du fluide du stockage vers le dromotherm par :

$$T_{sor_sto} = \frac{k T_{stock} + B * T_{sor_dro}}{k + B} \quad (IV.24)$$

Par la même démarche, nous allons déterminer l'expression de la température de retour du fluide géothermique vers la PAC.

En effet, la quantité de chaleur échangée entre le fluide géothermique et le stockage s'exprime de la façon suivante :

$$q_2 = \dot{m}_{pac} Cp_{pac} (T_{sor_pac} - T_{inj_pac}) = k (T_{stock} - \frac{T_{inj_pac} + T_{sor_pac}}{2}) \quad (IV.25)$$

Soit :

$$T_{sor_pac} = \frac{(\dot{m}_{pac} * Cp_{pac} + \frac{k}{2}) T_{inj_pac} - k T_{stock}}{\dot{m}_{pac} * Cp_{pac} - \frac{k}{2}} \quad (IV.26)$$

Les deux expressions (IV.19) et (IV.26) de T_{sor_pac} nous permettent d'obtenir T_{inj_pac} :

$$T_{inj_pac} = T_{stock} - \frac{C * P_{geo}}{k}$$

avec :

$$C = 1 - \frac{k}{2 \dot{m}_{pac} Cp_{pac}} \quad (IV.27)$$

Détermination du coefficient d'échange global k

k est le coefficient d'échange global (conduction et convection) entre le fluide et le sable.

$$k = \frac{1}{R_{cond} + R_{conv}} \quad (IV.28)$$

où R_{cond} et R_{conv} en ($K \cdot W^{-1}$) désignent respectivement les résistances de conduction et de convection correspondant aux échanges de chaleur entre la paroi du tube et le fluide caloporteur.

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right)}{2\pi N_{tubes} L_{tube} \lambda_{tube}} \quad (IV.29)$$

et

$$R_{conv} = \frac{1}{\pi N_u N_{tubes} L_{tube} \lambda_f} \quad (IV.30)$$

Avec :

- R_e : le rayon extérieur du tube en (m);
- R_i : le rayon intérieur du tube en (m);
- L_{tube} : La longueur d'un tube en (m);
- N_{tubes} : Le nombre de tubes;
- Nu : Le nombre de Nusselt de l'écoulement du fluide (-);
- λ_f : conductivité thermique du fluide caloporteur en ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$);
- λ_{tube} : conductivité thermique du tube en ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$).

IV.5 Modélisation du bâtiment

IV.5.1 Besoin en chauffage

Pour modéliser le bâtiment afin de déterminer ses besoins en chauffage, nous utilisons la modélisation RC. Dans le cas de notre étude, nous assimilons le bâtiment à un modèle R3C comme le montre la figure IV.5 :

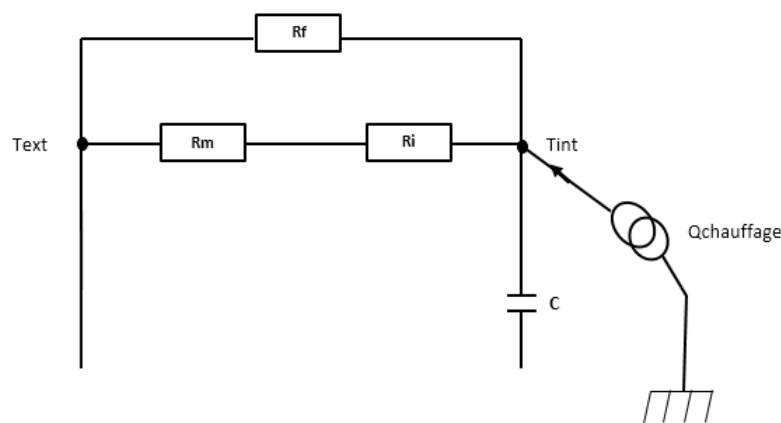


FIGURE IV.5: Modèle R3C du bâtiment

On note :

- T_{int} : température intérieure du bâtiment en ($^{\circ}C$);
- $T_{consigne}$: température de consigne en ($^{\circ}C$);

- T_{ext} : température extérieure en (°C);
- R_m : Résistance thermique de conduction des murs en ($K \cdot W^{-1}$);
- R_{si} : Résistance superficielle intérieure en ($K \cdot W^{-1}$);
- R_f : résistance de fuite (infiltrations+vitre+renouvellement d'air) en ($K \cdot W^{-1}$).

Par analogie électrique, on assimile les températures à des tensions et les puissances à des intensités en première approximation, on a donc :

$$\frac{T_{int} - T_{ext}}{R_m + R_{si}} + \frac{T_{consigne} - T_{ext}}{R_f} + C \frac{dT_{int}}{dt} = Q_{chauffage}$$

Soit :

$$C \frac{dT_{int}}{dt} = Q_{chauffage} - \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_m + R_{si}} - \frac{T_c - T_{ext}}{R_f} \quad (IV.31)$$

Pour maintenir T_{int} constante et égale à $T_{consigne}$, on doit donc développer :

$$Q_{chauffage} = (T_{consigne} - T_{ext}) * \left(\frac{1}{R_m + R_{si}} + \frac{1}{R_f} \right) \quad (IV.32)$$

Les différentes résistances de (IV.32) s'expriment comme suit :

- **La résistance thermique par conduction des murs**

Considérons une paroi comme le montre la figure ci-dessous : IV.6 .

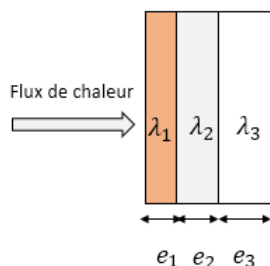


FIGURE IV.6: La paroi du bâtiment

La résistance thermique par conduction de cette paroi est donnée par :

$$R_{th} = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i S} \quad (IV.33)$$

Où

R_{th} :est la résistance thermique par conduction en $K \cdot W^{-1}$;

e_i : est l'épaisseur du matériau en (m) ;

λ_i : est la conductivité thermique du matériau $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$;

S : la surface en (m^2).

La résistance équivalente de l'ensemble des parois du bâtiment (enveloppe+toit+plancher) s'exprime comme suit :

$$R_m = \frac{1}{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i S_{enveloppe}}} + \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i S_{toit}}} + \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i S_{plancher}}} } \quad (IV.34)$$

- **Résistance superficielle intérieure**

La résistance thermique d'échange d'une surface intérieure (R_{si}) est égale à l'inverse du coefficient d'échange thermique de surface intérieure h_i :

$$R_{si} = \frac{1}{h_i S} \quad (IV.35)$$

Les valeurs des résistances thermiques d'échange superficiel R_i sont données dans un tableau (en annexe B.3) extrait des règles Th-Bât (règles permettant la détermination des données d'entrée aux calculs de la performance énergétique du bâtiment pour le calcul réglementaire) [14].

- **Résistance due aux infiltrations et aux vitres**

La résistance due aux infiltrations se calcule par :

$$R_{inf} = \frac{1}{\rho_{air} C_{p_{air}} m_{inf} S_{ext}} \quad (IV.36)$$

Où :

ρ_{air} est la masse volumique de l'air en (kg·m⁻³);

$C_{p_{air}}$ est la capacité thermique massique de l'air en (J·kg⁻¹·K⁻¹);

m_{inf} : le débit d'infiltration d'air surfacique en (m⁻³·s⁻¹·m⁻²);

S_{ext} : la surface extérieure de l'enveloppe du bâtiment en (m²).

La résistance thermique des fenêtres est donnée par :

$$R_{fen} = \frac{1}{U_{fen} S_{fen}} \quad (IV.37)$$

Où :

U_{fen} : est le coefficient de transmission surfacique de la fenêtre en (W·m⁻²·K⁻¹);

S_{fen} :est la surface des fenêtres en (m²).

On peut donc exprimer la résistance équivalente de celle due aux infiltrations et celle des fenêtres par :

$$R_f = \frac{1}{\frac{1}{R_{inf}} + \frac{1}{R_v}} \quad (IV.38)$$

IV.5.2 Besoin en ECS

L'ECS constitue un autre élément de confort dans le bâtiment. D'après l'ADEME [15], les besoins journaliers moyens par personne sur une année sont de 56 ± 23 litres à 40 °C soit 30 ± 12 litres à 60 °C.

Notons :

Q_{ECS} : le besoin instantané en ECS exprimé en (W) ;

V : la consommation d'eau moyenne journalière pour une personne seule en (l) ;

N_{pers} : Nombre d'occupants du bâtiment ;

ρ_{eau} : la masse volumique de l'eau exprimée en ($\text{kg}\cdot\text{l}^{-1}$) ;

Cp_{eau} : la capacité thermique massique de l'eau en ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ;

T_{ECS} : La température de l'eau chaude sanitaire (en ° C) ;

T_{reseau} : La température de l'eau du réseau (en ° C) que l'on choisit de modéliser comme une fonction sinusoïdale de période annuelle. La puissance instantanée de production de l'ECS se calcule par :

$$Q_{ECS} = \frac{\rho_{eau} * Cp_{eau} * N_{pers} * V * (T_{ECS} - T_{reseau})}{24 * 3600} \quad (\text{IV.39})$$

IV.5.3 Besoin total du bâtiment

Le besoin de total du bâtiment est la somme du besoin en chauffage et celui en ECS :

$$besoin = Q_{chauffage} + Q_{ECS} \quad (\text{IV.40})$$

IV.6 Récapitulatif des équations

La modélisation des différents composants du démonstrateur nous a permis d'établir les expressions des différentes températures des fluides circulant dans le système. Pour des raisons de lisibilité, il est important de faire un récapitulatif des équations les plus importantes. Nous obtenons le système d'équations (IV.41) :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{sor_dro} = F(t, T_s, T_{b1}, T_{b2}, T_{inj_dro}) \\ T_{inj_dro} = T_{sor_dro} - \varepsilon * (T_{sor_dro} - T_{sor_sto}) \\ \frac{dT_{stock}}{dt} = \frac{1}{m_{sable} Cp_{sable}} (\dot{m}_{sto} Cp_{sto} (T_{inj_sto} - T_{sor_sto}) + \dot{m}_{pac} Cp_{pac} (T_{sor_pac} - T_{inj_pac}) - \frac{T_{stock} - T_{sous-sol}(z,t)}{\lambda_{iso} \delta_{iso}}) \\ T_{inj_sto} = \frac{(m_{sto} * Cp_{sto} + \frac{k}{2}) T_{sor_sto} - k T_{stock}}{m_{sto} * Cp_{sto} - \frac{k}{2}} \\ T_{sor_sto} = \frac{k T_{stock} + B * T_{sor_dro}}{k + B} \\ T_{inj_pac} = T_{stock} - \frac{C * P_{geo}}{k} \\ T_{sor_pac} = \frac{(m_{pac} * Cp_{pac} + \frac{k}{2}) T_{inj_pac} - k T_{stock}}{m_{pac} * Cp_{pac} - \frac{k}{2}} \\ Q_{chauffage} = (T_{consigne} - T_{ext}) * (\frac{1}{R_m + R_{si}} + \frac{1}{R_f}) \\ Q_{ECS} = \frac{\rho_{eau} * Cp_{eau} * N_{pers} * V * (T_{ECS} - T_{reseau})}{24 * 3600} \\ besoin = Q_{chauffage} + Q_{ECS} \\ P_{geo} = \frac{COP - 1}{COP} * besoin \end{array} \right. \quad (\text{IV.41})$$

Où :

F est une fonction représentant l'ensemble des équations précédemment écrites sur la modélisation 1D du dromotherm ;

IV.7 Résolution numérique

Vu la complexité du système, une résolution analytique n'est pas envisageable. On fait appel aux méthodes numériques pour résoudre les problèmes de cette nature. Pour ce faire, nous avons écrit un schéma numérique suivi d'un algorithme de résolution codé sous le langage Python et traduit par le logigramme ci-dessous (figure IV.7) :

Notons :

- **i** l'indice temporel
- **DRO** le booléen indiquant si le dromotherme est en marche
- **PAC** le booléen indiquant si la PAC est en marche
- **step** le pas de temps exprimé en secondes

Le schéma ci-dessous décrit une itération du système complet, pour passer de l'indice i-1 à i.

StockLoop() $a = DRO * m_{sto} * c_{psto} * (T_{inj_sto}[i-1] - T_{sor_sto}[i-1]) - PAC * P_{geo}[i-1]$ $diff[i] = a / (m_{sable} * c_{psable})$ si a non nul 0 si a nul $T_{sable}[i] = T_{sable}[i-1] + step * diff[i]$	dromoRun(q) $dromo.iterate(i, T_{inj_dro}[i-1] + kelvin, q)$ $T_{sor_dro}[i] = dromo.T[i, 1, -1] - kelvin$	noSupply() $T_{inj_dro}[i] = T_{sor_dro}[i]$ $T_{inj_sto}[i] = T_{inj_sto}[i-1]$ $T_{sor_sto}[i] = T_{sor_sto}[i-1]$
consume() $T_{inj_pac}[i] = T_{sable}[i] - C * P_{geo}[i] / k$ $T_{sor_pac}[i] = T_{inj_pac}[i] - P_{geo}[i] / (m_{pac} * c_{pac})$	noConsumption() $T_{inj_pac}[i] = T_{inj_pac}[i-1]$ $T_{sor_pac}[i] = T_{sor_pac}[i-1]$	EnergySupply() $T_{sor_sto}[i] = (k * T_{sable}[i] + B * T_{sor_dro}[i]) / (k + B)$ $T_{inj_sto}[i] = T_{sor_sto}[i] + coeff * eff * (T_{sor_dro}[i] - T_{sor_sto}[i])$ $T_{inj_dro}[i] = T_{sor_dro}[i] - eff * (T_{sor_dro}[i] - T_{sor_sto}[i])$

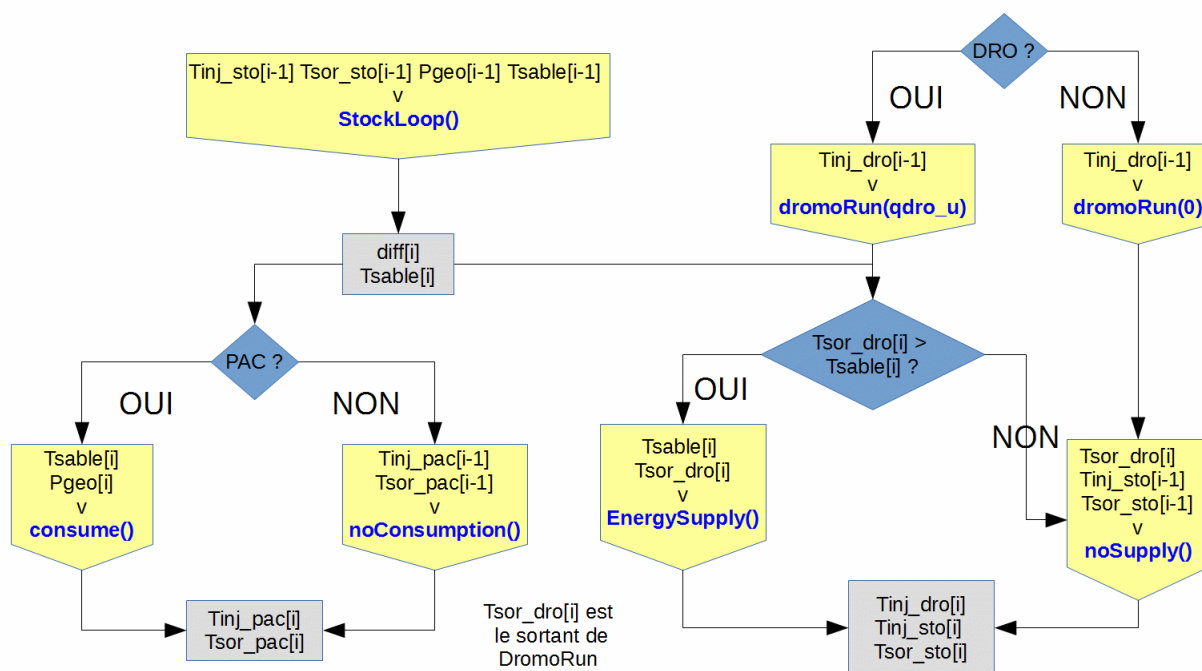


FIGURE IV.7: Logigramme



RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats issus de nos modélisations faites précédemment. D'une part, on fait la validation du modèle 1D de la chaussée et d'autre part, on présente les résultats du couplage de la chaussée au reste du démonstrateur.

V.1 Validation du modèle 1D

Dans cette section, on cherche à valider le modèle thermo-hydraulique 1D du dromotherm présenté dans le chapitre 3. L'objectif de cette validation est de pouvoir disposer d'un modèle "fiable" et rapide en terme d'exécution informatique afin de l'utiliser dans la suite pour le couplage de l'ensemble du système.

On présente d'abord les données d'entrée utilisées ; ensuite, on expose les résultats issus de la simulation du modèle 1D ; enfin, on procède à une comparaison de ces résultats à ceux du modèle 2D existant développé (sous le langage Fortran) par le Cerema.

V.1.1 Données météo

La France est répartie en huit (08) zones climatiques. Le démonstrateur sera implanté dans la commune du Bourget du Lac, département de la Savoie (73). On utilise donc les données météo de la zone climatique H1c pour nos simulations. Le fichier météo utilisé nous fournit au pas de temps horaire [16] :

- La température de l'air (figure V.1) T_{ext} (en $^{\circ}C$) ;
- Le rayonnement global (figure V.2) R_g (en W/m^2) ;
- Le rayonnement atmosphérique (figure V.2) R_{atm} (en W/m^2) ;
- La vitesse du vent pour une altitude de 10 m en zone ouverte (figure V.3) V_{vent} (en m/s).

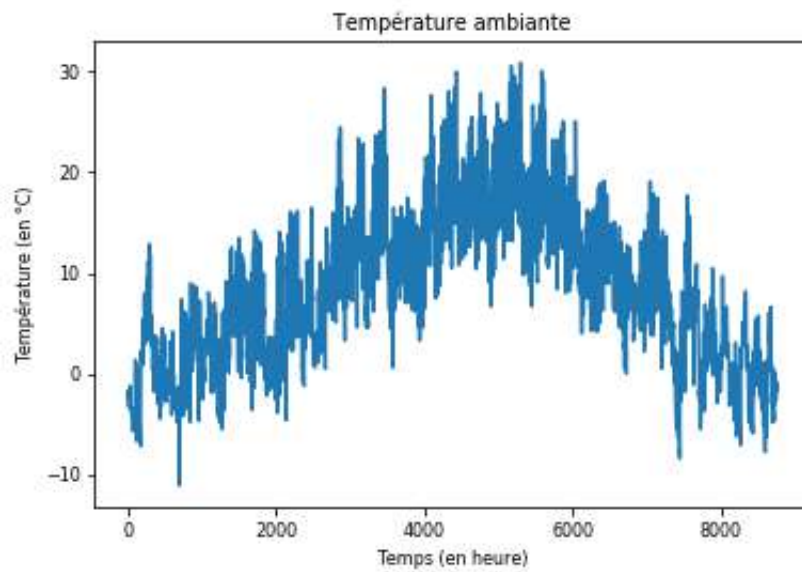


FIGURE V.1: Température de l'air sur une année type dans la zone climatique H1c

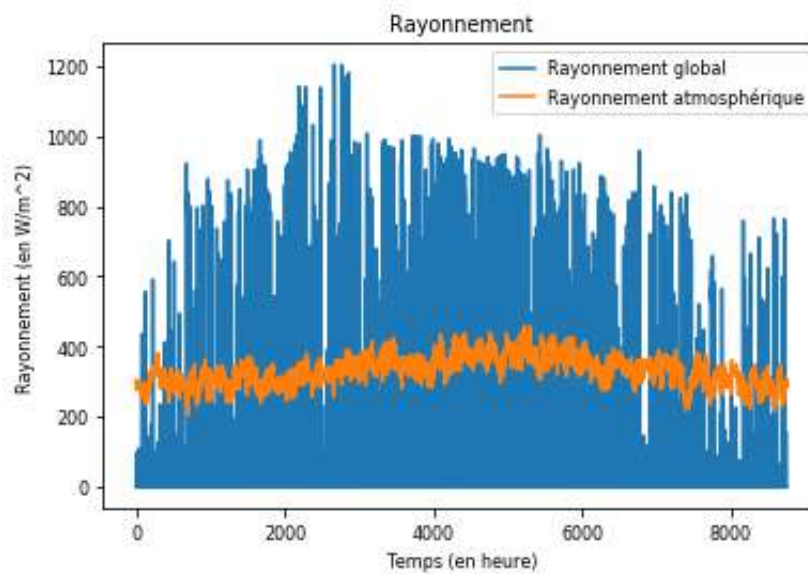


FIGURE V.2: Rayonnements solaire global et atmosphérique sur une année type dans la zone climatique H1c

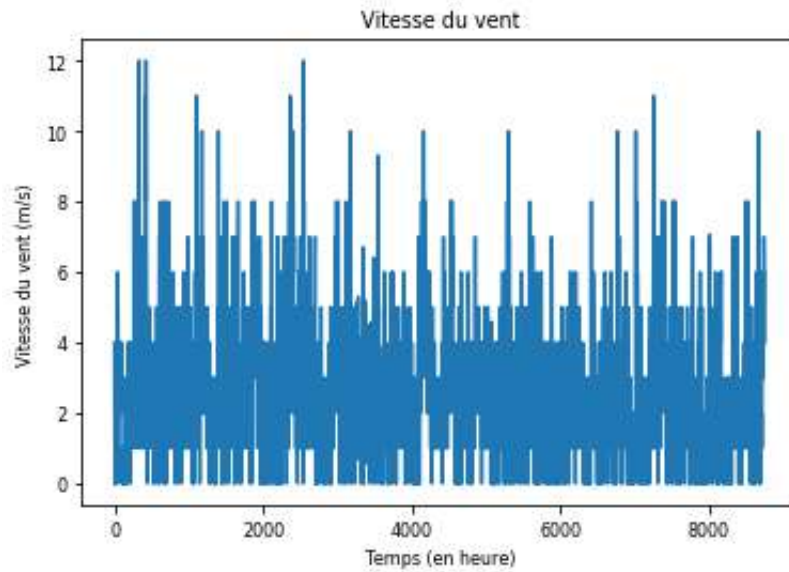


FIGURE V.3: Vitesse du vent pour une altitude de 10m sur une année type dans la zone climatique H1c

V.1.2 Géométrie de la chaussée

On considère une chaussée de surface 4m*1m avec quatre couches renseignées dans le tableau V.1 :

Tableau V.1: Géométrie de la chaussée

Couches	Type	Epaisseur (cm)
1	BBSG	6
2	BBDr	8
3	EME	5
4	massif	90

Le fluide circule dans le dromotherm à un débit de 35 l/h avec une température d'injection de 10 °C à l'instant initial. L'annexe B.1 présente les autres données utilisées pour la simulation de ce modèle 1D dont les résultats sont présentés comme suit :

V.1.3 Simulation modèle 1D

La simulation du modèle 1D a consisté à déterminer les profils de température des différentes couches de la chaussée. Elle a été faite sur 3 mois de l'été 2010. La figure V.4 présente les différents profils obtenus :

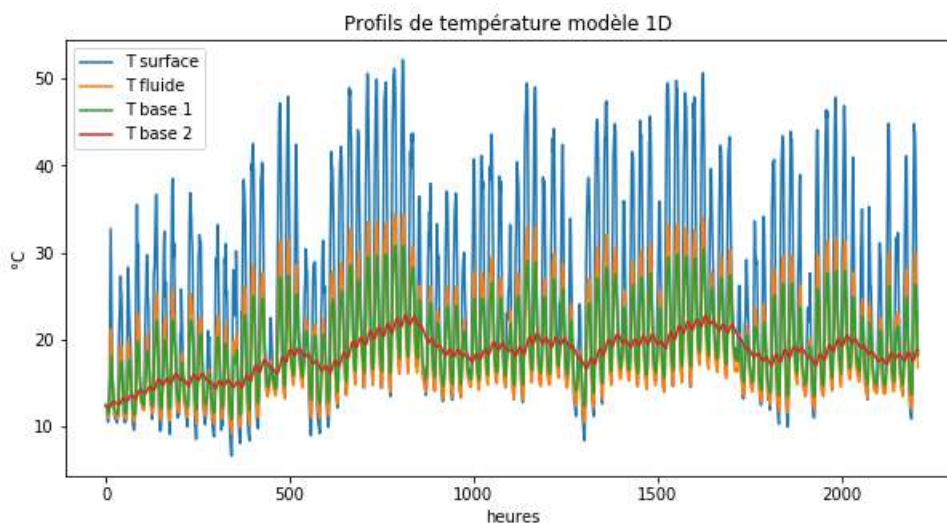


FIGURE V.4: Profils de température de la chaussée modèle 1D

D'après ce graphique, on constate que la couche de surface s'échauffe la plus jusqu'à une température de 50 °C environs. Les autres couches s'échauffent également mais dans des proportions plus faibles que la couche de surface.

Quant au fluide, il s'échauffe et atteint des températures de 35 °C environs durant l'été. On récupère ainsi de la chaleur.

Le Cerema a développé un modèle existant 2D. La chaussée a été simulée à l'aide de ce modèle 2D avec les mêmes données que celui du modèle 1D.

V.1.4 Simulation modèle 2D du Cerema

La figure V.5 présente les profils de température obtenus par le Cerema avec son modèle 2D existant :

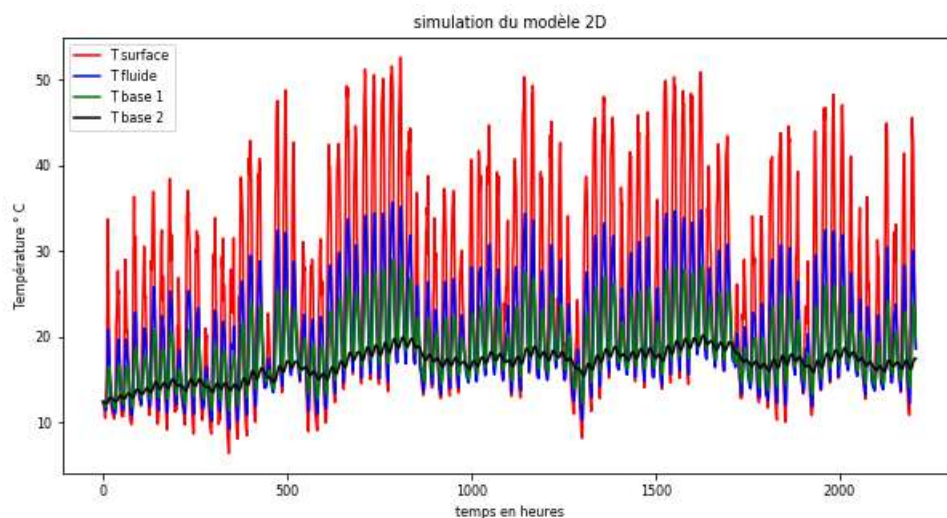


FIGURE V.5: Profils de température de la chaussée modèle 2D

Avec les résultats de ce modèle, on peut procéder à une comparaison avec ceux de notre modèle 1D afin de procéder à sa validation :

V.1.5 Comparaison des deux modèles

Pour comparer les deux modèles, nous déterminons l'écart absolu entre les températures obtenues par le modèle 1D et celles du modèle 2D du Cerema.

L'écart absolu se calcule par :

$$E_{absolu} = |T(2D) - T(1D)| \quad (V.1)$$

La figure V.6 montre la comparaison des deux modèles :

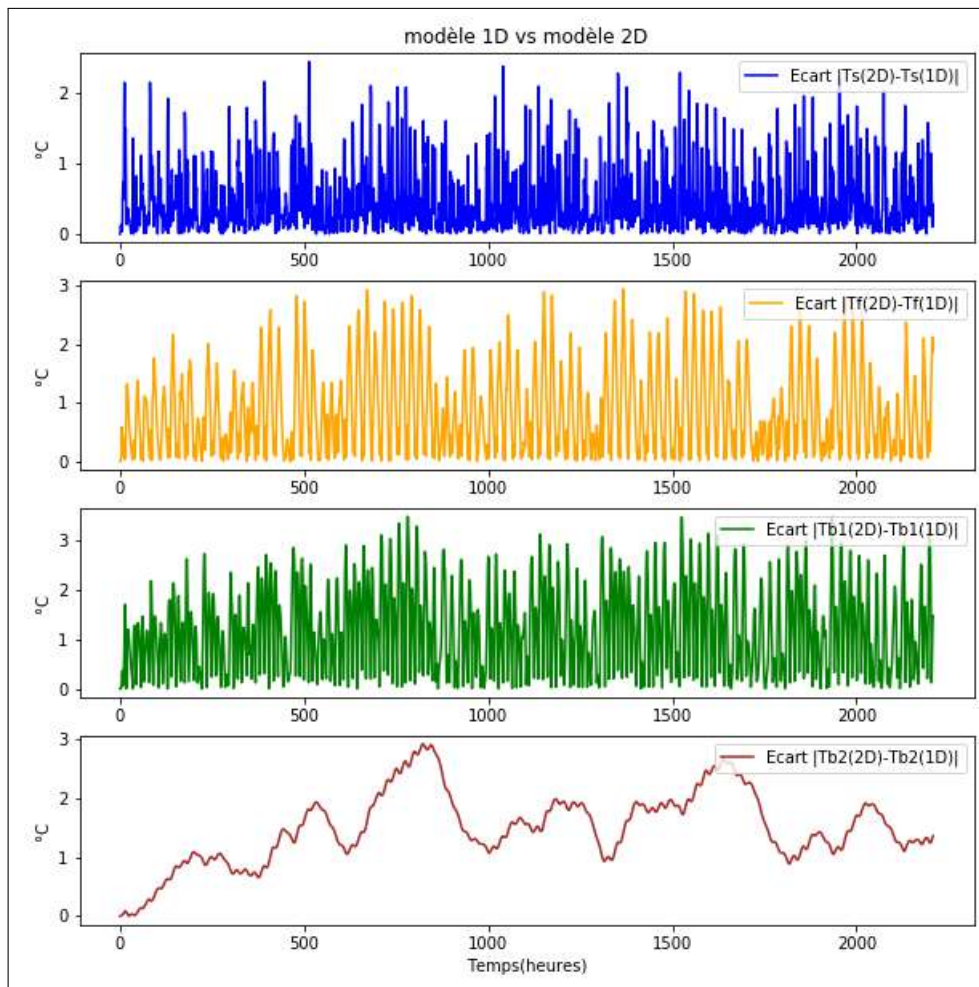


FIGURE V.6: Comparaison des modèles 1D et 2D

Sur cette figure, on constate que les écarts entre les températures du modèles 1D et celles du modèle 2D du Cerema sont faibles et ne dépassent pas 3 °C environ.

Le tableau V.2 présente les écarts absolus maximums calculés :

Tableau V.2: Écarts absolus maximums entre les températures des modèles 1D et 2D

Températures	Écart absolu (°C)
Température de surface	2,4
Température du fluide	2,9
Température de base 1	2,5
Température de base 2	2,9

Ce tableau montre que les écarts absolus maximums entre les températures du modèle 1D et celles du modèle 2D sont faibles (le plus grand écart absolu étant de 2,9 °C).

Des observations faites sur les figures V.4, V.5 et V.6 et du tableau V.2 (même allure des températures, même ordre de grandeur et écarts faibles), on peut donc conclure que le modèle 1D donne des résultats satisfaisants et nous pouvons l'utiliser pour la suite de nos travaux.

V.2 Simulation du système couplé

V.2.1 Caractéristiques du démonstrateur

Dans cette partie, nous considérons un démonstrateur constitué de :

- un dromotherm de surface $4 * 7.5 m$ ayant les mêmes caractéristiques que celui considéré dans la partie V.1.2. Le débit du fluide qui circule dans la couche poreuse est de 262,5 l/h ;
- un échangeur de séparation qui est un échangeur thermique à plaques d'efficacité 0,8 ;
- un stockage de volume $45 m^3$ est constitué de 4 rangés de 8 tubes géothermiques horizontaux reliés alternativement au dromotherm et à la PAC. Du polystyrène d'épaisseur 20 cm est posé sur le contour du stockage (sauf la surface de contact avec le bâtiment) pour limiter les pertes ;
- une PAC de COP = 3 avec un débit de fluide géothermique de 140 l/h ;
- un bâtiment en bois de $20 m^2$ au sol avec une température de consigne de chauffe de 19 °C. L'ECS est stockée à une température de 60 °C dans un ballon de volume équivalent à la consommation journalière de 6 personnes (Nous considérons 35 litres à 60 °C par personne en moyenne par jour [15]). Ce bâtiment est thermiquement représentatif d'un BBC de $120 m^2$.

L'annexe B donne plus de détails sur le démonstrateur (paramètres thermo-hydrauliques du dromotherm, données sur le stockage et sur l'habitat) .

Pour simuler le fonctionnement du démonstrateur, plusieurs scénarios ont été envisagés constituant ainsi un ensemble de stratégies de pilotage du démonstrateur.

V.2.2 Les stratégies de pilotage

Le tableau V.3 présente les différentes stratégies de pilotages qui ont été définies :

Tableau V.3: Stratégies de pilotage

Cas	Dromotherme(Eté/Hiver)	PAC(Eté/Hiver)	Fonctionnement
1	ON/ON	OFF/OFF	Recharge annuelle du stock sans consommation aucune
2	ON/OFF	ON/OFF	Consommation estivale d'ECS
3	ON/OFF	OFF/ON	Recharge du stock en été puis utilisation pour chauffage sur l'hiver
4	ON/OFF	ON/ON	Recharge du stock en été puis utilisation d'ECS+Chauffage(en hiver)
5	ON/ON	OFF/ON	Recharge du stock toute l'année puis utilisation Chauffage en hiver)
6	ON/ON	ON/ON	Recharge du stock toute l'année puis utilisation d'ECS+Chauffage

Ces différents cas d'usage ont été simulés avec les mêmes données météo présentées dans la partie V.1.1. La période estivale commence du 1^{er} mai au 30 septembre et la période hivernale court du 1^{er} octobre au 30 avril. Les simulations commencent au tout début de la période estivale. Le pas de temps est de 1 heure. Pour des raisons de lisibilité des graphiques, les résultats sur plusieurs années ne sont pas représentés. Pour les cas étudiés, on constate cependant une bonne reproductibilité des résultats d'une année sur l'autre. Nous présentons dans la suite, les différents résultats obtenus pour chaque cas d'usage définis.

V.2.3 Cas d'usage 1 : Recharge annuelle du stock sans consommation aucune

La figure V.7 montre les résultats issus de la simulation du premier cas de figure qu'est la recharge du stockage durant toute l'année sans consommation aucune.

DÉVELOPPEMENT D'UN DÉMONSTRATEUR DE STOCKAGE THERMIQUE INTER SAISONNIER COUPLÉ A UN ÉCHANGEUR THERMIQUE ROUTIER

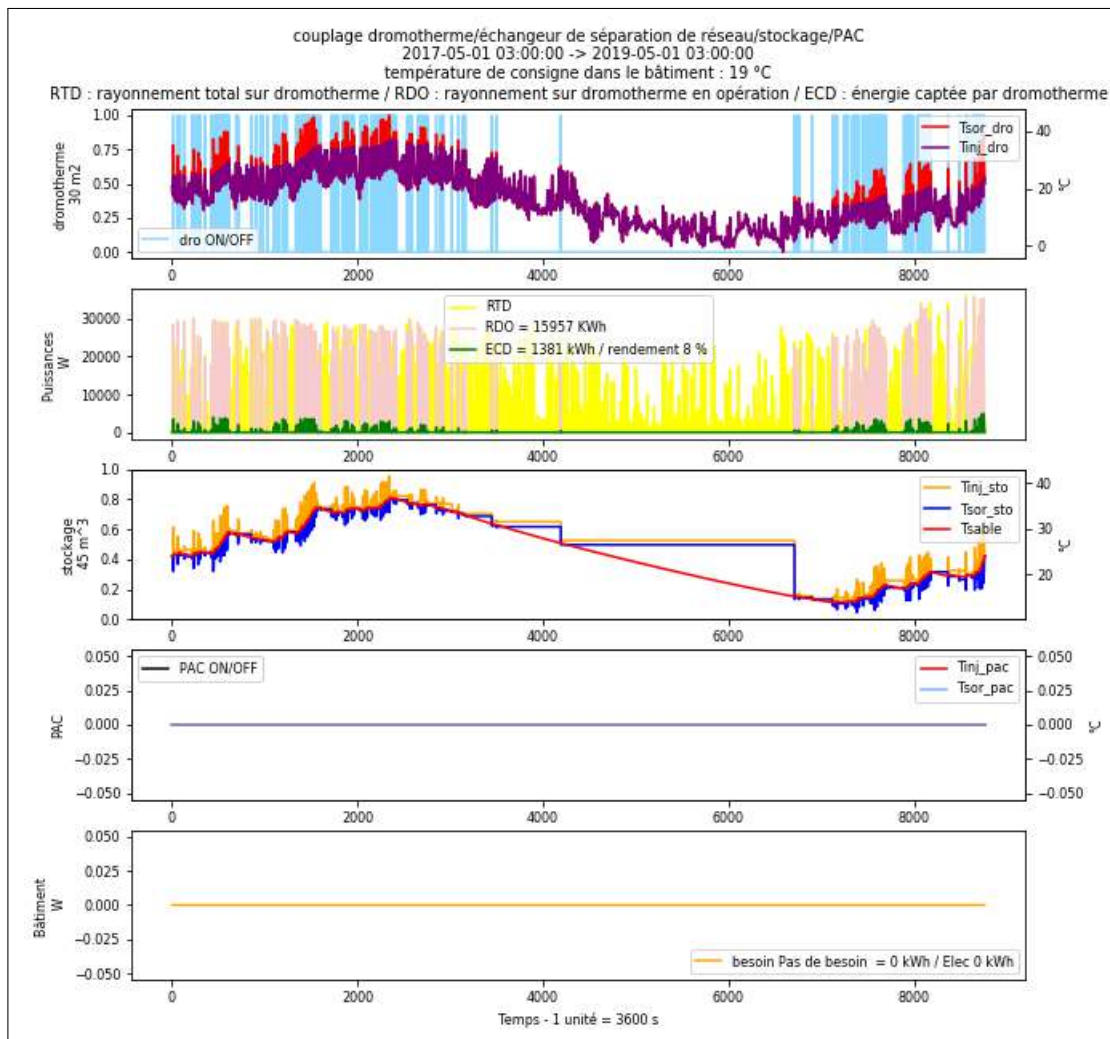


FIGURE V.7: Simulation de la recharge annuelle du stock sans consommation aucune

Cette figure montre un fonctionnement "à vide" du démonstrateur.

Le premier graphique est relatif au profil de température du fluide circulant dans le dromotherm. On constate que pendant l'été ($t < 3672$ heures), le fluide récupère de la chaleur en s'échauffant de 20 °C à 40 °C environ.

Le deuxième graphique présente les rayonnements solaires reçus par le dromotherm. On constate que les rayonnements solaires reçus par le dromotherm pendant la période estivale sont très importants et élevés (jusqu'à 30000 W). Cela explique le réchauffement du fluide sur le premier graphique.

Le troisième graphique, quant à lui montre la température du stockage et celle du fluide venant de l'échangeur de séparation. On constate que le stockage se recharge et ceci se traduit par l'élévation de sa température de 20 °C à 35 °C environ.

Quant à la période hivernale, le dromotherm est pendant un bon moment (près des $2/3$ de l'hiver) à l'arrêt; le fluide ne récupère pas de chaleur : la température de sortie du fluide est égale à celle de son entrée dans le dromotherm. Cela s'explique par le faible ensoleillement que montre le deuxième graphique pendant cette période.

Le stockage se refroidit jusqu'à 10 °C environ. Pour le reste de l'hiver, il commence par se réchauffer mais faiblement et revient à sa température initiale en début d'été (20 °C environ).

Les quatrième et cinquième graphique de la figure V.7 relatifs respectivement à la température de l'eau glycolée de la PAC et à la consommation du bâtiment montrent effectivement qu'il n'y a aucune consommation durant l'année : la PAC à l'arrêt et besoin nul durant toute l'année.

De cette analyse, il ressort que la température maximale du stockage en été est de 35 °C environ (36,8 °C pour être plus précis) et est de 10 °C en hiver. On ne pourra pas dépasser ces limites pour les autres cas d'usage vu que ce cas d'usage est à vide (aucune consommation).

Pour faire une analyse complète, il est important de faire un bilan énergétique. Un des moyens pour réaliser un tel bilan est le diagramme de Sankey.

Bilan énergétique

La figure V.8 montre le bilan énergétique de ce premier cas d'usage.

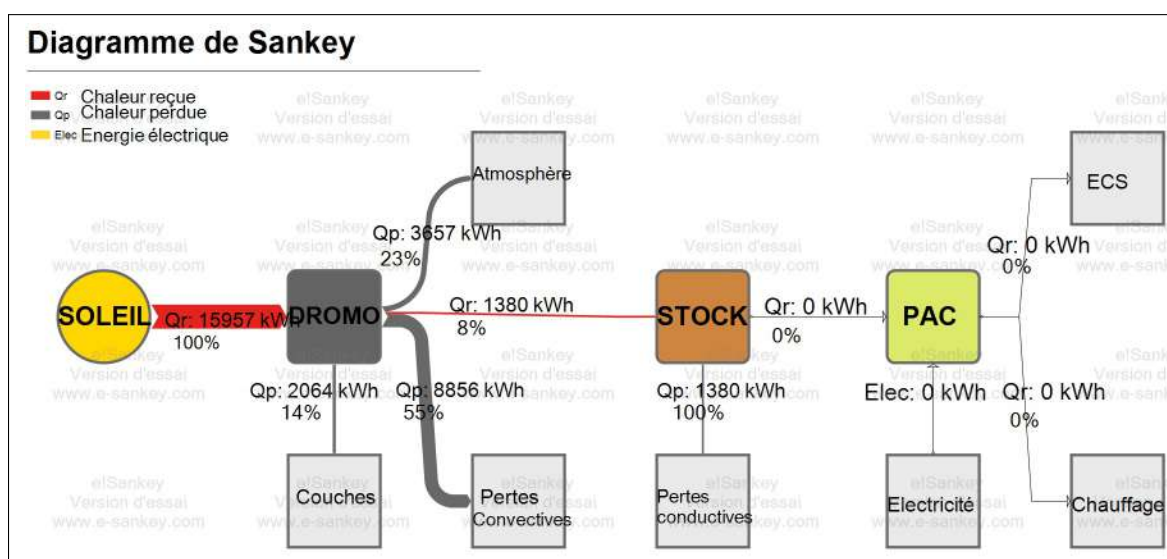


FIGURE V.8: Bilan énergétique de la recharge annuelle sans consommation aucune

D'après cette figure, il en ressort que seulement 8% (1380 kWh/an) de l'énergie solaire globale reçue par le dromotherm, sont transmis au fluide et sont entièrement perdues par conduction au niveau du stockage.

La PAC étant à l'arrêt toute l'année, elle ne consomme donc pas d'énergie électrique dans ce cas d'usage 1.

V.2.4 Cas d'usage 2 : Consommation estivale d'ECS

La figure V.9 présente les résultats de la simulation de la consommation estivale d'ECS.

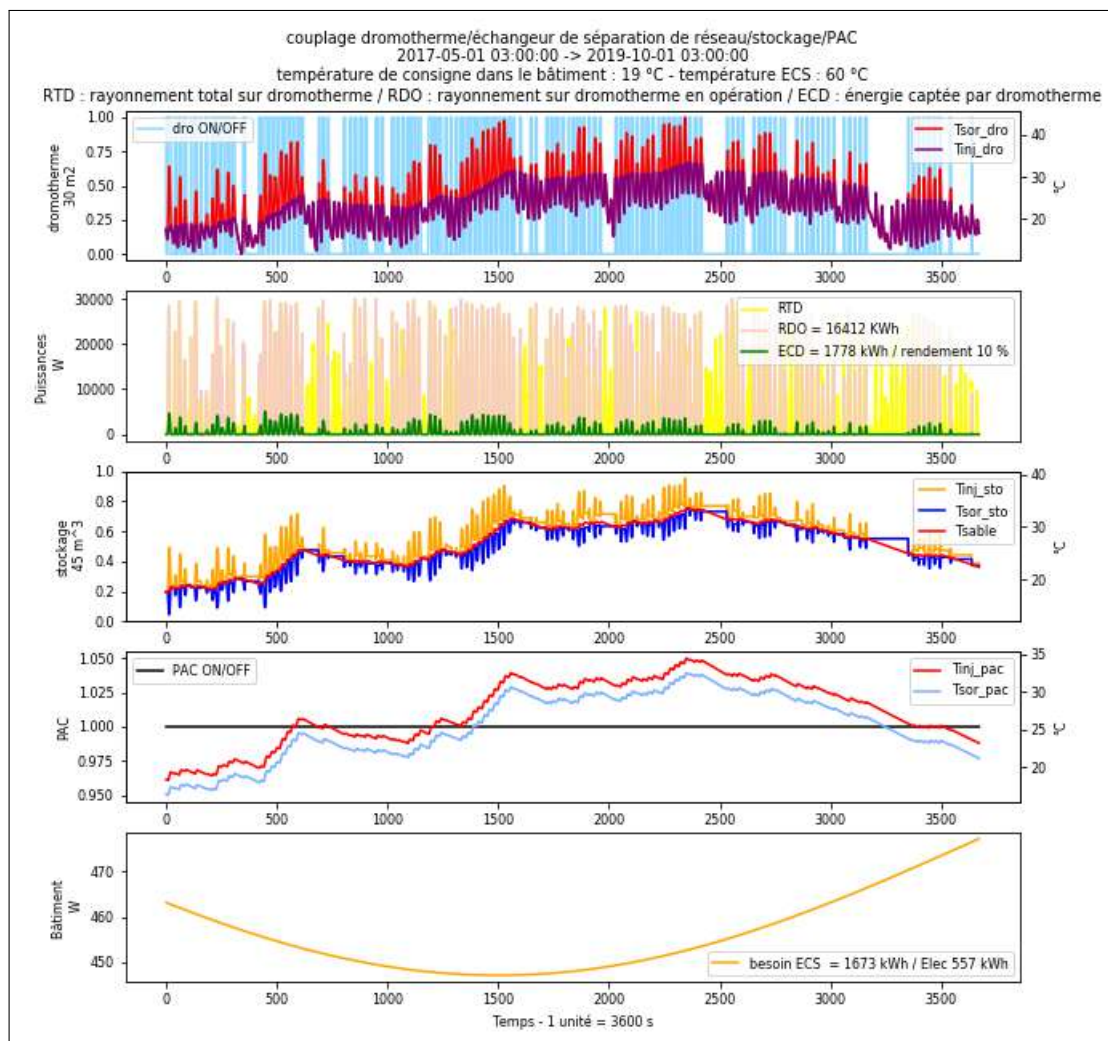


FIGURE V.9: Simulation de la consommation estivale d'ECS

Sur le premier graphique, le dromotherm est en marche presque durant tout l'été (courbe bleue) faisant circuler l'eau dans la couche poreuse. Le fluide caloporteur s'échauffe jusqu'à 40 °C au début du mois d'août (vers t=2400 heures).

Sur le deuxième graphique, le rayonnement solaire reçu par la surface du dromotherm est assez important (allant jusqu'à 30000W) durant tout l'été justifiant ainsi le constat fait sur le premier graphique.

Sur le troisième graphique, on constate que le stockage se recharge continuellement pendant une bonne partie de l'été (jusqu'à août). La consommation d'ECS (graphique 5) n'a pas un effet sur la recharge du stockage durant toute cette période. Son effet commence par apparaître vers la fin de l'été (mois de septembre) où le stockage baisse en température qui reste légèrement au dessus de sa température initiale au début de l'été.

Sur le quatrième graphique, on constate que les températures d'injection et de retour de l'eau glycolée restent dans des gammes de températures utilisables par PAC : la PAC fonctionne bien.

La figure V.10 montre le bilan énergétique de ce cas d'usage :

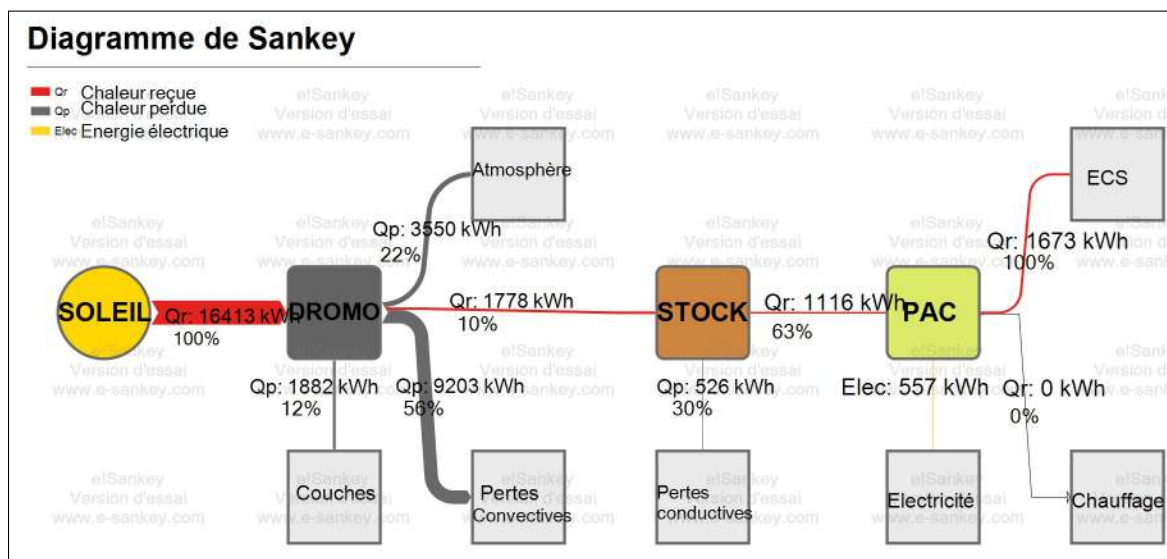


FIGURE V.10: Bilan énergétique de la consommation estivale d'ECS

Ce diagramme montre que seulement 10% de l'énergie solaire reçue par la surface du dromotherm est transmise au fluide caloporteur. Cependant cette quantité d'énergie est suffisante pour satisfaire les besoins en ECS de 6 personnes (près de 1673 kWh) durant tout l'été.

On constate que les pertes au niveau du dromotherm s'élèvent à près de 90%. La surface du dromotherm est donc surdimensionnée : elle reçoit trop d'énergie qu'il n'en faut.

Quant au stockage, il assure l'approvisionnement en chaleur de la pompe à chaleur à hauteur de 63% (soit 1116 kWh) de la chaleur emmagasinée. Les pertes par conduction s'élèvent à 30% (soit 526 kWh) durant tout l'été. Près de 7% de l'énergie emmagasinée reste en réserve dans le stockage et permettra de satisfaire des besoins énergétiques du bâtiment en début de l'hiver.

Dans ce cas d'usage, la PAC consomme 557 kWh électrique (soit le 1/3 des besoins du bâtiment) pour son fonctionnement.

V.2.5 Cas d'usage 3 : Recharge du stockage en été puis utilisation du chauffage en hiver

La figure V.11 montre la simulation de la recharge estivale du stockage pour le chauffage du bâtiment en hiver :

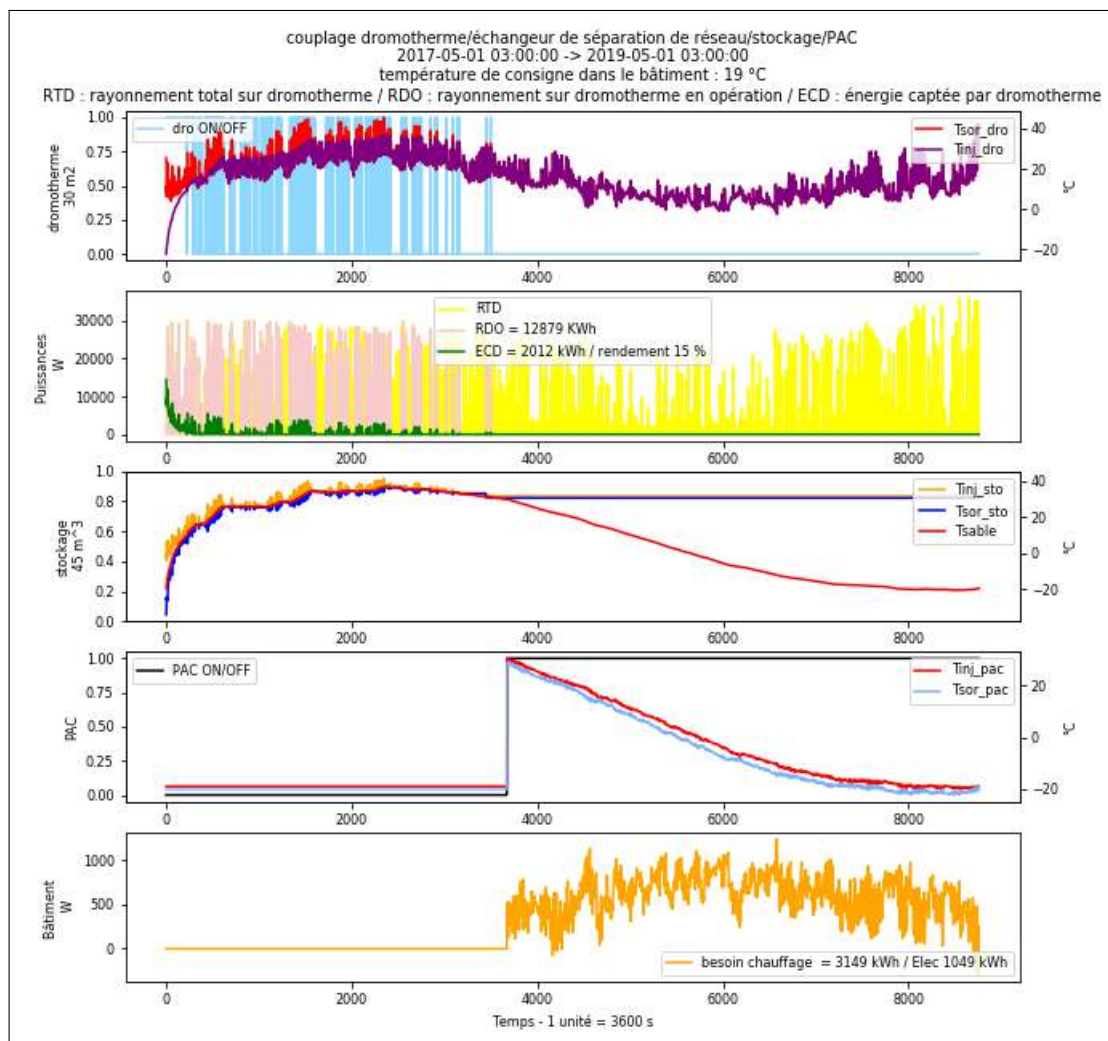


FIGURE V.11: Simulation recharge estivale du stockage en été et utilisation du chauffage en hiver

En été, on constate que les fluides circulant dans le dromotherm et la PAC sont gelés (températures négatives) les premiers jours de l'été (graphique 1 et 4). Cela correspond à la fin de l'hiver précédent. Durant le reste de la période estivale, l'eau circulant dans le dromotherm récupère de la chaleur due au rayonnement solaire assez abondant (graphique 2).

Le stockage, pendant cette période estivale se recharge et monte en température jusqu'à 36°C (graphique 3).

En hiver, le dromotherm est à l'arrêt et le fluide ne récupère plus de l'énergie : sa température d'injection est égale à celle de sa sortie du dromotherm.

Le stockage se décharge pendant cette période hivernale et cède sa chaleur à l'eau glycolée circulant dans les tubes géothermiques reliés à la PAC. On remarque que pendant les trois premiers mois de l'hiver ($3672\text{ h} < t < 5600\text{ h}$), le stockage se décharge sans geler. Durant le reste de l'hiver, le stockage gèle et atteint des températures négatives (jusqu'à -20°C).

Il faut donc prendre en compte le gel du sous sol dans nos modélisations. Dans ce cas, les températures ne descendraient pas en dessous de 0°C mais plutôt aux alentours de 0°C .

La figure V.12 présente le bilan énergétique de ce cas d'usage :

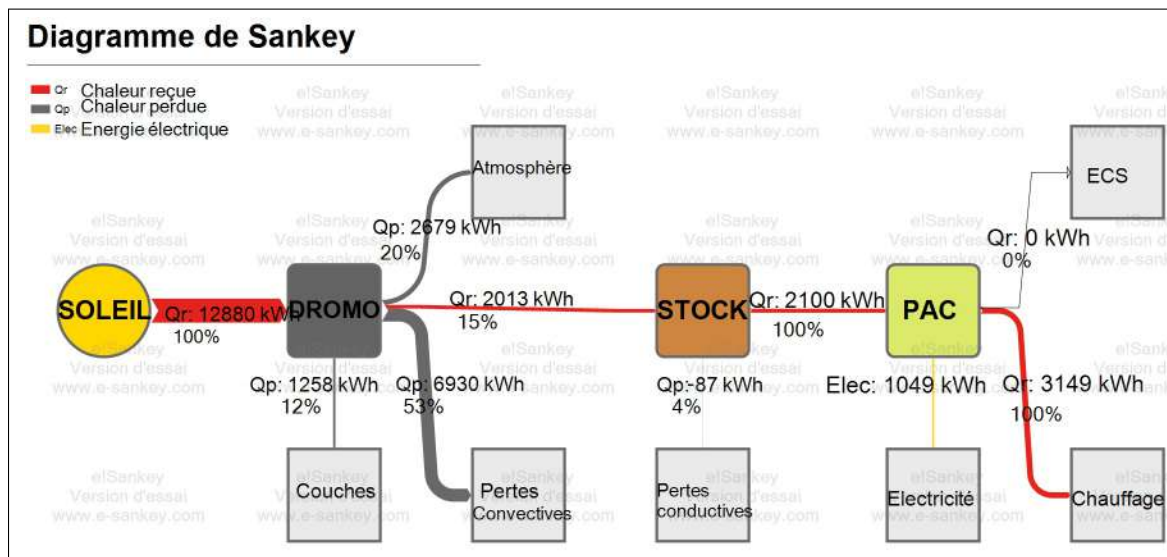


FIGURE V.12: Bilan énergétique du cas d'usage 3

Sur ce diagramme, on note que l'eau du dromotherm récupère 15% (soit 2013 kWh) de l'énergie solaire reçue par le dromotherm. Le reste de l'énergie solaire est perdue par convection (53%), par rayonnement (20%) et par conduction dans les couches (12%).

Au niveau du stockage, on note que en plus de la chaleur apportée par le fluide du dromotherm, le stockage reçoit en moyenne plus de la chaleur du sous-sol environnant plus qu'il en perd.

La PAC prélève la totalité de la chaleur stockée pour le chauffage du bâtiment et consomme 1049 kWh électrique (environ les 1/3 du besoin total du bâtiment).

V.2.6 Cas d'usage 4 : Recharge du stockage en été puis utilisation d'ECS + chauffage(en hiver)

La figure V.13 présente les résultats du cas d'usage 4 de l'installation :

DÉVELOPPEMENT D'UN DÉMONSTRATEUR DE STOCKAGE THERMIQUE INTER SAISONNIER COUPLÉ A UN ÉCHANGEUR THERMIQUE ROUTIER

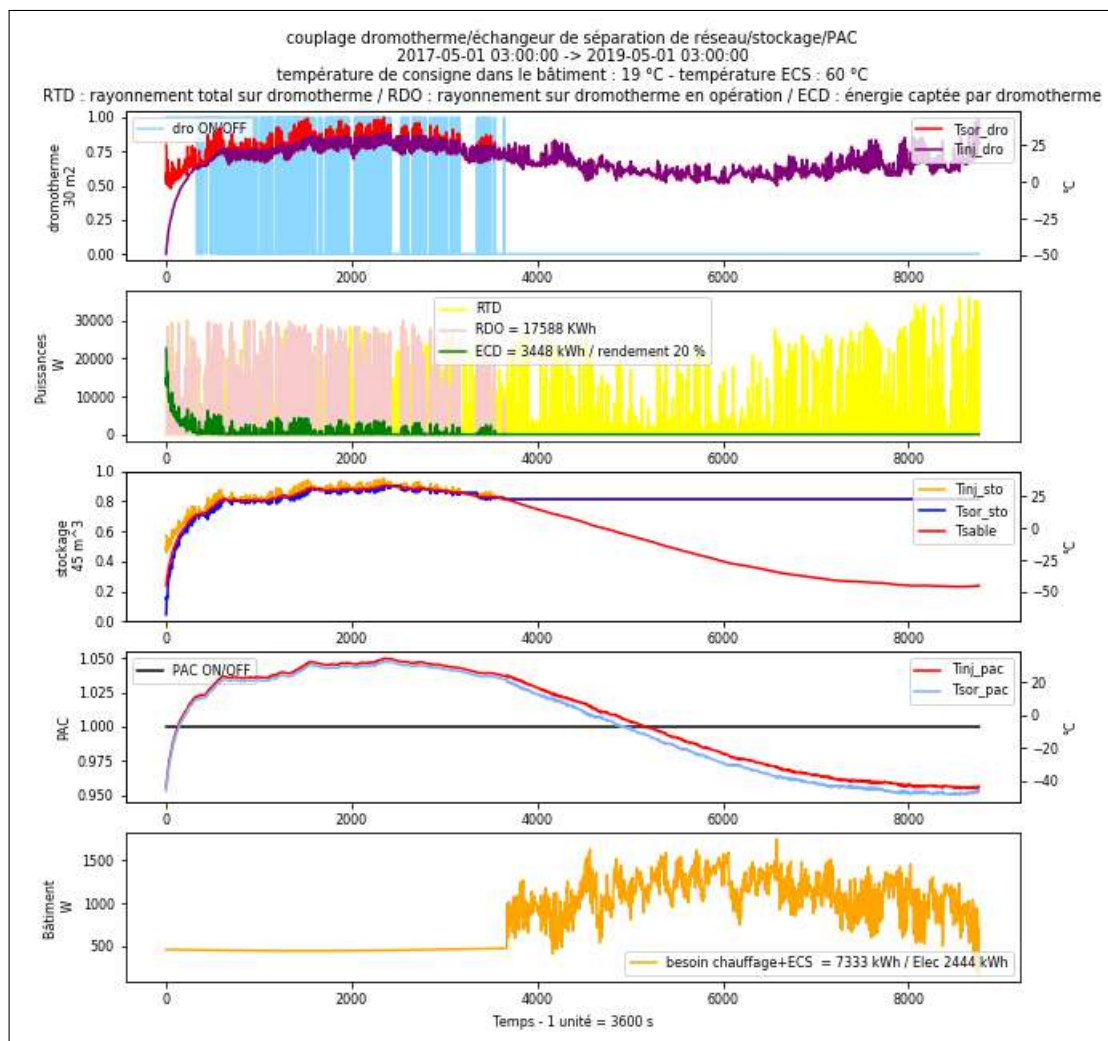


FIGURE V.13: Simulation recharge estivale du stockage en été et utilisation du ECS+ chauffage(en hiver)

En été, on fait les mêmes observations comme dans le cas d'usage 2 relatif à la consommation estivale d'ECS.

En hiver, l'installation se comporte comme dans le cas d'usage 3 et cette fois-ci, la prise en gel du stockage est encore plus importante. Le stockage baisse en température jusqu'à -50°C (graphique 3). Ceci est dû au fait que en plus des besoins de chauffage comme dans le cas 3, se sont ajoutés les besoins en ECS.

La répartition de l'énergie solaire reçue par l'installation est présentée sur la figure V.14 :

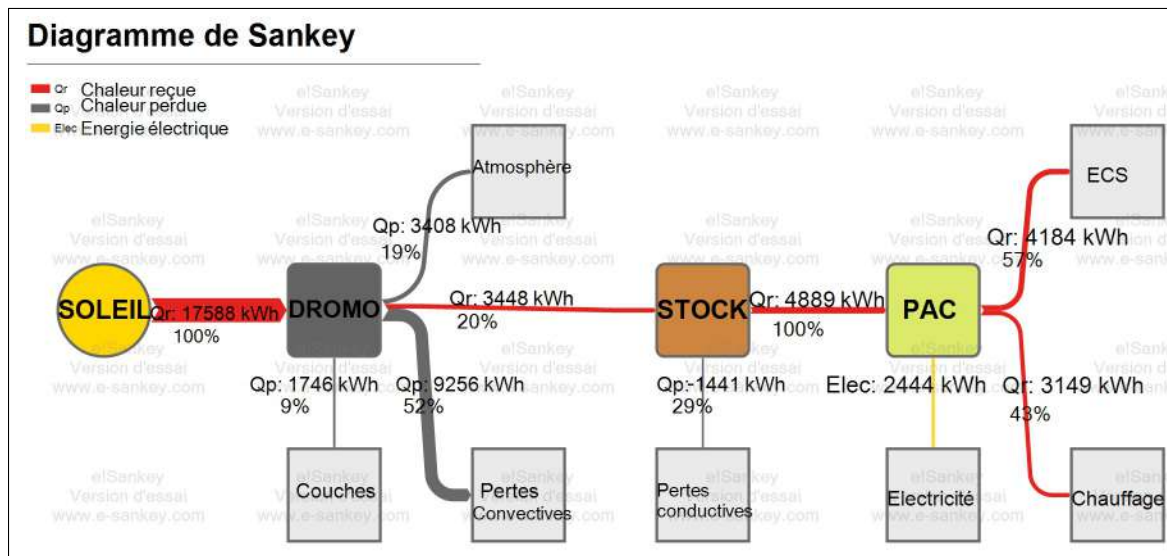


FIGURE V.14: Bilan énergétique du cas d'usage 4

De ce diagramme, il ressort que 20% (soit 3448 kWh) de l'énergie solaire reçue par la surface du dromotherm est récupérée par l'eau circulant dans le dromotherm pour recharger le stockage.

Par conduction, la chaleur du sous-sol environnant est transmise au stockage (environ 1441 kWh).

La chaleur totale stockée est transmise au fluide géothermique de la PAC pour chauffer le bâtiment et assurer la production d'ECS. Dans ce cas d'usage, il faut 2444 kWh électrique pour faire fonctionner la PAC.

V.2.7 Cas d'usage 5 : Recharge annuelle du stockage puis utilisation de chauffage en hiver

La figure V.15 montre la simulation du cas d'usage 5 relatif à la recharge annuelle du stockage avec une utilisation du chauffage en hiver.

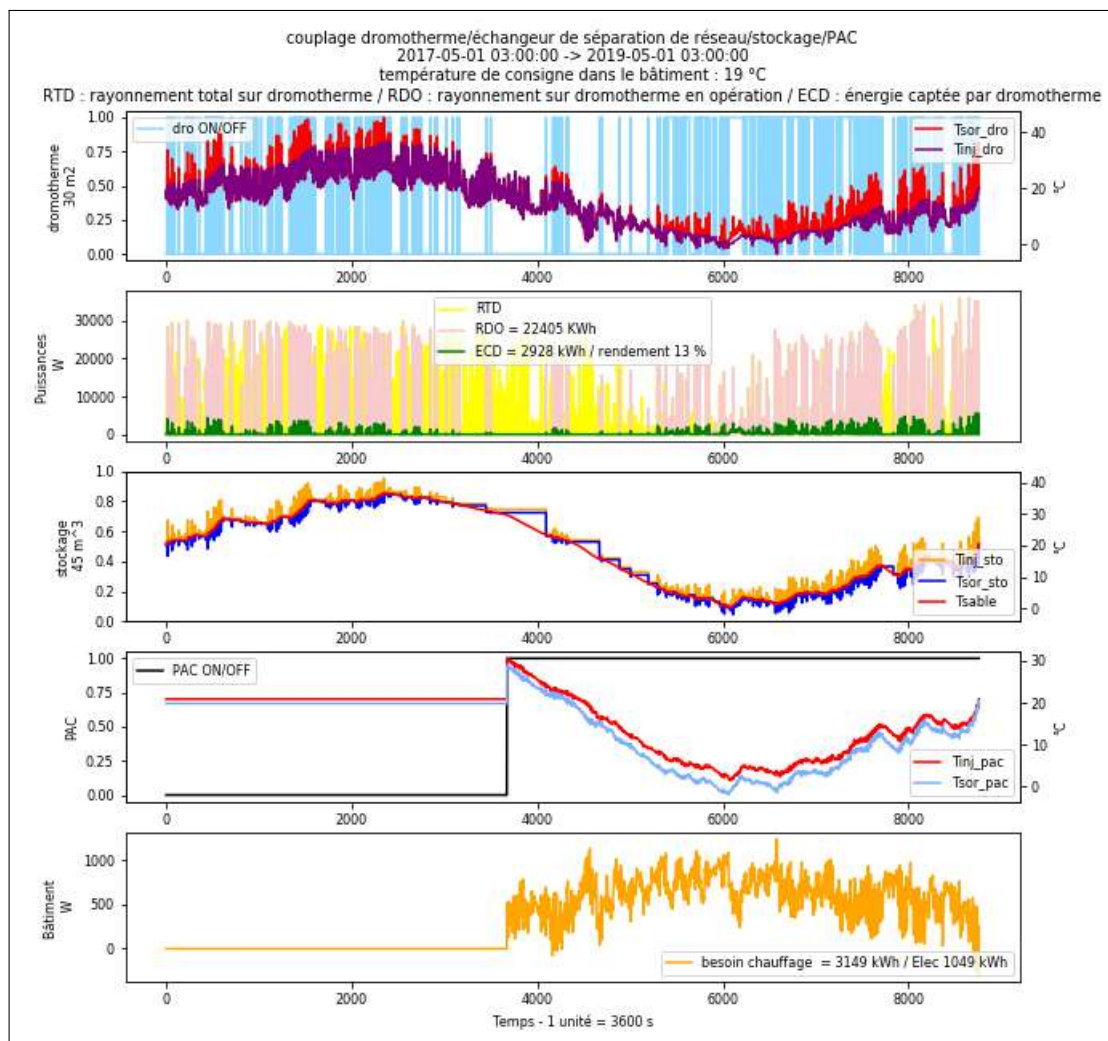


FIGURE V.15: Simulation de la recharge annuelle du stockage et utilisation du chauffage en hiver

Du premier graphique, il ressort que le fluide caloporteur circulant dans le dromotherm s'échauffe durant l'été ($t < 3672$ heures).

Le dromotherm est exposé à d'importants rayonnements solaires pendant cette même période (cf deuxième graphique)

Le fluide venant du dromotherm via l'échangeur de séparation vient recharger le stockage en chaleur et ce dernier monte en température jusqu'à 30°C à la fin de la période estivale.

Pendant cette même période la PAC n'est pas sollicitée puisque que la demande énergétique pour le chauffage en été est quasi nulle. Le fluide géothermique reste à sa température initiale durant tout l'été (graphique 4).

Pendant la période hivernale, la température du fluide du dromotherm chute considérablement (de 40°C à presque 0°C) puisque le rayonnement solaire est faible durant cette période.

Le stockage se décharge et voit sa température chuter et avoisiner les 0°C : il y a donc un risque de gel.

La PAC est mise en marche durant cette période hivernale et la température du fluide caloporteur qu'elle fait circuler les tubes géothermiques chute jusqu'à presque 0°C (aussi un

risque de gel). Cependant, les températures du fluide restent dans les gammes utilisables par une PAC. Grâce à la PAC, on satisfait les besoins en chauffage du bâtiment qui sont assez importants durant l'hiver (cf graphique 5).

La figure V.16 donne le bilan énergétique de ce cas d'usage :

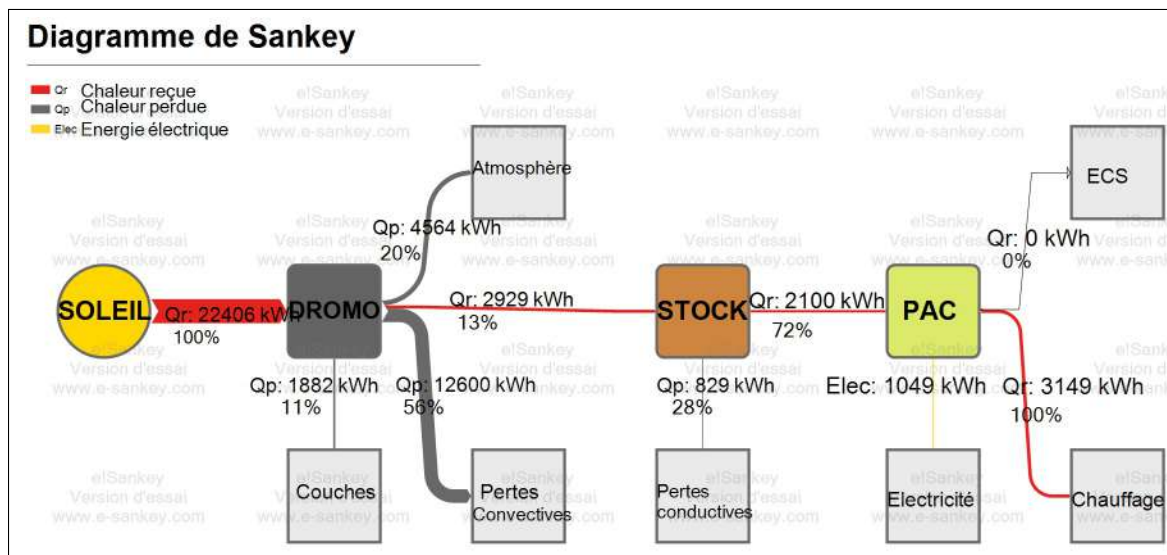


FIGURE V.16: Bilan énergétique du cas d'usage 5

Ce diagramme montre que les besoins en chauffage du bâtiment durant la période hivernale (Octobre à Avril) s'élèvent à 3149 kWh. Pour satisfaire ce besoin, seulement 13% de l'énergie solaire reçue suffisent (soit 2929 kWh) et sont stockées. La PAC prélève 72% de cette chaleur stockée (soit 2100 kWh) pour le chauffage du bâtiment et consomme 1049 kWh (soit le 1/3 du besoin du bâtiment). Le stockage perd le reste de sa chaleur par conduction et se décharge complètement à la fin de l'hiver.

On constate comme dans les autres cas, la majeure partie de l'énergie solaire reçue (près de 90%) par le dromotherm est perdue. Cela est dû au fait que la surface du dromotherm est surdimensionnée. Il faut donc trouver une surface optimale.

V.2.8 Cas d'usage 6 :Recharge annuelle du stockage puis utilisation de ECS+chauffage(en hiver)

Les résultats de la simulation de ce cas d'usage sont présentés sur la figure V.17 :

DÉVELOPPEMENT D'UN DÉMONSTRATEUR DE STOCKAGE THERMIQUE INTER SAISONNIER COUPLÉ A UN ÉCHANGEUR THERMIQUE ROUTIER

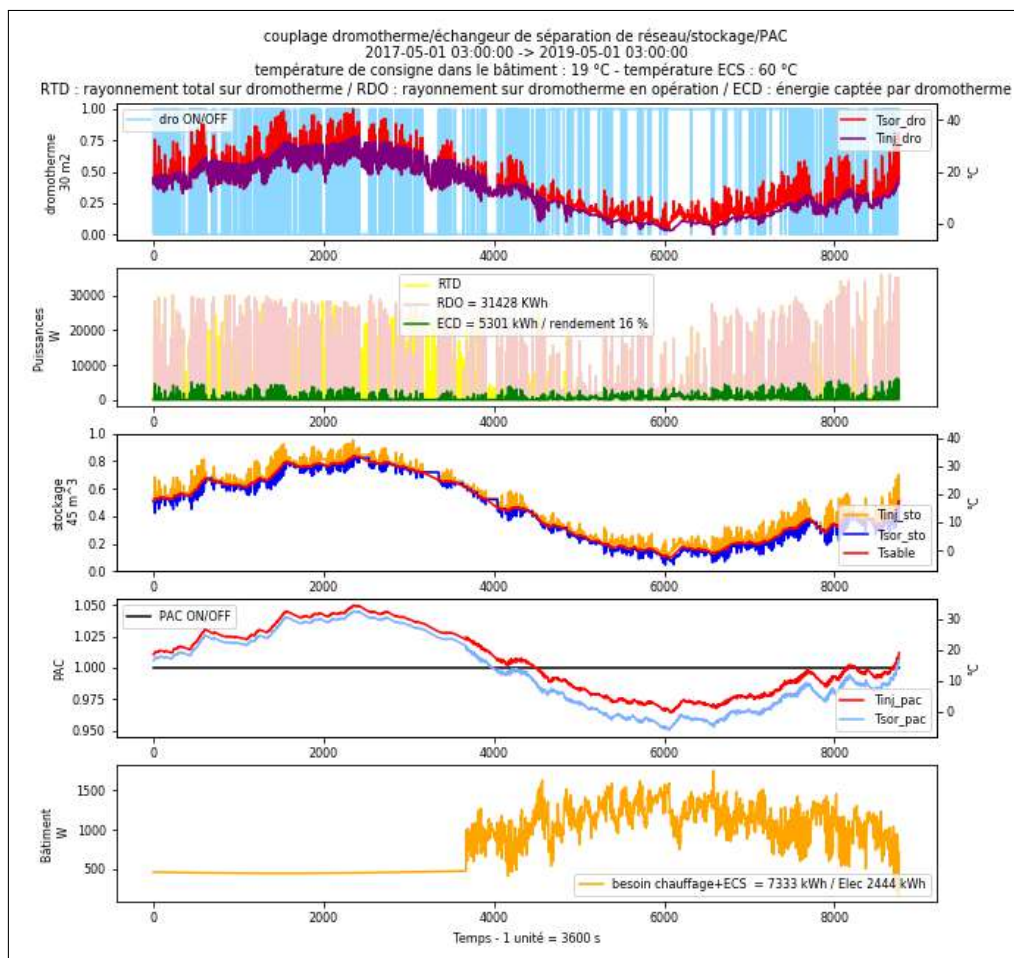


FIGURE V.17: Simulation de la recharge annuelle du stockage et utilisation de ECS+Chauffage(en hiver)

On constate que durant l'été, l'installation a le même comportement que le cas d'usage 2 relatif à la recharge en été avec consommation d'ECS. La consommation d'ECS n'a pas un effet significatif sur le stockage qui se recharge durant les 2/3 de l'été.

Pendant l'hiver, on constate que l'installation se comporte cette fois-ci comme le cas d'usage 5, mais avec avec une décharge plus importante du stockage (troisième graphique) due aux besoins énergétiques du bâtiments qui ont augmenté (cinquième graphique). On remarque qu'au milieu de l'hiver (t=6500h, soit le mois de Janvier), le besoin du bâtiment atteint son pic et provoque la chute des températures des fluides circulant dans l'installation (l'eau du dromotherm et l'eau glycolée de la PAC) en dessous de 0° C provoquant le gel du stockage. Dans ce cas également, il faut prendre en compte cette prise en glace du sous-sol dans la modélisation du stockage.

La figure V.18 montre le bilan énergétique de ce cas d'usage :

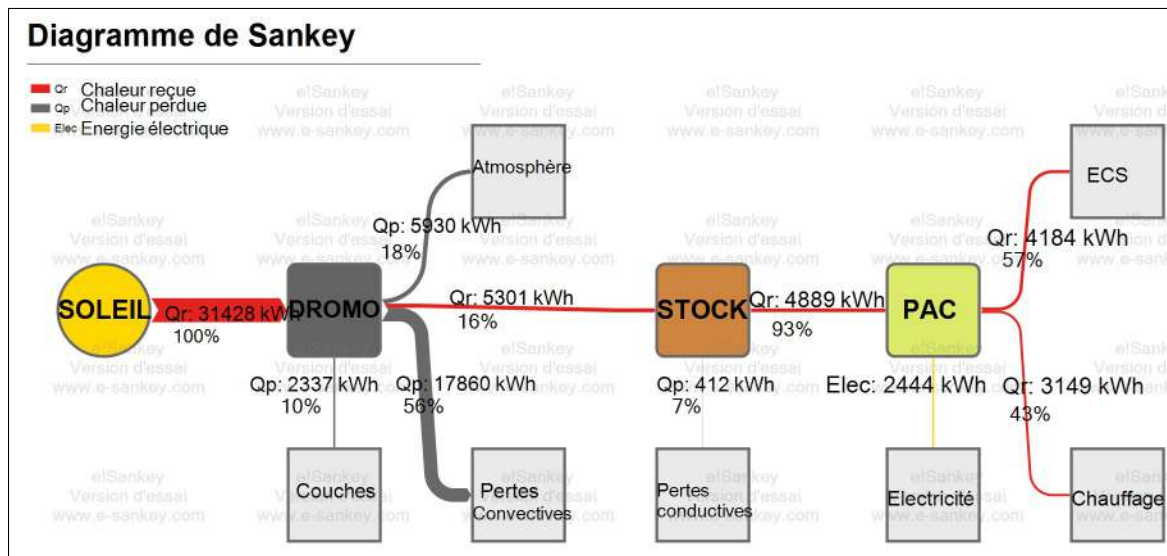


FIGURE V.18: Bilan énergétique du cas d'usage 6

De cette figure, il ressort que le fluide du dromotherm récupère durant toute l'année, 16% de l'énergie solaire reçue par le dromotherm (soit 5301kWh). Près de 7% de cette chaleur est perdue par conduction au niveau du stockage et la PAC prélève la chaleur restante pour satisfaire la totalité des besoins du bâtiment qui s'élèvent à 7333kWh (57% pour l'ECS et 43% pour le chauffage).

Comparativement au cas d'usage 5, on constate que la proportion d'énergie solaire reçue par le fluide circulant dans le dromotherm a augmenté.

Après la présentation et l'analyse de ces différents cas, une expérimentation s'avère nécessaire pour comparer ces résultats théoriques aux résultats expérimentaux qui en découleront. Pour y arriver, nous avons repéré des sites potentiels pour implanter le démonstrateur.

V.3 Implantation du démonstrateur

Le démonstrateur sera implanté sur le site de l'Université Savoie Mont Blanc, département de Savoie(73) dans la commune du Bourget du Lac. Nous avons identifié quelques sites pour son implantation. Ces sites ont été choisis à partir des critères suivants :

- le site doit être une portion de route existant (pour éviter de tracer une nouvelle route sur le site) ;
- le site doit être bien ensoleillé ;
- un parking présenterait des inconvénients : beaucoup de voitures, implantation délicate de caniveaux sur zone roulante.

La figure V.19 montre les sites qui ont été identifiés :



FIGURE V.19: Les potentiels sites d'implantation du démonstrateur

Le type de configuration la plus adaptée semble être le numéro 3, avec une voirie en section courante. Une fois le site définitif choisi, la construction du démonstrateur est à viser pour février/mars 2021.

V.4 Bilan

Dans ce chapitre, on a présenté les simulations thermiques dynamiques de notre démonstrateur en utilisant plusieurs stratégies de pilotage de ce dernier. On a constaté que son comportement du démonstrateur de point vue thermique varie en fonction de la stratégie utilisée. De manière générale, on a constaté que la surface ($30 m^2$) du dromotherm est visiblement surdimensionnée dans tous les cas d'usage simulés. L'installation assure correctement la production d'ECS en été. En hiver, le cas d'usage 5 semble la stratégie de pilotage la mieux adaptée. L'implantation du démonstrateur nous permettra de confirmer ou infirmer ces différents constats.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, nous avons étudié le comportement thermique et énergétique dynamique d'un démonstrateur de stockage thermique inter-saisonnier couplé à un échangeur de chaleur routier. Le principe de ce dispositif consiste à récupérer de la chaleur sous les voiries en été et parfois en hiver pour combler les besoins des bâtiments environnant en ECS et chauffage durant l'année. L'étude menée s'est faite en plusieurs étapes.

Premièrement, nous avons fait une synthèse bibliographique sur les routes récupératrices. A travers cette synthèse, nous avons présenté les différents projets de récupération de chaleur similaires au projet Dromotherm avec leurs avantages et inconvénients. La comparaison du projet Dromotherm avec les autres projets existants a montré l'aspect innovant de ce projet du fait que contrairement aux autres projets, le projet Dromotherm ne fait pas recours à l'utilisation des tubes sous la chaussée pour la récupération de la chaleur.

Deuxièmement, une architecture du démonstrateur a été présentée. Le dispositif est constitué d'un échangeur Dromotherm pour récupérer l'énergie solaire reçue par la surface de la chaussée ; d'un échangeur à plaques pour permettre le transfert de chaleur vers le stockage ; d'une PAC pour la décharge du stockage en vue de l'alimentation du bâtiment en ECS et chauffage.

Troisièmement, une modélisation du démonstrateur a été faite. Il s'agit de traduire sous forme d'équations, les différents phénomènes thermiques qui ont lieu au sein du dispositif.

Quatrièmement, les modèles développés dans la troisième partie ont été codés sous Python en vue de déterminer les inconnues qu'ils comportent (températures et quantités de chaleur). Des simulations avec les données météo de la RT2012 ont été faites. Il en ressort que la surface du démonstrateur utilisé a été surdimensionnée du fait qu'elle reçoit du rayonnement solaire que nécessaire (seulement 20% de l'énergie solaire est transférée au fluide du Dromotherm). Aussi, nos simulations ont montré que le dispositif permet de produire de l'ECS pour une famille de 6 personnes occupant un bâtiment BBC de 120 m^2 en été (l'équivalent du bâtiment en bois mal isolé de 20 m^2 utilisé) sans un effet de décharge du stockage. Concernant la période hivernale où les besoins de chauffage s'ajoutent à ceux d'ECS, le stockage permet dans certains cas de combler ces besoins mais avec un risque de gel.

Des sites d'implantation du démonstrateur ont été identifiés afin de faire de l'expérimentation pour comparer les résultats théoriques obtenus aux résultats expérimentaux.

Sur le plan personnel, ce stage constitue pour moi un grand pas dans le monde de la

recherche. Il m'a permis d'apprendre de nouvelles choses surtout dans le domaine de la programmation des schémas numériques.

PERSPECTIVES

Les travaux effectués durant ce stage permettent de proposer des nouvelles perspectives. Il s'agit de :

- faire évoluer le modèle 1D de l'échangeur Dromotherm en prenant en compte les ombres ;
- faire évoluer la modélisation du stockage thermique en prenant en compte la prise en glace du sous-sol en période hivernale ;
- calculer le COP global de l'installation dans chaque cas d'usage afin de choisir le cas d'usage optimal techniquement et économiquement.
- déterminer les dimensions optimales de la chaussée, du stockage et du bâtiment.

Bibliographie

- [1] Sarah Asfour, Frédéric Bernardin, Alexandre Cuer. *Les Chaussées hors gel, récupératrices d'énergie*. Octobre-Novembre 2016.
- [2] ADEME. *Le Bâtiment : les chiffres clés*. Edition 2013.
- [3] <https://www.cerema.fr/fr/actualites/smart-grid-thermique-route-batiment>, consulté le 24 juin 2020.
- [4] Sarah Asfour. *Récupération d'énergie dans les chaussées pour leur maintien hors gel*. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2016.
- [5] Dr. Daniel Pahud, *Projet Serso, stockage saisonnier solaire pour le dégivrage d'un pont*. Office Fédéral de l'Énergie, Novembre 2007.
- [6] W. J. Eugster, *Road and Bridge Heating Using Geothermal Energy. Overview and Examples* Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Allemagne, 30 mai-1er juin 2007.
- [7] <https://www.power-road.com/> consulté le 06 mars 2020.
- [8] <http://www.developpementdurable.eiffage.com/fr/preparer-l-avenir/l-innovation-au-service-du-construire-autrement>, consulté le 06 mars 2020.
- [9] Xavier MOCH. *Etude théorique et expérimentale d'échangeurs géothermiques hélicoïdaux : Production de chaud et de froid et dimensionnement d'installations*. Université de Grenoble, 2013.
- [10] ADEME. *La géothermie pour chauffer et rafraîchir sa maison*. Novembre 2017.
- [11] Sarah Asfour, Frédéric Bernardin, Evelyne Toussaint. *Experimental validation of 2D hydrothermal modelling of porous pavement for heating and solar energy retrieving applications, Road Materials and Pavement Design*. Octobre 2018.
- [12] 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
- [13] Hugo Viot. *Modélisation et instrumentation d'un bâtiment et de ses systèmes pour optimiser sa gestion énergétique*. Université de Bordeaux, 2016.
- [14] Commission Th-Bât. *Règles Th-bat - Fascicule généralités*. 20 décembre 2017.

- [15] ADEME. *Guide technique : Les besoins d'eau chaude sanitaire en habitat individuel et collectif*.
- [16] <http://www.rt-batiment.fr/les-donnees-meteorologiques-rt-2012-a14.html> consulté le 30 mars 2020.

Annexes

Modélisation 1D de l'échangeur dromotherm

A.1 Phénomènes de transfert de chaleur au sein de la chaussée

Plusieurs phénomènes de transferts thermiques ont lieu au sein de la chaussée. Il s'agit de :

- **la conduction dans la chaussée** : encore appelée la diffusion de chaleur, la conduction est le transfert d'énergie au sein de la chaussée due à la présence d'un gradient de température. Il est traduit par la loi de Fourier comme suit :

$$q_{cond} = -\lambda \cdot \nabla T \quad (\text{A.1})$$

Avec :

q_{cond} : le flux de chaleur par conduction en ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$);;

λ : la conductivité de la chaussée en ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

∇T : gradient de température ($\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$).

- **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.

Dans le cas de notre chaussée, ce phénomène a lieu entre la surface de la chaussée et l'air et entre la couche poreuse et le fluide y circulant[4].

Le flux de chaleur par convection est exprimé par la relation :

$$\mathbf{q}_{conv} = \mathbf{hA}(T_p - T_f) \quad (\text{A.2})$$

où

h est le coefficient de convection de la surface ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

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

T_p est la température de la paroi solide ($^{\circ}\text{C}$);

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

- **Le rayonnement solaire** : C'est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil.

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 qui peut être absorbé, transmis ou réfléchi en différentes proportions. Le rayonnement solaire absorbé par la chaussée est donné par la relation[4] :

$$q_s = (1 - \alpha)q_i \quad (A.3)$$

Avec

q_s : le rayonnement absorbé par la surface ($W \cdot m^{-2}$);

q_i : le rayonnement incident ($W \cdot m^{-2}$);

α : l'albédo.

- **Le 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 [4] :

$$q_r = \sigma \varepsilon (T_s + 273.15)^4 \quad (A.4)$$

Avec :

q_r : le rayonnement émis par la surface ($W \cdot m^{-2}$)

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

ε : l'émissivité de la surface de la chaussée (-)

T_s : Température de surface de la chaussée ($^{\circ}C$).

- **Rayonnement thermique diffus issu de l'atmosphère** : Outre les radiations émises, la surface de la chaussée absorbe également les rayonnements infrarouge provenant de l'atmosphère [4]

$$R_{atm} = \sigma \varepsilon (T_{ciel} + 273.15)^4 \quad (A.5)$$

Avec

$$T_{ciel} = T_{air} \left(0.8 + \left(\frac{T_{rose} + 273.15}{250} \right)^{0.25} \right) \quad (A.6)$$

où

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

T_{ciel} est la température du ciel ($^{\circ}C$);

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

A.2 Calcul des coefficients d'échanges surfaciques

Le flux de chaleur q traversant les chaussée par conduction s'exprime par :

$$q = \frac{\lambda_i}{h_i} (T_2 - T_1) = \frac{\lambda_j}{h_j} (T_3 - T_2) \quad (A.7)$$

Par hypothèse, la température des couches en contact est égale à leur température moyenne. On a donc :

$$\begin{cases} T_i = \frac{T_1 + T_2}{2} \\ T_j = \frac{T_2 + T_3}{2} \end{cases}$$

soit

$$\begin{cases} T_1 = 2T_i - T_2 \\ T_3 = 2T_j - T_2 \end{cases}$$

Et on obtient :

$$T_3 - T_1 = 2(T_j - T_i) \quad (\text{A.8})$$

De l'équation (A.7), on a :

$$\begin{cases} T_2 = T_1 + \frac{h_i}{\lambda_i} q \\ T_2 = T_3 + \frac{h_j}{\lambda_j} q \end{cases}$$

soit :

$$T_1 + \frac{h_i}{\lambda_i} q = T_3 + \frac{h_j}{\lambda_j} q$$

Et on obtient :

$$T_3 - T_1 = \left(\frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{h_j}{\lambda_j} \right) q \quad (\text{A.9})$$

En égalant (A.2) et (A.10), on a :

$$2(T_j - T_i) = \left(\frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{h_j}{\lambda_j} \right) q \quad (\text{A.10})$$

soit :

$$q = \frac{2(T_j - T_i)}{\left(\frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{h_j}{\lambda_j} \right)} \quad (\text{A.11})$$

d'où

$$q = \frac{2\lambda_i\lambda_j}{h_i\lambda_j + h_j\lambda_i} (T_j - T_i) \quad (\text{A.12})$$

On pose donc :

$$q = r_{j/i} (T_j - T_i) \quad (\text{A.13})$$

avec :

$$r_{j/i} = \frac{2\lambda_i\lambda_j}{h_i\lambda_j + h_j\lambda_i} \quad (\text{A.14})$$

A.3 Schéma numérique

Rappelons les équations sur la modélisation 1D du Dromotherm.

$$\begin{cases} C_s h_s \frac{\partial T_s}{\partial t} & = (1 - \alpha)R_g + R_{atm} - \varepsilon \sigma T_s^4 - H_v(T_s - T_{ext}) - r_{s/d}(T_s - T_f) \\ ((1 - \phi)C_d h_d + \phi C_f h_d) \frac{\partial T_f}{\partial t} + q_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial x} & = r_{s/d}(T_s - T_f) - r_{d/b1}(T_f - T_{b1}) \\ C_{b1} h_{b1} \frac{\partial T_{b1}}{\partial t} & = r_{d/b1}(T_f - T_{b1}) - r_{b1/b2}(T_{b1} - T_{b2}) \\ C_{b2} h_{b2} \frac{\partial T_{b2}}{\partial t} & = r_{b1/b2}(T_{b1} - T_{b2}) \end{cases} \quad (A.15)$$

Dans la suite, on note j et n comme étant les indices respectifs de l'espace et du temps.

A.3.1 Maillage

Pour écrire un schéma numérique, il est indispensable de faire un maillage pour définir les pas de temps et d'espace :

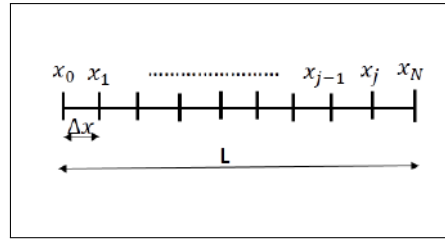


FIGURE A.1: Maillage de la chaussée de largeur L

La chaussée est subdivisée en N portions avec un pas d'espace :

$$\Delta x = \frac{L}{N} \quad (A.16)$$

Le pas d'espace quand à lui est celui du fichier météo utilisé.

A.3.2 Discrétisation

L'équation (2) se présente sous la forme d'une équation de transport :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial x} = F(t, u) \quad (A.17)$$

L'un des schémas numériques utilisés pour ces types d'équations est le schéma décentré amont qui se présente comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial t}(t_n, x_j) \simeq \frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\Delta t} \quad (A.18)$$

et

$$\frac{\partial u}{\partial x}(t_n, x_j) \simeq \frac{u_j^n - u_{j-1}^n}{\Delta x} \quad (\text{A.19})$$

Ce schéma est précis à l'ordre 1, stable en norme L^∞ et convergent avec la condition CFL $|v|\Delta t \leq \Delta x$

En appliquant ce schéma à notre système d'équations sur le dromotherm, on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_s h_s \frac{T_{sj}^{n+1} - T_{sj}^n}{\Delta t} \\ ((1-\phi)C_d h_d + \phi C_f h_d) \frac{T_{fj}^{n+1} - T_{fj}^n}{\Delta t} + q_f C_f \frac{T_{fj}^n - T_{fj-1}^n}{\Delta x} \\ C_{b1} h_{b1} \frac{T_{b1j}^{n+1} - T_{b1j}^n}{\Delta t} \\ C_{b2} h_{b2} \frac{T_{b2j}^{n+1} - T_{b2j}^n}{\Delta t} \end{array} \right. = \begin{array}{l} (1-\alpha)R_g^{n+1} + R_{atm}^{n+1} - \varepsilon \sigma (T_{sj}^4)^{n+1} \\ - H_v^{n+1} (T_{sj}^{n+1} - T_{ext}^{n+1}) - r_{s/d} (T_{sj}^{n+1} - T_{fj}^{n+1}) \\ r_{s/d} (T_{sj}^{n+1} - T_{fj}^{n+1}) - r_{d/b1} (T_{fj}^{n+1} - T_{b1j}^{n+1}) \\ r_{d/b1} (T_{fj}^{n+1} - T_{b1j}^{n+1}) - r_{b1/b2} (T_{b1j}^{n+1} - T_{b2j}^{n+1}) \\ r_{b1/b2} (T_{b1j}^{n+1} - T_{b2j}^{n+1}) \end{array} \quad (\text{A.20})$$

soit

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{C_s h_s}{\Delta t} + r_{s/d} + H_v^{n+1} + 4\varepsilon \sigma (T_s^3)_j^n \right) T_{sj}^{n+1} - r_{s/d} T_{fj}^{n+1} \\ \left(\frac{(1-\phi)C_d h_d + \phi C_f h_d}{\Delta t} + r_{s/d} + r_{d/b1} \right) T_{fj}^{n+1} - r_{s/d} T_{sj}^{n+1} - r_{d/b1} T_{b1j}^{n+1} \\ \left(\frac{C_{b1} h_{b1}}{\Delta t} + r_{d/b1} + r_{b1/b2} \right) T_{b1j}^{n+1} - r_{d/b1} T_{fj}^{n+1} - r_{b1/b2} T_{b2j}^{n+1} \\ \left(\frac{C_{b2} h_{b2}}{\Delta t} + r_{b1/b2} \right) T_{b2j}^{n+1} - r_{b1/b2} T_{b1j}^{n+1} \end{array} \right. = \begin{array}{l} (1-\alpha)R_g^{n+1} + R_{atm}^{n+1} + 3\varepsilon \sigma (T_s^4)_j^n \\ + H_v^{n+1} T_{ext}^{n+1} + \frac{C_s h_s}{\Delta t} T_{sj}^n \\ \frac{q_f C_f}{\Delta x} T_{fj-1}^n + \frac{(1-\phi)C_d h_d + \phi C_f h_d}{\Delta t} T_{fj}^n \\ \frac{C_{b1} h_{b1}}{\Delta t} T_{b1j}^{n+1} \\ \frac{C_{b2} h_{b2}}{\Delta t} T_{b2j}^{n+1} \end{array} \quad (\text{A.21})$$

On obtient le système matriciel suivant :

$$AT^{n+1} = D \quad (\text{A.22})$$

avec :

$$A = \left[\begin{array}{cccccccccccc} \left(\begin{array}{cccc} a_1(n,j) & b_1 & 0 & 0 \\ c_2 & a_2 & b_2 & 0 \\ 0 & c_3 & a_3 & a_4 \\ 0 & 0 & c_4 & a_4 \end{array} \right) & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & & & & \\ & \left(\begin{array}{cccc} a_1(n,j) & b_1 & 0 & 0 \\ c_2 & a_2 & b_2 & 0 \\ 0 & c_3 & a_3 & a_4 \\ 0 & 0 & c_4 & a_4 \end{array} \right) & \ddots & & & & 0 & & & & \\ & \vdots & \ddots & \ddots & & & \vdots & & & & & \\ & \vdots & & & & & \vdots & & & & & \\ & \vdots & & & & & \vdots & & & & & \\ & 0 & & & & & \ddots & \ddots & & & & \\ & \vdots & & & & & \ddots & \ddots & & & & \\ & 0 & & & & & \dots & \dots & \dots & 0 & \left(\begin{array}{cccc} a_1(n,j) & b_1 & 0 & 0 \\ c_2 & a_2 & b_2 & 0 \\ 0 & c_3 & a_3 & a_4 \\ 0 & 0 & c_4 & a_4 \end{array} \right) & \\ & 0 & & & & & \dots & \dots & \dots & 0 & \left(\begin{array}{cccc} a_1(n,j) & b_1 & 0 & 0 \\ c_2 & a_2 & b_2 & 0 \\ 0 & c_3 & a_3 & a_4 \\ 0 & 0 & c_4 & a_4 \end{array} \right) & \end{array} \right]$$

où :

$$\begin{aligned}
 \mathbf{T}^{n+1} &= \begin{bmatrix} T_{s1}^{n+1} & T_{f1}^{n+1} & T_{b11}^{n+1} & T_{b21}^{n+1} & \dots & \dots & T_{sN}^{n+1} & T_{fN}^{n+1} & T_{b1N}^{n+1} & T_{b2N}^{n+1} \end{bmatrix}^T \\
 \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} D_{s(n,1)} & D_{f(n,1)} & D_{b1(n,1)} & D_{b2(n,1)} & \dots & \dots & D_{s(n,N)} & D_{f(n,N)} & D_{b1(n,N)} & D_{b2(n,N)} \end{bmatrix}^T \\
 \left\{ \begin{array}{l} a_1(n, j) & = \left(\frac{C_s h_s}{\Delta t} + r_{s/d} + H_v^{n+1} + 4\varepsilon\sigma(T_{s_j}^3)^n \right) \\ a_2 & = \left(\frac{(1-\phi)C_d h_d + \phi C_f h_d}{\Delta t} + r_{s/d} + r_{d/b1} \right) \\ a_3 & = \left(\frac{C_{b1} h_{b1}}{\Delta t} + r_{d/b1} + r_{b1/b2} \right) \\ a_4 & = \left(\frac{C_{b2} h_{b2}}{\Delta t} + r_{b1/b2} \right) \\ b_1 = c_2 & = -r_{s/d} \\ b_2 = c_3 & = -r_{d/b1} \\ b_3 = c_4 & = -r_{b1/b2} \\ Ds(n, j) & = (1 - \alpha)R_g^{n+1} + R_{atm}^{n+1} + 3\varepsilon\sigma(T_{s_j}^4)^n + H_v^{n+1}T_{ext}^{n+1} + \frac{C_s h_s}{\Delta t}T_{s_j}^n \\ Df(n, j) & = \frac{q_f C_f}{\Delta x} T_{fj-1}^n + \frac{(1-\phi)C_d h_d + \phi C_f h_d}{\Delta t} T_{fj}^n \\ D(b1, j) & = \frac{C_{b1} h_{b1}}{\Delta t} T_{b1j}^{n+1} \\ D(b2, j) & = \frac{C_{b2} h_{b2}}{\Delta t} T_{b2j}^{n+1} \end{array} \right. \quad (A.23)
 \end{aligned}$$

A.3.3 Conditions initiales

Nous imposons une condition de type Dirichlet sur les valeurs initiales des températures à déterminer

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{s_j}^0 = T_{sini} \\ T_{f_j}^0 = T_{inj} \\ T_{b1j}^0 = T_{b1ini} \\ T_{b2j}^0 = T_{b2ini} \end{array} \right. \quad (tempratured'injection)$$

A.3.4 Conditions aux bords

Nous imposons une condition de type Neumann sur le bord $x=0$ de la chaussée

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_s(n,0)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial T_f(n,0)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial T_{b1}(n,0)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial T_{b2}(n,0)}{\partial x} = 0 \end{array} \right.$$

Données sur le démonstrateur

B.1 Paramètres thermo-hydrauliques du dromotherm

Tableau B.1: Données sur la chaussée

Paramètres	Valeurs
L(m)	7.5
l(m)	4
h_s (cm)	6
h_d (cm)	8
h_{b1} (cm)	5
h_{b2} (cm)	90
C_s (J/m ³ K)	2144309
C_d (J/m ³ K)	1769723
C_{b1} (J/m ³ K)	2676723
C_{b2} (J/m ³ K)	2144309
C_f (J/m ³ K)	4181000
$r_{s/d}$ (W/m ² .K)	20.55
$r_{d/b1}$ (W/m ² .K)	32,09
$r_{b1/b2}$ (W/m ² .K)	11.73

B.2 Données sur le stockage

Tableau B.2: Données sur le stockage

Le sable humide	
m_{sable} (kg)	70200
Cp_{sable} (J/kg.K)	1700
échangeurs géothermiques	
R_i (mm)	10.2
R_e (mm)	12.5
λ_{tube} (W/m.K)	1.32
N_{tubes}	16
L_{tube} (m)	5
eau glycolée	
m_{pac} (kg/m ³)	1040
Cp_{pac} (J/kg.K)	3942

B.3 Données sur le bâtiment

Tableau B.3: Données sur le bâtiment

Composant	Épaisseur (cm)	λ (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	Cp (J/kg.K)
Enveloppe				
Bois	2	0.18	750	1600
Isolant	10	0.038	60	1030
Plaque de plâtre	1.3	0.25	825	1000
Surface(m ²)	46			
Résistance thermique (K/W)	0.0608			
Capacité thermique (Wh/K)	523			
Plancher				
Béton	14	2	2500	1000
Polystyrène	10	0.038	50	1450
Surface(m ²)	20			
Résistance thermique (Wh/K)	0.1351			
Capacité thermique (Wh/K)	1985			
Toit				
Isolant	20	0.38	60	1030
Plaque de plâtre	1.3	0.25	825	1000
Surface(m ²)	20			
Résistance thermique (K/W)	0.2658			
Capacité thermique (K/W)	128			

Tableau B.4: Données sur le bâtiment (suite)

Fenêtres(K-LINE Frappe KL-FP teinte clair en vitre)	
Nombre	2
Surface(m^2)	3.5
Résistance thermique (K/W)	1.369
Porte(Porte pleine en bois de couleur sombre)	
Nombre	1
Surface(m^2)	1.89
Résistance thermique (K/W)	1.347
Infiltration +Renouvellement d'air	
Débit de renouvellement d'air (1vol/h)	55
Débit surfacique d'infiltration ($m^3/s.m^2$)	0.00017
$\rho_{air}(kg/m^3)$	1.2
Capacité massique de l'air($J/kg.K$)	1004.00
Résistance thermique (K/W)	0.101
Résistance superficielle intérieure($m^2.K/W$)	
Flux de chaleur ascendant	0.10
Flux de chaleur descendant	0.17
Flux de chaleur horizontal	0.13