

Étude d'un système de valorisation de l'énergie thermique des routes pour les besoins des bâtiments

Prince SEVI¹, Benoit STUTZ¹, Frédéric BERNARDIN², Alexandre CUER²

¹LOCIE, Université Savoie Mont Blanc, CNRS UMR 5271

60 Avenue du lac Léman, 73370, Le Bourget-du-Lac, France.

² Cerema, Equipe Projet Systèmes de Transports Intelligents

8-10, Rue Bernard Palissy, CEDEX 2, F-63017 Clermont-Ferrand, France

*(auteur correspondant : febron.sevi@univ-smb.fr)

Résumé - A travers cet article, on se propose d'étudier un système de valorisation de l'énergie thermique des routes pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire (ECS) pour les bâtiments collectifs. Ce système met en oeuvre un échangeur thermique routier connecté à un stockage et une pompe à chaleur (PAC) pour répondre aux besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage du bâtiment tout au long de l'année. L'étude consiste en une modélisation simplifiée des différents composants du dispositif par la prise en compte des phénomènes thermo-physiques ayant lieu. Un bilan d'énergie est réalisé sur une année afin d'estimer le rendement de ce système route-stockage-bâtiment.

Nomenclature

\dot{m}	Débit massique, kg/s	<i>Indices et exposants</i>
\dot{q}	Débit volumique, m ³ /s	
COP	Coefficient de Performance, (-)	<i>b</i> Couche de base
C_p	Capacité thermique massique, J/kg.K	<i>bat</i> Bâtiment
e_{ff}	Efficacité, (-)	<i>d</i> Enrobé drainant
h	Épaisseur, m	<i>elec</i> Électrique
H_v	Coefficient d'échange convectif, W/m ² K	<i>ext</i> Extérieur
L	Longueur, m	<i>f</i> Fluide
m	masse, kg	<i>geo</i> Géothermique
N	Nombre	<i>inf</i> Infiltration
Nu	Nombre de Nusselt	<i>inj_dro</i> Injection dromotherm
Q	Chaleur, J	<i>inj_pac</i> Injection pompe à chaleur
P	Puissance, W	<i>inj_sto</i> Injection stockage
R	Rayonnement W/m ²	<i>int</i> Intérieur
R_{th}	Résistance thermique, K/W	<i>iso</i> Isolant
S	Surface de la chaussée, m ²	<i>m</i> Mur
T	Température, K	<i>pac</i> Pompe à chaleur
V	Volume, m ³	<i>s</i> Couche de surface
<i>Symboles grecs</i>		
α	Albédo, (-)	<i>si</i> Superficielle intérieure
ϵ	Emissivité, (-)	<i>sor_dro</i> Sortie dromotherm
λ	Conductivité thermique, W/m.K	<i>sor_pac</i> Sortie pompe à chaleur
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, W/m ² .K ⁴	<i>sor_sto</i> Sortie stockage
ϕ	Porosité, (-)	<i>stock</i> Stockage
		<i>v</i> Vent

1. Introduction

En France, le réseau routier peut constituer un capteur d'énergie solaire très important. Le seul réseau national pourrait capter une énergie solaire d'environ 196 TWh par an [1]. On voit dès lors le rôle important que peuvent jouer les infrastructures routières dans la transition énergétique. Cette énergie peut par exemple, être mise au profit du secteur du bâtiment qui représente près de 43% de la consommation totale d'énergie utile en France [2]. Cependant, la disponibilité de cette énergie n'est pas en phase avec les besoins des bâtiments. La plus haute production se fait en été alors que la plus forte demande est en hiver. Par conséquent, le stockage d'énergie à long terme (saisonnier) est nécessaire pour remédier à cette inadéquation saisonnière [3]. Pour mieux exploiter ce potentiel énergétique des routes, plusieurs projets de routes récupératrices d'énergies ont vu le jour dont le projet Dromotherm sur lequel porte cette présente étude. Dans ce travail, nous allons d'abord décrire le système ; ensuite faire une modélisation des différents composants du dispositif et enfin présenter les résultats de nos simulations sous Python.

2. Description du système

Le système comprend différents composants principaux que l'on retrouve sur la Figure 1.

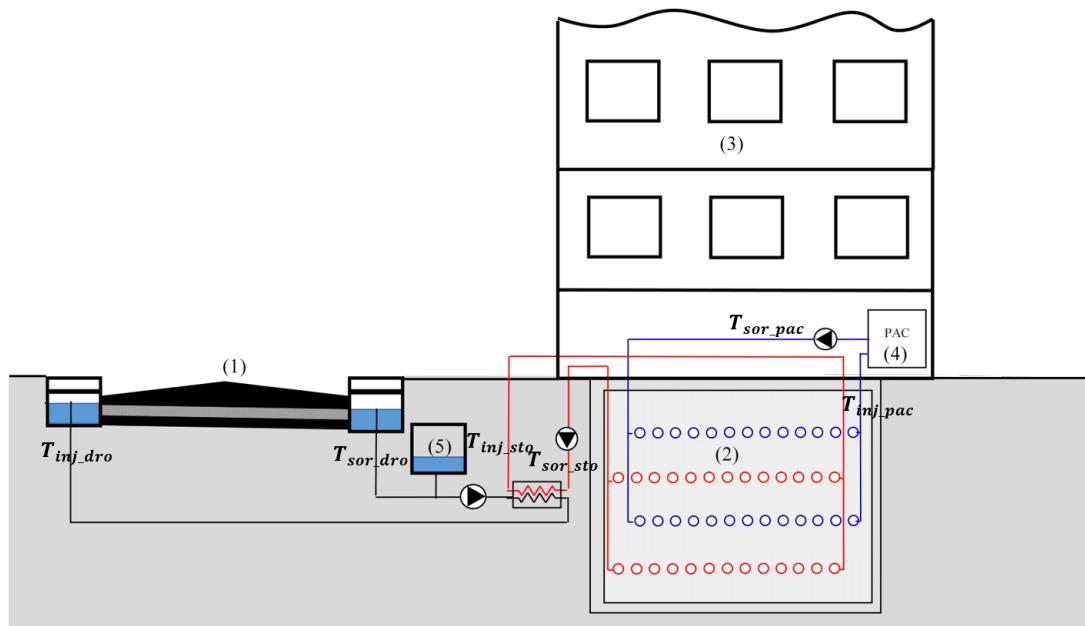


Figure 1 : Système de récupération et d'usage de l'énergie solaire reçue par les chaussées

Le système comprend : un échangeur thermique routier (1), un stockage thermique (2) enterré et isolé localisé à la base du bâtiment (3) et une PAC (4). Un stockage thermique sur sonde peut également être envisagé pour des systèmes de grandes tailles si la nature du sol le permet. La PAC transfère de la chaleur basse température du stockage thermique au bâtiment pour répondre aux besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire des habitants. L'échangeur thermique routier est mis en marche lors des périodes ensoleillées pour recharger le stockage thermique enterré. L'échangeur thermique routier met en œuvre une couche d'enrobé drainant comprise entre deux couches d'enrobé étanche. L'échauffement de la route par le rayonnement solaire est transmis au stockage thermique via la mise en circulation d'un fluide caloporteur qui

circule dans l'enrobé drainant. Une cuve intermédiaire (5) permet d'auto-vidanger l'échangeur thermique routier lorsque ce dernier ne fonctionne pas, permettant de mettre le système hors gel de manière automatique. Le stockage thermique est constitué de sable saturé en eau dans lequel sont implantés des échangeurs géothermiques reliés à la PAC et à l'échangeur thermique routier.

3. Modélisation

Un premier modèle permettant de simuler le comportement thermique dynamique du système avec un stockage sans changement de phase a été développé. Le modèle 1D ainsi obtenu permet de prendre en compte la physique des phénomènes tout en étant numériquement rapide à simuler compte tenu de la durée de la période à étudier.

3.1. Modèle 1D de la chaussée Dromotherm

On considère une chaussée constituée de 4 couches (figure 2) : une couche de surface de Béton Bitumineux Semi Grenu (BBSG) de température T_s et d'une épaisseur h_s ; une couche poreuse de Béton Bitumineux Drainant (BBDr) de température T_d et d'une épaisseur h_d ; une première couche de base en Béton Bitumineux à Module Elevé (BBME) de température T_{b1} et d'une épaisseur h_{b1} ; une deuxième couche de base qu'est le sous-sol de température T_{b2} et d'une épaisseur h_{b2} ;

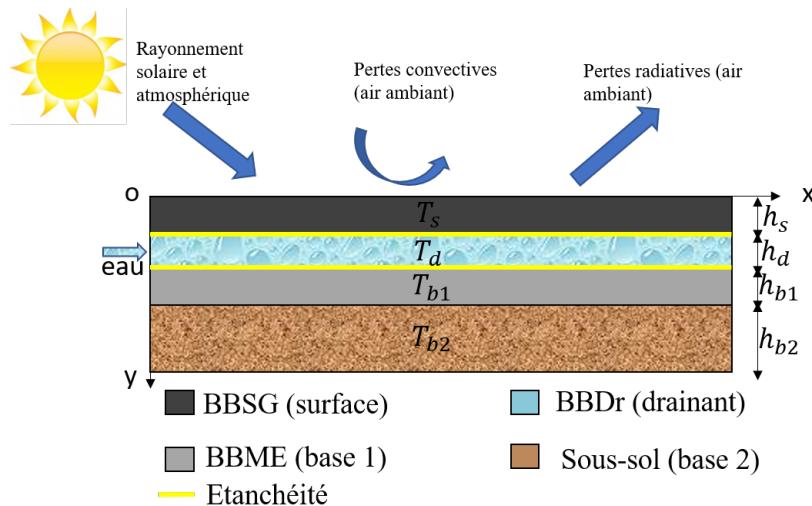


Figure 2 : Schéma détaillé de l'échangeur thermique routier

La modélisation 1D de la chaussée a été développée en se basant sur une modélisation 2D développée par Sarah et al.[4]. Ce choix d'un modèle 1D s'explique par nos besoins de simulations rapides permettant d'étudier le comportement du système sur une année type. Différentes hypothèses sont considérées :

- les différentes couches sont indéformables ;
- La température du fluide T_f est égale à celle de la couche drainante T_d dans laquelle elle circule ;
- la partie inférieure de la deuxième couche de base est supposée adiabatique.

En tenant compte des différentes hypothèses ci-dessus, nous procédons à un bilan d'énergie couche par couche.

- **Couche de surface**

Cette couche est le siège de conduction instationnaire. Elle interagit avec le soleil et l'atmosphère via les transferts radiatifs ainsi qu'avec l'air ambiant par convection. Elle interagit également par conduction avec la couche drainante. Le bilan d'énergie au niveau de la couche 1 est donnée par l'équation 1 :

$$\rho_s h_s C p_s \frac{dT_s}{dt} = \underbrace{(1 - \alpha) R_{direct} + R_{diffus}}_{\dot{Q}_{recue}} - \underbrace{H_v(T_s - T_{ext}) - \epsilon \sigma T_s^4 - \frac{T_s - T_d}{Rth_{s/d}}}_{\dot{Q}_{perdue}} \quad (1)$$

Le même raisonnement est mené au niveau des autres couches.

- **Couche drainante**

La couche drainante interagit par conduction avec les couches de surface et la couche de base. Elle transfère de l'énergie par convection avec le fluide caloporteur. La température de la couche drainante est supposée être à la même température que le fluide caloporteur. Le bilan d'énergie au niveau de cette couche est donnée par l'équation 2.

$$\rho_d h_d ((1 - \phi) C p_d + \phi C p_f) \frac{\partial T_d}{\partial t} + \dot{q}_f C p_f \frac{\partial T_d}{\partial x} = \frac{T_s - T_d}{Rth_{s/d}} - \frac{T_d - T_{b1}}{Rth_{d/b1}} \quad (2)$$

- **Couches de base**

Les couches de bases sont le siège de conduction instationnaire. Le bilan d'énergie est donc :

$$\begin{cases} \rho_{b1} C p_{b1} h_{b1} \frac{\partial T_{b1}}{\partial t} = \frac{T_d - T_{b1}}{Rth_{d/b1}} - \frac{T_{b1} - T_{b2}}{Rth_{b1/b2}} & (base) \\ \rho_{b2} C p_{b2} h_{b2} \frac{\partial T_{b2}}{\partial t} = \frac{T_{b1} - T_{b2}}{Rth_{b1/b2}} & (sous - sol) \end{cases} \quad (3)$$

3.2. L'échangeur thermique intermédiaire

Le rôle principale de l'échangeur est d'assurer le transfert de la chaleur récupérée par le fluide circulant dans le Dromotherm vers le stockage thermique inter-saisonnier. Il est caractérisé par son efficacité. On appelle efficacité ϵ d'un échangeur thermique le rapport entre la quantité de chaleur échangée et la quantité de chaleur maximale transférable [5]. Dans notre cas, il s'exprime par l'équation

$$\epsilon_{eff} = \begin{cases} \frac{T_{sor_dro} - T_{inj_dro}}{T_{sor_dro} - T_{sor_sto}} & si \quad \dot{m}_{dro} C p_{dro} < \dot{m}_{sto} C p_{sto} \\ \frac{T_{inj_sto} - T_{sor_sto}}{T_{sor_dro} - T_{sor_sto}} & si \quad \dot{m}_{dro} C p_{dro} \geq \dot{m}_{sto} C p_{sto} \end{cases}$$

3.3. La Pompe à Chaleur

La PAC est caractérisée par son coefficient de performance (COP) qui représente le rapport entre la puissance utile P_{bat} (Puissance de chauffage et d'ECS du bâtiment) et la puissance électrique P_{elec} fournie au compresseur de la PAC :

$$COP = \frac{P_{bat}}{P_{elec}} \quad (4)$$

On suppose dans cette étude que le COP de la PAC est constant. La puissance utile de la PAC s'exprime par :

$$P_{bat} = P_{elec} + P_{geo} \quad (5)$$

La puissance géothermique prélevée au stockage peut s'exprimer

$$P_{geo} = \frac{COP - 1}{COP} * P_{bat} \quad (6)$$

La PAC extrait de la chaleur dans la stockage grâce à la circulation d'un fluide (de l'eau glycolée). Le fluide sort de la PAC à une température T_{sor_pac} et y retourne à une température T_{inj_pac} après avoir échangé de la chaleur avec le stockage. La puissance géothermique extraite est donnée par l'équation 7

$$P_{geo} = \dot{m}_{pac} C p_{pac} (T_{inj_pac} - T_{sor_pac}) \quad (7)$$

3.4. Le stockage inter-saisonnier

Les transferts thermiques entre le fluide caloporteur et le sable peuvent être décrits par 3 résistances thermiques en série :

- la résistance thermique de convection entre le fluide et les tubes [6] :

$$Rth_{conv} = \frac{1}{\pi N_u N_{tubes} L_{tubes} \lambda_f} \quad (8)$$

- la résistance thermique entre les tubes et le stockage [6] :

$$Rth_{tubes} = \frac{\ln(\frac{R_{ext}}{R_{int}})}{2\pi N_{tubes} L_{tubes} \lambda_{tubes}} \quad (9)$$

- la résistance thermique de conduction dans le sable sous la forme de l'équation 10

$$Rth_{sable} = \frac{e_{sable}}{\lambda_{sable}} \quad (10)$$

L'évolution temporelle de la température du stockage T_{stock} obéit à l'équation suivante :

$$m_{sable} C p_{sable} \frac{dT_{stock}}{dt} = \dot{Q}_{recue} - \dot{Q}_{perdue} \quad (11)$$

où :

Q_{recue} est la quantité de chaleur apportée par le fluide du dromotherm et s'exprime par l'équation 12 :

$$Q_{recue} = \dot{m}_{sto} C p_{sto} (T_{inj_sto} - T_{sor_sto}) \quad (12)$$

Q_{perdue} est la quantité de chaleur prélevée par la PAC et les pertes par conduction par les parois du stockage. Elle s'exprime par l'équation 13 :

$$Q_{perdue} = \dot{m}_{sto} C p_{sto} (T_{inj_sto} - T_{sor_sto}) + \frac{T_{stock} - T_{sous-sol}}{\frac{e_{iso}}{\lambda_{iso} S_{iso}}} \quad (13)$$

La température du stockage est donc régie par l'équation 14 :

$$\begin{aligned} m_{sable} C p_{sable} \frac{dT_{stock}}{dt} = & \dot{m}_{sto} C p_{sto} (T_{inj_sto} - T_{sor_sto}) - \dot{m}_{pac} C p_{pac} (T_{inj_pac} - T_{sor_pac}) \\ & - \frac{T_{stock} - T_{sous-sol}}{\frac{e_{iso}}{\lambda_{iso} S_{iso}}} \end{aligned} \quad (14)$$

3.5. Le bâtiment collectif

On se propose d'étudier le comportement du système dans le cas d'un immeuble R+3 constitué de 4 logements par niveau de type T4 d'une surface moyenne de 75 m² chacun et situé dans la ville de Chambéry. L'habitation suit la norme de la RT 2012 des bâtiments basses consommations, leurs besoins en énergie ne doivent pas dépasser 50 kWh/m²/an.

3.5.1. Les besoins de chauffage

Pour estimer la puissance de chauffage de l'immeuble, nous utilisons le modèle RC simplifié. Dans le cas de notre étude, nous assimilons l'appartement à un modèle R3C comme le montre la figure 3.

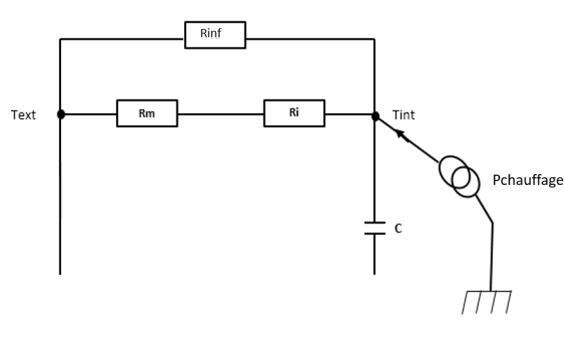


Figure 3 : Modèle R3C d'un appartement

La variation de la température intérieure est alors donnée par l'équation 15

$$C \frac{dT_{int}}{dt} = P_{chauffage} - \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_m + R_i} - \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_{inf}} \quad (15)$$

3.5.2. Les besoins en ECS

La consommation d'ECS est estimée à l'aide du rapport de l'ADEME [7]. Il ressort de ce rapport que les besoins journaliers moyens par personne sur une année sont de 56 ± 23 litres à 40 °C. Le nombre moyen d'occupants dans un logement collectif est 2,2 personnes par appartement selon l'INSEE [8]. A partir de ces différentes données et des différents coefficients de répartitions indiqués dans le rapport de l'ADEME, nous pouvons construire le profil annuel de la consommation d'ECS dans l'habitat.

4. Résultats

L'ensemble des différentes équations établies dans nos modélisations a été résolu à l'aide d'une discréétisation en temps suivant le schéma de Euler implicite et un schéma explicite centré pour l'espace.

4.1. Données en entrée

Le tableau 1 résume les différentes caractéristiques du système utilisé pour nos simulations.

En plus de ces différentes caractéristiques, nous avons utilisé les données météo de la zone

S_{dro}	V_{sto}	S_{bati}	N_{tubes}	L_{tubes}	\dot{q}_{dro}	\dot{q}_{pac}
m^2	m^3	m^2	(-)	m	m^3/h	m^3/h
300	450	1250	200	10	2,6	2,9

Tableau 1 : Caractéristiques du système

H1 telles que la température ambiante, les rayonnements directs et atmosphériques et la vitesse du vent. Une simulation du fonctionnement annuel du système avec un pas de temps $dt = 1 \text{ h}$ et un pas d'espace $dx = 0.75 \text{ m}$ nous donne les résultats ci-dessous.

4.2. Recharge annuelle du stockage puis utilisation de ECS+chauffage (en hiver)

Dans ce cas d'usage, l'échangeur thermique routier a une surface 4 fois inférieure à la surface habitable est mis en œuvre. Il est activé dès que les conditions permettent de recharger le stockage thermique. Les résultats de la simulation sont présentés sur la figure 4.

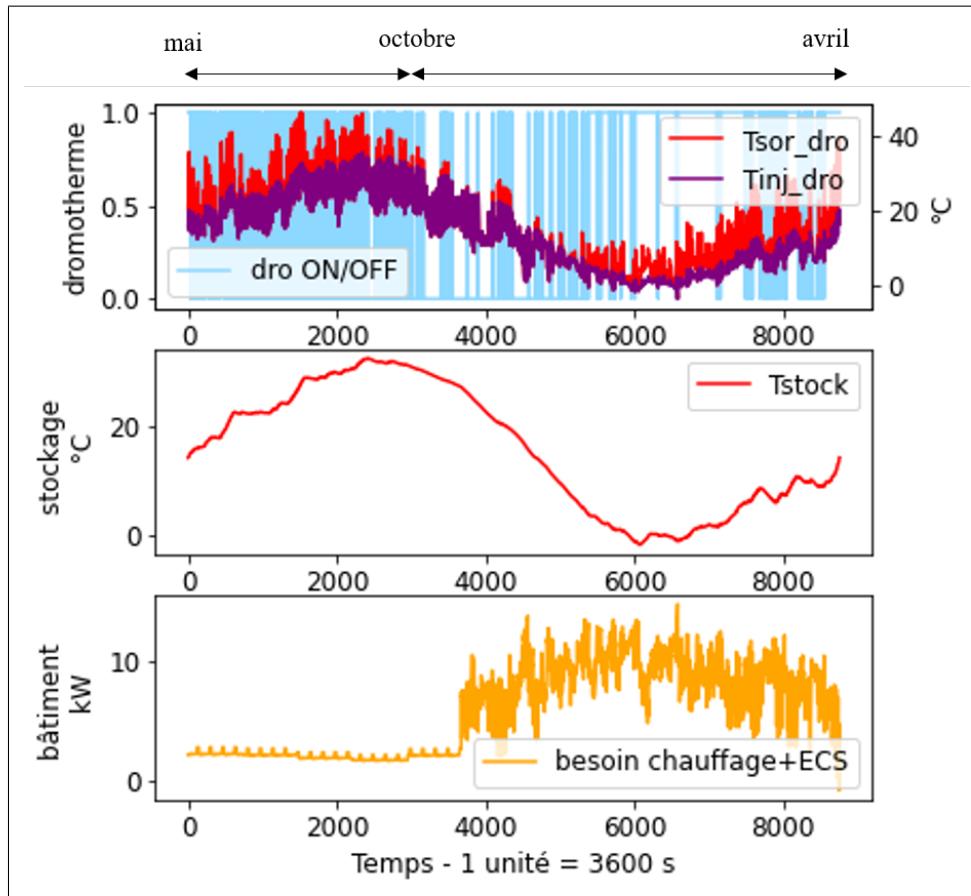


Figure 4 : Simulation de la recharge annuelle du stockage et utilisation de ECS+Chauffage (en hiver)

Le graphique montre le comportement du système sur une année type commençant à la fin de la saison de chauffe, soit le 1^{er} mai. Durant la première partie de l'année ($t < 4000 \text{ h}$), seuls les besoins en ECS sont couverts par la PAC. Le stockage thermique atteint une température maximale de 30 °C à la fin du mois de juillet (t autour de 2000 h). La température du stockage décroît régulièrement du mois d'août au mois de janvier, avec une baisse accrue de la température lors

du démarrage de la saison de chauffe à partir mois d'octobre. La chaleur accumulée durant l'été permet de subvenir aux besoins en ECS et chauffage durant l'automne. La recharge du stockage par le dromotherm s'estompe au courant du mois d'août se remet en marche dès la fin de l'automne lorsque les conditions météorologiques le permettent. Elle permet alors d'arrêter la chute des températures du stockage au mois de janvier et permet une remontée des températures à partir du mois de février. La limite basse des températures de stockage reste supérieure à 0 °C montrant un fonctionnement hors gel du stockage thermique.

Nous définissons le rendement de ce système comme étant le rapport entre le flux capté par la chaussée et le flux incident sur l'année :

$$\eta = \frac{Flux \ capté}{Flux \ incident} = 11\% \quad (16)$$

Ce rendement montre qu'une grande partie (près de 90%) de l'énergie solaire incidente est perdue. Une piste d'amélioration de ce rendement est de réduire la surface de chaussée. Ce qui engendrerait une diminution de la température et une prise en glace du stockage. Cette prise en glace est en cours d'étude dans notre thèse.

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons développé un modèle 1D d'un système de valorisation de l'énergie solaire des chaussées pour les besoins d'un bâtiment collectif. Les résultats de nos simulations nous montrent qu'avec une récupération de 11% de l'énergie solaire arrivant sur la surface de la chaussée, nous pouvons assurer les besoins de chauffage et d'ECS d'un immeuble. Ces premiers résultats encourageants demandent à être développés pour atteindre une méthodologie de dimensionnement de la surface de chaussée et du volume de stockage au regard des besoins du bâti.

Références

- [1] Sarah Asfour, Frédéric Bernardin, Alexandre Cuer. *Les Chaussées hors gel et récupératrices d'énergie*, (Octobre-Novembre 2016).
- [2] Ademe. *Le Bâtiment : les chiffres clés*, (2013).
- [3] Arefeh Hesaraki, Sture Holmberg, and Fariborz Haghigat. *Seasonal thermal energystorage with heat pumps and low temperatures in building projects - A comparative review*. (2015).
- [4] Sarah Asfour, Frédéric Bernardin, Evelyne Toussaint. *Experimental validation of 2D hydrothermal modelling of porous pavement for heating and solar energy retrieving applications*. (2018).
- [5] Jacques Padet. *ÉCHANGEURS THERMIQUES Méthodes globales de calcul avec problèmes résolus*. (1994).
- [6] Xavier Moch. *Etude théorique et expérimentale d'échangeurs géothermiques hélicoïdaux : Production de chaleur et de froid par pompe à chaleur, et dimensionnement d'installations*. (2013).
- [7] ADEME et COSTIC, *Guide technique : Les besoins d'eau chaude sanitaire en habitat individuel et collectif*, (mai 2016).
- [8] INSEE, *Taille des ménages dans l'Union européenne, Données annuelles de 2004 à 2019*, (2020). <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2381488>.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à la Région Auvergne-Rhône-Alpes pour avoir financé ce projet dans le cadre de l'appel à projet Pack Ambition recherche. Nous remercions également les entreprises Eiffage et Elydan pour leur accompagnement dans la réalisation de ce projet.