

Modélisation et simulation du comportement d'un système de stockage intersaisonnier de chaleur par un champ de sondes géothermiques couplé à des panneaux solaires thermiques.

Nolwenn LE PIERRES^{1*}, Bernard SOUYRI¹, Joanna FIERRI¹, Amadou OUMAROU¹

¹LabOratoire proCédés énerGie bâtimEnt (LOCIE), UMR5271

Université Savoie Mont Blanc, Savoie Technolac – 73370 Le Bourget-Du-Lac - France

* (auteur correspondant : nolwenn.le-pierres@univ-smb.fr)

Résumé - L'utilisation de pompes à chaleur (PAC) couplées à des sondes géothermiques pour le chauffage des bâtiments peut entraîner une décharge thermique du sol. Pour recharger le sol, la PAC fonctionne en mode inverse en été pour le rafraîchissement des bâtiments, mais la chaleur excédentaire disponible sur des capteurs solaires thermiques peut également y être réinjectée. Cette étude numérique du couplage solaire-PAC-géothermie présente le cas d'un groupe scolaire situé à Annecy récemment équipé. Le bâtiment et le système sont modélisés et les résultats comparés au fonctionnement observé.

Introduction

L'utilisation de pompes à chaleur (PAC) couplées à des sondes géothermiques pour le chauffage des espaces habités et de l'eau chaude sanitaire (ECS) des bâtiments peut entraîner une décharge thermique du sol, en fonction du soutirage de chaleur, des caractéristiques du sol et du dimensionnement du champ de sondes par rapport aux besoins du bâtiment. Sous les climats tempérés ou continentaux, la PAC extrait de la chaleur du sol en hiver (mode chauffage) et en réinjecte en été (mode climatisation). Si les deux modes de fonctionnement sont déséquilibrés, la température du sol en est affectée à moyen et long terme. Cet impact a déjà été étudié à l'échelle d'une maison individuelle, à la fois expérimentalement et numériquement [1-2]. Ces études ont montré des déséquilibres thermiques du sol entraînant une baisse de sa température de l'ordre de quelques degrés sur plusieurs décennies, puis une stabilisation à un nouveau niveau de température moyenne, en l'absence de recharge thermique suffisante. D'autres études [3] sur des bâtiments tertiaires ont étudié l'impact thermique du sol via une étude CFD sur plusieurs typologies de bâtiment et montrent des baisses ou des augmentations significatives de la température du sol (de plus de 10°C) pour des bâtiments pour lesquels le déséquilibre des besoins de chauffage vs rafraîchissement est supérieur à 80%. Par conséquent, la solution de recharge du sol uniquement via le fonctionnement de la PAC n'est pertinente que si les prélèvements géothermiques hivernaux sont du même ordre que la recharge estivale.

La décharge thermique du sol (cas le plus souvent rencontré sous nos climats européens tempérés) engendre une moindre performance de la PAC, puisque l'écart de température entre les sources chaude et froide de la PAC en mode chauffage en est augmenté sur le long terme. Une autre conséquence est un risque de gel localisé du sol lorsque celui-ci est humide. Le cyclage gel-dégel sur plusieurs saisons pourrait entraîner une modification des propriétés mécaniques locales du sol. Une option envisageable pour diminuer ce déséquilibre thermique est l'utilisation de capteurs solaires thermiques, qui permettent la production d'ECS pour le

bâtiment (diminuant ainsi les prélèvements de chaleur de la PAC sur les sondes) et, lors d'excédents de la ressource solaire en été, la recharge thermique du sol.

Différentes études [2-6] ont montré cette possibilité de recharge du sol via des capteurs solaires thermiques dans le cas d'un logement individuel. Les approches ont pu aller jusqu'à l'étape du prototypage à échelle 1 sur des projets de petite taille. Des études numériques ont en outre pu explorer le cas de bâtiments collectifs ou tertiaires. Néanmoins, très peu d'études ont permis des essais expérimentaux de ce type de couplage à l'échelle d'un bâtiment tertiaire.

Ce travail présente donc l'analyse numérique du comportement d'un système de stockage intersaisonnier de chaleur issue de panneaux solaires thermiques via à un champ de sondes géothermiques, dans le cas d'un bâtiment tertiaire instrumenté pour permettre la validation du modèle numérique.

1. Description du cas d'étude : Vallin Fier

1.1. Bâtiment concerné

L'étude du couplage solaire thermique - PAC - sondes géothermiques est centrée sur le cas d'un groupe scolaire situé à Annecy, de 4 107 m² de zone chauffée. Inaugurée en 2012, l'école accueille près de 480 enfants et est correctement isolée (120 mm de laine de verre en paroi). Pour répondre aux besoins de chauffage du bâtiment, l'énergie géothermique est exploitée grâce à 18 puits de 100 m de profondeur et de 15 cm de diamètre chacun. Chaque puits est espacé de 6 m. Les sondes géothermiques sont assistées par une PAC d'une puissance nominale de 138 kW et d'un coefficient de performance (COP) nominal de 3.84.

La modélisation simplifiée du groupe scolaire sur TRNBuild (10 zones thermiques) permet de chiffrer ses besoins à 18 kWh/(m².an) en chauffage, ce qui est bien en dessous des normes fixées par la RT 2012, et à 3 kWh/(m².an) en rafraîchissement. On voit un grand déséquilibre entre les besoins de chauffage et de rafraîchissement, qui justifie la nécessité d'une recharge thermique du sol. La température moyenne du sol en contact avec les sondes géothermiques est de 10.2°C initialement. Une simulation du comportement des sondes sur 25 ans a montré que la diminution de température du sol serait en effet supérieure à 4°C sans recharge solaire.

Par conséquent, il a été décidé de valoriser l'énergie solaire disponible en excès sur 78 m² de capteurs solaires thermiques sous vide VITOSOL 200-T qui servent à couvrir en partie les besoins en eau chaude sanitaire (ECS) et la recharge thermique du sol.

1.2. Circuits et composants

Le système étudié est composé de 4 circuits principaux (Figure 1). L'ensemble des canalisations est calorifugé.

La boucle solaire permet de couvrir en partie le chauffage de l'ECS l'hiver et la recharge des sondes géothermiques tout au long de l'année en cas de disponibilité de la chaleur solaire. La pompe P4 assure le débit d'eau glycolée. Le fluide est chauffé par les capteurs solaires et est ensuite soit envoyé vers l'échangeur solaire connecté aux sondes géothermiques, soit vers le ballon ECS. Les soutirages d'ECS ont lieu principalement entre 10 et 15 h (fonctionnement du restaurant scolaire). Une chaudière d'appoint électrique de 1 500 L positionnée en aval du ballon ECS permet à l'eau soutirée d'atteindre la température souhaitée de 60 °C même lorsque le préchauffage solaire ne permet pas d'atteindre cette consigne.

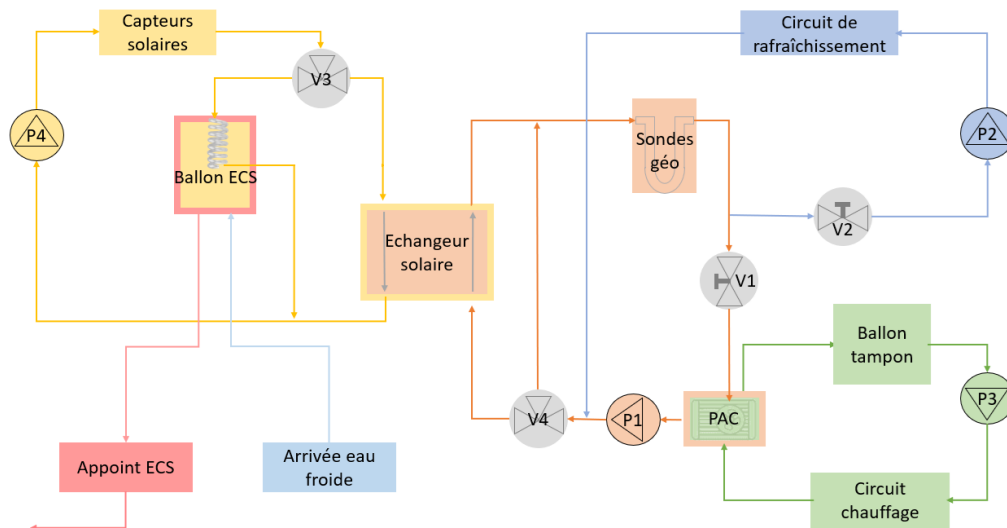


Figure 1 : Schéma des circuits hydrauliques et de la production d'ECS

La boucle géothermique (Figure 1) est en contact avec celle solaire via un échangeur. L'hiver, le fluide caloporteur de cette boucle extrait de la chaleur au sol grâce aux sondes géothermiques. La vanne V1 est ouverte et permet que ce fluide, transfère sa chaleur à l'évaporateur de la PAC. Son débit est assuré par la pompe P1. La vanne trois voies V4 permet le retour du fluide soit par l'échangeur solaire, soit directement vers les sondes géothermiques. L'été, la vanne V2 est ouverte et la vanne V1 fermée, ce qui permet au fluide caloporteur passant dans les sondes géothermiques d'alimenter un circuit de rafraîchissement du bâtiment (géocooling). Lors de son passage dans les sondes, le fluide cède de la chaleur au sol pour assurer sa recharge thermique. La pompe P2 assure le débit de ce fluide dans les canalisations des centrales de traitement de l'air (CTA) pour le rafraîchissement du bâtiment : le fluide extrait de la chaleur à l'air soufflé dans la pièce, ce qui lui permet de monter en température. Lors de son passage dans la vanne V4 le fluide est dirigé soit vers l'échangeur solaire (qui transfère la chaleur solaire au fluide pour un chauffage supplémentaire), soit retourné directement vers les sondes géothermiques.

La boucle relative au chauffage est alimentée par le fluide en contact avec le condenseur de la PAC. L'eau du réseau de chauffage chauffée par la PAC est stockée dans un ballon tampon à 40 °C. La pompe P3 assure le débit dans les canalisations du bâtiment (radiateurs et planchers chauffants).

1.3. Régulation

La vanne V3 (Figure 1) est régulée de la façon suivante : 3 conditions doivent être respectées pour que 100 % du débit soit envoyé vers le ballon ECS : $T_{\text{sortie capteurs}} > T_{\text{ballon ECS}}$, $T_{\text{ballon ECS}} < 50^{\circ}\text{C}$ et il faut que le soutirage d'eau vers la cuisine soit effectif, donc que : $10 \text{ h} < t < 15 \text{ h}$. Si l'une de ses conditions n'est pas respectée, alors 100 % du débit est directement envoyé vers l'échangeur solaire.

La régulation de la vanne V4 dépend du fonctionnement de la vanne V3. Lorsque V3 envoie 100 % de son débit au ballon ECS, alors V4 envoie 100 % de son débit aux sondes géothermiques et l'échangeur solaire n'est pas alimenté par la boucle géothermique. Lorsque la vanne V3 envoie l'intégralité de son débit à l'échangeur solaire alors la vanne V4 envoie 85 % de son débit aux sondes et 15 % à l'échangeur solaire pour que la récupération de chaleur soit possible.

La pompe P4 se met en fonctionnement lorsque : $T_{\text{sortie capteurs}} > T_{\text{sortie sondes géothermiques}} + 6 \text{ °C}$
 et s'arrête lorsque : $T_{\text{sortie, capteurs}} < T_{\text{sortie sondes géothermiques}} + 3 \text{ °C}$.

2. Hypothèses de modélisation

L'ensemble de ces circuits et la régulation ont été modélisés sous TRNSys, à l'aide des Types décrits Tableau 1.

Composants	Types	Composants	Types
Capteurs	1	Appoint électrique	138
Vannes	11	Ballon ECS	156
Arrivée eau froide	14	Ballon tampon	158
Conduites	31	Sondes géothermiques	557
Echangeur solaire	91	PAC	927
Pompes	114		

Tableau 1 : Types TRNSys utilisés

Les apports de chaleur liés aux occupants du bâtiment ainsi que ceux liés aux équipements (en particulier liés au restaurant scolaire et à l'équipement informatique) ont été pris en compte. La ventilation des salles est assurée par une CTA double flux l'hiver. Environ la moitié de l'air extérieur est recyclé et réinjecté dans la pièce. Le flux total traité par la CTA est de 13 500 m³/h. Cette ventilation est effective entre 6 et 18 h dans l'ensemble du bâtiment sauf pour le restaurant scolaire où elle est en fonctionnement de 10 à 16 h. La CTA double flux ne fonctionnent pas en été ; l'air extrait n'est alors pas recyclé, uniquement de l'air neuf est soufflé.

Le taux d'infiltration est fixé à 0,2 vol/h par zone. Le chauffage fonctionne de 6 à 19 h. Les consignes sont de 20 °C pour les salles occupées par l'élémentaire, de 21 °C pour les classes de maternelles et de 22 °C pour la crèche. En inoccupation, la température de consigne est de 16 °C. Dans le gymnase la consigne est fixée à 16 °C en période d'occupation et à 13 °C en inoccupation. Les cuisines sont chauffées à 20 °C de 10 à 16h et à 16 °C le reste du temps.

Afin de déterminer les besoins de rafraîchissement du bâtiment, la température de consigne du modèle en cas de surchauffe est fixée à 26 °C pour l'ensemble du bâtiment et à 35 °C lors de son inoccupation. Cette haute température garantit le fait que les besoins en climatisation simulés sont nuls lors de l'inoccupation du bâtiment (soirée, week-end). Dans le bâtiment réel, le géocooling rafraîchit l'air neuf du bâtiment, il n'y a pas de réelle climatisation avec maintien de la température ambiante à 26°C dans les locaux, mais ce rafraîchissement permet un confort amélioré pour les occupants.

Les données météorologiques utilisées pour la simulation sont celles de Genève, au pas de temps de 1 h. Les quantités d'énergie nécessaires au chauffage et au rafraîchissement sont représentées Figure 2. Les quantités de chaleur et de rafraîchissement simulées ont pu être comparées aux consommations réelles du bâtiment, validant les ordres de grandeur obtenus, soit environ 75 MWh/an de chauffage et environ 12 MWh/an de rafraîchissement.

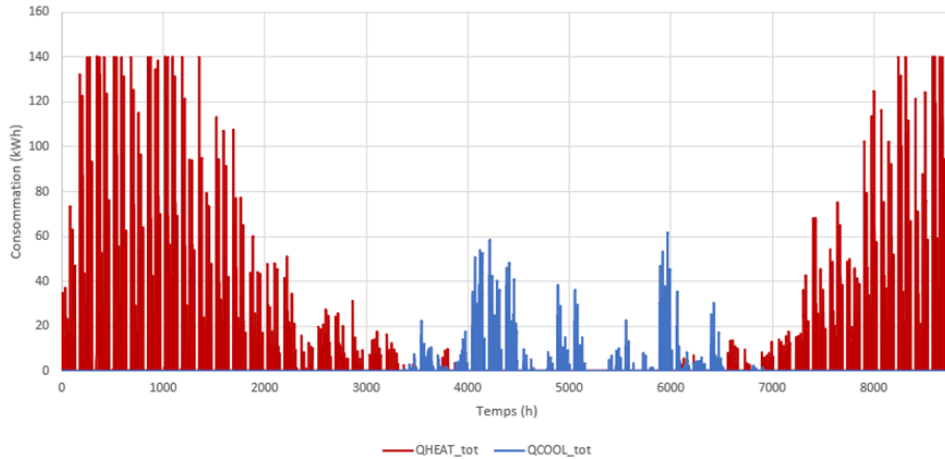


Figure 2 : Besoins en chauffage (Q_{HEAT}) et en rafraîchissement (Q_{COOL}) du bâtiment sur un an

3. Résultats de simulations

3.1. Sondes géothermiques

Le comportement des sondes géothermiques est représenté sur la figure 3. Sur la période de chauffage, de l'énergie est extraite du sol : la température du fluide en sortie des sondes $T_{s,sondes}$ est inférieure à la température moyenne du sol $T_{moy,sol}$. De plus, l'augmentation de température du fluide caloporteur lors de son parcours dans les sondes est d'environ 5 K. Sur la période estivale, le géocoooling est effectif, le transfert thermique via l'échangeur solaire aussi, et de l'énergie est stockée dans le sol. En effet, la température en sortie des sondes est supérieure à la température moyenne du sol et la diminution de température du fluide dans les sondes géothermiques est d'environ 3 K. Aussi, le fluide ne descend jamais en-dessous de 2 °C sur l'ensemble de l'année, ce qui exclut tout risque de gel dans les canalisations ou du sol à proximité des sondes. L'hiver, la puissance extraite du sol atteint les 100 kW tandis que la recharge estivale est de 40 kW en moyenne. Sur les mois de mai et juin, les puissances fournies au sol sont plus importantes, atteignant presque 100 kW : en effet, sur les mois suivants le sol étant déjà partiellement rechargé la puissance transmise diminue.

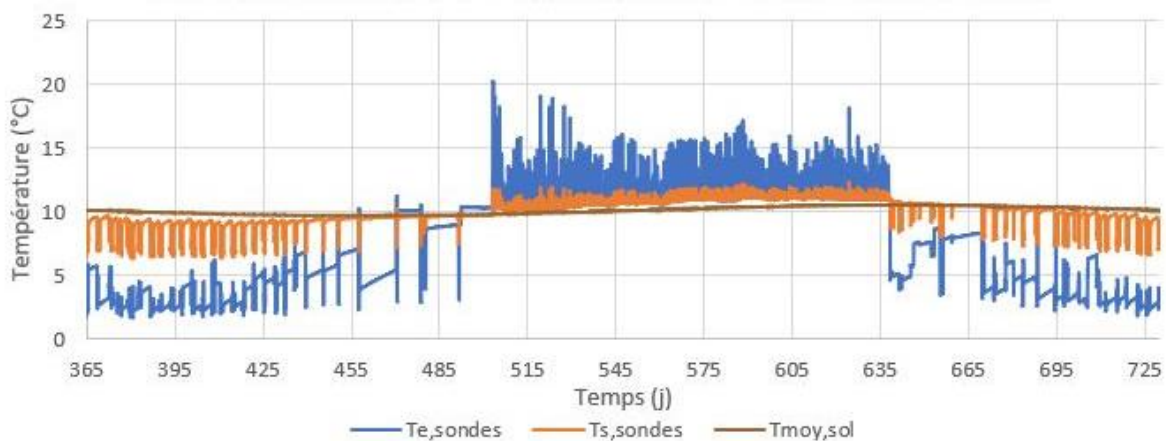


Figure 3 : Températures du fluide en entrée ($T_{e,sondes}$) et en sortie ($T_{s,sondes}$) du champ de sondes et température moyenne du sol ($T_{moy,sol}$) sur un an

3.2. Capteurs solaires

Sur la figure 4 la température des capteurs solaires au cours de l'année est représentée.

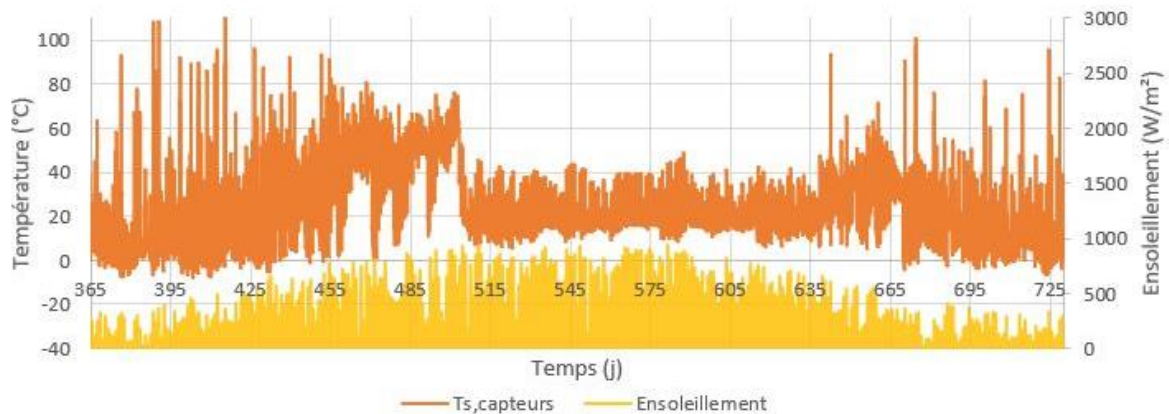


Figure 4 : Température en sortie des capteurs solaires ($T_{s,capteurs}$) et ensoleillement sur un an

Sur la période hivernale, la température du caloporteur en sortie des capteurs augmente logiquement avec l'augmentation de l'ensoleillement. La température en sortie de capteurs atteint ainsi des valeurs dépassant les 110 °C sur certains jours et atteint aisément les 60 °C de manière générale. Par ailleurs, cette température ne descend jamais en dessous de -8 °C : le risque de gel de l'eau glycolée est donc évité.

En revanche, sur la période estivale (du 500^{ème} au 635^{ème} jour), la température du fluide est plus faible : elle oscille entre 10 et 45 °C. Ce constat semble contre-intuitif avec le fait que l'ensoleillement est maximal sur cette période et atteint 800 W/m² pratiquement chaque jour. En effet, sur la période estivale, la circulation du caloporteur dans les sondes géothermiques diminue fortement sa température, comme présenté figure 3. Par conséquent, le fluide caloporteur du circuit solaire, qui circule via l'échangeur solaire sur cette période, voit également fortement sa température diminuer dans ce composant avant de circuler dans les capteurs solaires thermiques. Par conséquent, malgré le fort ensoleillement, la température en sortie des capteurs n'est pas suffisante pour permettre le chauffage de façon notable du ballon ECS sur cette période, ce qui pénalise la production d'ECS solaire. En contrepartie, la température des capteurs solaires étant très faible sur cette période, le rendement des capteurs solaires est excellent et une quantité d'énergie importante peut donc être transmise pour la recharge du sol.

3.3. Bilans énergétiques

Les flux d'énergie échangés chaque année par le système sont représentés sur le diagramme de Sankey figure 5. Les capteurs solaires fournissent de l'énergie à l'échangeur solaire ainsi qu'au ballon ECS pour le préchauffage de l'ECS. Cette dernière est amenée à température de consigne grâce à l'appoint électrique. L'énergie fournie par l'échangeur solaire l'été ainsi que le géocooling permettent la recharge du sol. L'énergie fournie par l'échangeur solaire l'hiver ainsi que l'énergie extraite du sol alimentent l'évaporateur de la PAC, qui, avec son alimentation électrique permet au condenseur d'alimenter le réseau de chauffage du bâtiment.

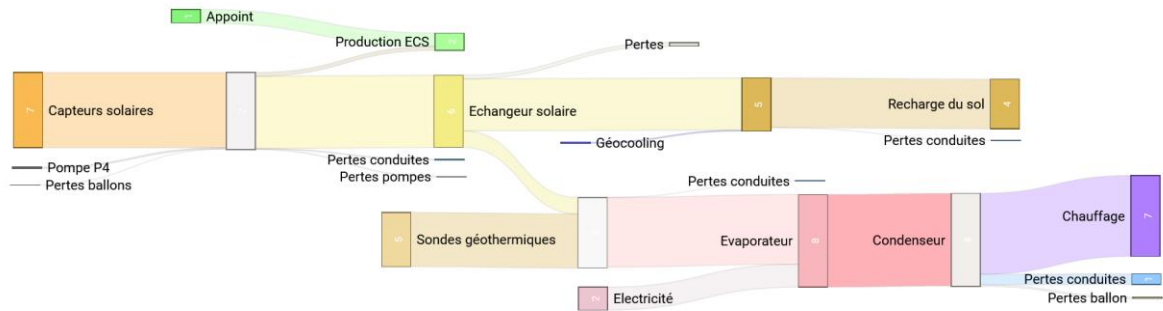


Figure 5 : Diagramme de Sankey de l'ensemble du système

Près de 67 MWh de chaleur sont produits par les capteurs solaires sur l'année. Ils permettent notamment une recharge du sol de plus de 44 MWh en été. En hiver, près de 48 MWh sont extraits du sol par les sondes. 72 MWh sont consommés chaque année pour le chauffage du bâtiment. Dans cette configuration, l'énergie solaire et géocooling de recharge du sol compense presque le soutirage thermique hivernal. Une simulation des sondes sur 25 ans montre dans ce cas une diminution négligeable de la température du sol à proximité des sondes géothermiques. En revanche, comme illustré figure 5, dans ce cas les capteurs solaires ne contribuent que marginalement à la production d'ECS annuel. Similairement, le fonctionnement du géocooling ne contribue que marginalement à la recharge thermique du sol : en effet les besoins de rafraîchissement restent limités en raison des congés scolaires correspondant aux périodes les plus chaudes de l'année.

4. Conclusion

Les besoins en chauffage du bâtiment sont largement satisfaits par le système. De plus, le couplage des capteurs solaires thermiques et de la PAC géothermique semble pertinent, puisque le système solaire permet au sol de se recharger suffisamment, la différence étant couverte par la recharge naturelle du sol par rayonnement solaire direct.

La production d'ECS est en revanche défavorisée. C'est le cas sur toute la période estivale puisque la température de sortie du ballon de stockage solaire n'excède pas les 19 °C alors qu'elle pourrait atteindre la température de consigne étant donné l'ensoleillement disponible. Cet impact est lié à la régulation choisie initialement, qui favorise la recharge thermique du sol sur l'ensemble de la saison estivale. Une autre régulation est à mettre en place et à quantifier, pour privilégier la production d'ECS sur certaines plages horaires par exemple, dans l'objectif de ne dégrader que faiblement les performances annuelles du système en permettant des économies énergétiques et financières sur la consommation de l'appoint électrique.

Par ailleurs, même si les bilans annuels globaux obtenus avec le modèle présenté ont pu être comparés aux consommations mesurées, des analyses plus fines sur le comportement du système composant par composant doivent maintenant être menées pour valider plus précisément chaque composant du modèle grâce à des résultats expérimentaux. Ces mesures sont en cours d'acquisition depuis l'été 2022 et permettront dans les prochains mois cette validation, avant de proposer des pistes d'amélioration pertinentes pour une régulation plus fine du système ainsi que l'évaluation de l'impact à long terme de la recharge thermique du sol sur les performances énergétiques globales de ce bâtiment.

Références

- [1] E. Kjellsson, G. Hellström, B. Perers, Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings, *Ener.*, 35 (2010), 2667-2673.
- [2] V. Trillat-Berdal, B. Souyri, G. Achard, Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors, *Appl. Therm. Eng.*, 27-10 (2007), 1750-1755.
- [3] J.P. Fine, H.V. Nguyen, J. Friedman, W.H. Leong, S.B. Dworkin, A simplified ground thermal response model for analyzing solar-assisted ground source heat pump systems, *Ener. Conv. and Manag.*, 165 (2018), 276-290.
- [4] J. Nou, *Gestion optimale de l'énergie thermique dans un procédé hybride : solaire/géothermie pour le chauffage de bâtiments*, Thèse de l'Université de Perpignan (2011).
- [5] Z. Han, M. Zheng, F. Kong, F. Wang, Z. Li, T. Bai, Numerical simulation of solar assisted ground-source heat pump heating system with latent heat energy storage in severely cold area, *Appl. Therm. Eng.* 28 (2008), 1427–1436.
- [6] V. Verma, K. Murugesan, Experimental study of solar energy storage and space heating using solar assisted ground source heat pump system for Indian climatic conditions, *Ener. and Build.* 139 (2017) 569–577.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les partenaires du projet BTESmart, en particulier Storengy et la Ville d'Annecy pour leur collaboration efficace, ainsi que l'ADEME pour le financement du projet APR Energie Durable 2017.