



MODELISATION D'UNE INSTALLATION INNOVANTE DE COUPLAGE DE CHALEUR SOLAIRE GEOtherMIQUE

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

Présenté et soutenu publiquement le 24/07/2023 par

Amadou OUMAROU OUSMANE (20160384)

**Directeurs de mémoire : Prof. Nolwenn LE PIERRES, professeure des universités
Université Savoie Mont Blanc**

**Bernard SOUYRI, maître de conférences
Université Savoie Mont Blanc**

**Encadrant 2iE : Dr.-ing. habil. Koukouvi Edem N'TSOUKPOE (HDR)
Maître Assistant CAMES**

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

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Dr. Y. Moussa SORO

Membres et correcteurs : Dr.-ing. habil. Koukouvi Edem N'TSOUKPOE
Dr. Sayon Dit Sadio SIDIBE
Dr. Daniel YAMEGUEU

Promotion [2022/2023]

DEDICACES

Je dédie ce travail :

*A mon père **Ousmane OUMAROU**, pour tous les sacrifices consentis.
Retrouvez ici l'expression de toute ma gratitude.*

*A ma mère **Aoua MALAM MAHAMAN**, pour son amour maternel sans réserve dans mon quotidien qui m'a toujours donné envie de me dépasser.*

*A mes sœurs **Amina et Mariama** pour leur amour et leur soutien inconditionnel.*

*A la grande famille **OUMAROU GARBA** en particulier mes oncles : **Issa BOUNOU, Amadou GANA, Ibrahim OUMAROU** pour leur soutien moral et financier.*

CITATIONS

« Il y a plus de courage que de talent dans la plupart des réussites. »

Félix Leclerc

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont à l'endroit de :

- L'ensemble du personnel de l'Institut 2iE dans son ensemble sous la direction du **Prof. El Hadji Bamba DIAW** pour m'avoir appris le métier d'ingénieur pendant ces années dans une convivialité et une diversité culturelle. Mention spéciale au personnel du département Génie Electrique, Energétique et Industriel (GEEI) dirigé par **Pr. Y. Moussa SORO** pour avoir suivi méticuleusement notre cursus avec la plus grande rigueur ;
- **Dr.-ing. habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE** pour avoir encadré mon travail. Merci pour tous ces valeureux conseils que vous m'aviez donnés ;
- L'ensemble du personnel du LOCIE dirigé par **Pr. Christophe MENEZO** pour m'avoir donné cette immense opportunité de faire mon stage de fin de cycle dans leurs locaux ;
- **Prof. Nolwenn LE PIERRES** et **Bernard SOUYRI**, pour m'avoir intégré au LOCIE et encadré mon travail. Ce fût un réel plaisir d'avoir travaillé avec vous malgré toutes vos occupations. J'ai énormément appris tant sur le plan professionnel que personnel ;
- **Charlotte REY** et **Damien VALERY** de l'entreprise STORENGY pour leur collaboration et leur soutien technique ;
- **L'Agence Nigérienne D'Allocation des Bourses (ANAB) du Niger** pour avoir financé mes études à l'Institut 2iE ;
- **Dr. Aboubacar GOMNA**, enseignant au département GEEI. Merci Monsieur pour avoir toujours été à notre écoute à chaque fois qu'on vous sollicitait ;
- Mes rencontres au LOCIE : **Taini CHITIMBO**, **Odile BAUDIN**, **Barbara CALLOT** et toute l'équipe de foot du **LOCIE FC**. Merci d'avoir rendu agréable mon séjour à Chambéry ;
- **Moussa HASSAN GARBA**, **Prince SEVI**, **Issouf TAMBO**, **Issakou M. GUIMBA**, **Kadidia SISSOKO**, **Khalid KADO**, **Khadim FAYE**, **Aminata COULIBALY** pour avoir facilité mon départ et mon séjour en France ;
- Mes camarades et amis de promotion pour ces années de gaieté que nous avons passées ensemble. Mention spéciale à **Hadjara TSAYABOU**, **Mamadou FOFANA**, **Kassoum SANON**, **Bourama SIDIBE**, **Kadiatou DIARRA**, **Fatim GAKOU**, **Rubens FAGLA**.
- Tous ceux qui ont d'une manière ou d'une autre contribué dans la réalisation de ce travail.

RESUME

Le secteur du résidentiel constitue 38%¹ de la consommation finale d'énergie en France. De plus, le poste de chauffage constitue 61,3% de la consommation énergétique moyenne dans ce secteur [1]. Un projet de couplage des énergies solaire et géothermique, dénommé BTESmart, a été initié par l'ADEME en juin 2021. L'idée de ce projet d'exploiter le potentiel de ce couplage afin d'améliorer l'apport énergétique dans le bâtiment. Son principe de fonctionnement est d'injecter le surplus de production d'un champ de capteurs solaires thermiques sur un champ de sondes à travers des échangeurs géothermiques verticaux. Ce potentiel associé à la géothermie, servira à chauffer un bâtiment à partir d'une pompe à chaleur géothermique et à produire de l'eau chaude sanitaire en hiver. En été, les calories prélevées du bâtiment et la production solaire seront injectées au sol pour recharger son potentiel. Le BTESmart est principalement constitué de 78 m² de capteurs solaires thermiques, d'une pompe à chaleur d'une puissance nominale de 140 kW, d'un ballon ECS de 1500 L, d'un préparateur électrique ECS de 14,2 kW. Les travaux réalisés montrent qu'environ 78% de l'énergie solaire produite est consacrée à la recharge thermique avec un taux de couverture solaire ECS de 43%. L'énergie extraite est de 63,5 MWh pour un besoin en chauffage estimé à 95,6 MWh.

Mots Clés :

-
- 1 - Géothermie**
 - 2 – Pompe à chaleur**
 - 3 – Echangeurs géothermiques verticaux**
 - 4 – Energie solaire thermique**
 - 5 – Couplage solaire - géothermie**

¹ RTE, Bilan électrique 2020
https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/Bilan%20electrique%202020_0.pdf

ABSTRACT

The residential sector is responsible of 38% of the final energy consumption in France. In addition, the heating sector represents 61.3% of the average energy consumption in this sector [1]. A project of coupling solar and geothermal energies, called BTESmart, was initiated by ADEME in June 2021. The idea of this project is to explore the potential of this coupling in order to improve the energy supply in the building. Its operating principle is to inject the extra production of a field of solar thermal collectors on a bed of boreholes through vertical geothermal exchangers. This potential associated with geothermal energy will be used to provide heating for a building using a geothermal heat pump and to produce domestic hot water in winter. In summer, the solar field production and the calories removed from the building will be injected into the ground to reload its potential. The BTESmart is mainly composed of 78 m² of solar thermal collectors, a heat pump with a nominal heat output of 140 kW, a 1500 L DHW tank, and a 14.2 kW electric auxiliary heater. The work carried out shows that about 78% of the solar energy produced is devoted to thermal recharge with a solar domestic hot water coverage rate of 43%. The extracted energy is 63.5 MWh for an estimated heating need of 95.6 MWh.

Key words:

- 1 – Geothermal energy**
- 2 – Heat pump**
- 3 – Borehole heat exchangers**
- 4 – Solar thermal energy**
- 5 – Solar - geothermal coupling**

LISTE DES ABREVIATIONS

SIGLES

2iE	: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
ADEME	: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
BF Air neuf	: Batterie Froide air neuf
CCTP	: Cahier des Clauses Techniques Particulières
CESI	: Chauffe-Eau Solaire Individuel
COP	: Coefficient de performance
CNRS	: Centre National de la Recherche Scientifique
CSTB	: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CTA	: Centrale de Traitement d'Air
ECS	: Eau Chaude Sanitaire
INES	: Institut National d'Energie Solaire
LOCIE	: Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement
PAC	: Pompe à Chaleur
PEHD	: Polyéthylène Haute Densité.
R+1	: Premier niveau
RDC	: Rez-De-Chaussée
RT2012	: Réglementation thermique 2012
RTE	: Réseau de Transport d'Électricité
UMR	: Unité Mixte de Recherche
TRNSYS	: TRansient SYstem Simulation

UNITES

°C	: Degré Celsius
J	: Joule
h	: Heure
g	: gramme
k	: Kilo
K	: Kelvin
l	: Litre
m	: Mètre
m²	: Mètre carré
m³	: Mètre cube
s	: Seconde
W	: Watt

NOMENCLATURE

Notation	Signification	unité
U	: Coefficient d'échange global	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Φ	: Flux de chaleur	$W \cdot m^{-2}$
Nb occupants	: Nombre d'occupants dans la zone	u
$P_{frigorique}$: Puissance horaire de rafraîchissement	kW
q_{CTA}	: Débit des CTA	$m^3 \cdot h^{-1}$
Cv_{air}	: Chaleur volumique de l'air	$Wh \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$
T_{amb}	: Température ambiante	$^{\circ}C$
ΔT_H	: Seuil d'enclenchement de la mise en marche de la régulation	$^{\circ}C$
ΔT_L	: Seuil de déclenchement de la mise en marche de la régulation	$^{\circ}C$
T_H	: Température à la sortie de capteurs	$^{\circ}C$
T_L	: Température à la sortie des sondes géothermiques	$^{\circ}C$
η	: Rendement des capteurs solaires thermiques	-
a_0	: Rendement optimal lorsqu'il n'y a aucune perte	-
a_1	: Coefficient des pertes optiques	$kJ \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
a_2	: Coefficient des pertes thermiques	$kJ \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^{-2}$
T_e	: Température d'entrée du fluide caloporteur dans le capteur	$^{\circ}C$
I_T	: Irradiation globale sur plan incliné	$W \cdot m^{-2}$
Cap_h	: Besoin calorifique du bâtiment au pas de temps considéré	kW
P_h	: Puissance électrique consommée par la PAC en mode chauffage	kW
P_{calo}	: Besoin en chauffage	kW
P_{frigo}	: Besoin en rafraîchissement	kW
$T_{e,h}$: Température du fluide à l'entrée du circuit de chauffage	$^{\circ}C$
$T_{e,c}$: Température du fluide à l'entrée du circuit de rafraîchissement	$^{\circ}C$
$T_{s,h}$: Température du fluide à la sortie du circuit de chauffage	$^{\circ}C$
$T_{s,cap}$: Température du fluide à la sortie des capteurs	$^{\circ}C$
$T_{s,c}$: Température du fluide à la sortie du circuit de rafraîchissement	$^{\circ}C$
$T_{source,out}$: Température du fluide à la sortie de l'évaporateur de la PAC	$^{\circ}C$
$T_{source,in}$: Température du fluide à l'entrée de l'évaporateur de la PAC	$^{\circ}C$
$T_{load,out}$: Température du fluide à l'entrée du condenseur de la PAC	$^{\circ}C$
$T_{load,in}$: Température du fluide à la sortie du condenseur de la PAC	$^{\circ}C$
Q_{abs}	: Energie prélevée à la source	kW
$\dot{m}_{e,h}$: Débit massique du fluide à l'entrée du circuit de chauffage	$kg \cdot s^{-1}$
$\dot{m}_{e,c}$: Débit massique du fluide à l'entrée du circuit de rafraichissement	$kg \cdot s^{-1}$

NOMENCLATURE (suite)

Notation	Signification	unité
\dot{m}_{source}	: Débit massique du fluide du côté de l'évaporateur de la PAC	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
\dot{m}_{load}	: Débit massique du fluide du côté du condenseur de la PAC	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
$C_{p,eau}$: Chaleur massique de l'eau	$\text{kJ kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
$C_{p,source}$: Chaleur spécifique du fluide du côté de l'évaporateur de la PAC	$\text{kJ kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
$C_{p,load}$: Chaleur spécifique du fluide du côté du condenseur de la PAC	$\text{kJ kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
V_{zone}	: Volume de la zone d'échange dans le sol	m^3
y_{puits}	: Profondeur des forages	m
Nb_{puits}	: Nombre de forages	u
D	: Distance entre les forages	m

Table des matières

<i>Dédicaces</i>	<i>i</i>
<i>Citations</i>	<i>ii</i>
<i>Remerciements</i>	<i>iii</i>
<i>Résumé</i>	<i>iv</i>
ABSTRACT	<i>v</i>
<i>liste des abréviations</i>	<i>vi</i>
LISTE DES TABLEAUX	4
LISTE DES FIGURES	5
Introduction	7
I. Présentation du projet	8
I.1 Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC)	8
I.2 Contexte du projet BTESmart	9
I.3 Objectifs du stage	9
I.4 Présentation de la structure d'accueil	10
II. Etat de l'art	11
II.1 Généralités sur les installations géothermiques	11
II.1.1 Géothermie haute température	12
II.1.2 Géothermie basse température	12
II.2 Décharge thermique du sol	13
II.2.1 Le procédé GEOSOL	13
II.2.2 Le projet GEOHELIOS et le procédé SOLARGEOTHERM	15
II.2.3 Relation entre la surface de capteurs et la profondeur de forages	16
II.2.4 Synthèse	16
II.2.5 Stockage thermique sur aquifère	17
II.2.6 Stockage diffusif dans le sol	17
III. PRESENTATION DU BTESmart	18
III.1 L'installation	18

**MODELISATION D'UNE INSTALLATION INNOVANTE DE COUPLAGE DE CHALEUR SOLAIRE
GEOtherMIQUE**

III.2 Principe de fonctionnement du BTESmart	19
III.2.1 Fonctionnement en période hivernale.....	21
III.2.2 Fonctionnement en période estivale	22
IV. Modélisation de l'installation	24
IV.1 Présentation du logiciel TRNSYS	24
IV.2 Approche de la modélisation	25
IV.3 Modélisation du bâtiment sous TRNBUILD	25
IV.3.1 Hypothèses prises en compte dans la modélisation	25
IV.3.2 Résultats des simulations.....	29
IV.4 Estimation des besoins ECS	31
IV.5 Modélisation du système BTESmart	32
IV.5.1 Régulation du BTESmart	32
IV.5.2 Modélisation du circuit de production d'ECS	34
IV.5.3 Régulation du circuit de production d'ECS.....	34
IV.5.4 Modélisation du circuit de chauffage et de rafraîchissement.....	36
V. Résultats et discussions	41
V.1 Zone climatique et météo	41
V.2 Les différents scénarios modélisés	42
V.3 Modèle de production d'ECS	43
V.4 Modèle du sol soumis aux conditions climatiques	46
V.5 Modèle de chauffage géothermique	47
V.6 Modèle complet du BTESmart	49
V.7 Synthèse	52
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	53
Bibliographie	55
ANNEXES	57
Annexe I : Schéma de principe de la chaufferie	58
Annexe II : Caractéristiques des forages géothermiques	59
Annexe III : Fiche techniques des capteurs solaires thermiques (1)	60

**MODELISATION D'UNE INSTALLATION INNOVANTE DE COUPLAGE DE CHALEUR SOLAIRE
GEOtherMIQUE**

Annexe III : Fiche techniques des capteurs solaires thermiques (2) 61

Annexe IV : Fiche technique PAC..... 62

Annexe V : Fiche techniques des pompes : pompe P1 – côté évaporateur PAC 63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III-1 : Composition de la chaufferie	20
Tableau IV-1 : Coefficient d'échange des différentes parois	26
Tableau IV-2 : Inventaire des parois de la zone 2	27
Tableau IV-3 : Surface des baies vitrées	27
Tableau IV-4 : Estimation des apports internes des différentes zones.....	28
Tableau IV-5 : Puissance des équipements	28
Tableau IV-6 : Caractéristiques des circulateurs.....	32
Tableau IV-7 : Composition du modèle du CESI	34
Tableau IV-8 : Caractéristiques de la PAC	36
Tableau V-1 : Scénarios simulés du BTESmart.....	42

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Principe de fonctionnement d'une PAC	8
Figure I-2 : Schéma de principe du couplage solaire géothermique	9
Figure II-1 : Profil de température du sol – ville de Monterrey (Mexique) pour différentes saisons[5].....	11
Figure II-2 : Production d'électricité à partir de géothermie haute température [7].....	12
Figure II-3 : PAC sur échangeurs verticaux et horizontaux [9]	13
Figure II-4 : Evolution de la température du sol en fonction du temps [4].....	14
Figure II-5 : Echanges thermiques avec le sol pendant le fonctionnement de l'installation ...	14
Figure II-6 : Schéma de l'installation [6].....	15
Figure II-7 : Influence de la surface de capteurs sur la longueur du forage [13].....	16
Figure II-8 : Schéma de principe de stockage thermique sur aquifère.....	17
Figure III-1 : Vue du bâtiment sur Géoportail [14].....	18
Figure III-2 : Schéma simplifié des équipements techniques de chauffage.....	21
Figure III-3 : Fonctionnement du BTESmart en hiver	22
Figure III-4 : Fonctionnement du BTESmart en été	23
Figure IV-1 : Fonctionnement d'un TYPE sous TRNSYS : Exemple des capteurs solaires thermiques	24
Figure IV-2 : Zonage du complexe Vallin Fier.....	26
Figure IV-3 : Scénarios d'occupation des zones 9 et 10.....	29
Figure IV-4 : Evolution de la température du bâtiment sur année type (scénario 1)	29
Figure IV-5 : Evolution de la température du bâtiment sur année type (scénario 2)	30
Figure IV-6 : Diagramme d'inconfort en période estivale (scénario 2).....	30
Figure IV-7 : Besoins en chauffage et en rafraîchissement d'air neuf	31
Figure IV-8 : Contrôleur différentiel de température (TYPE 165)	33
Figure IV-9 : Principe de la répartition de la production solaire	33
Figure IV-10 : Modélisation du ballon ECS	35
Figure IV-11 : Profil de puisage ECS	36
Figure IV-12 : Coupe transversale d'un capteur vertical [9]	38
Figure IV-13 : Coupe horizontale d'un capteur vertical [7]	38
Figure IV-14 : Schéma simplifié des circuits de chauffage et de rafraîchissement	39
Figure V-1 : Température ambiante sur une année à Genève	41

Figure V-2 : Irradiance globale sur une année à Genève	42
Figure V-3 : Simulation en période hivernale	43
Figure V-4 : Simulation en période estivale.....	44
Figure V-5 : Evolution des températures des nœuds du ballon ECS	45
Figure V-6 : Evolution des températures d'ECS et à la sortie du ballon.....	45
Figure V-7 : Bilan énergétique (scénario 1).....	46
Figure V-8 : Evolution de la température du sol sur 10 ans de simulation	47
Figure V-9 : Comportement du BTESmart sans recharge thermique	48
Figure V-10 : Energie échangée avec le sol (scénario 2).....	49
Figure V-11 : Comportement du BTESmart avec recharge thermique.....	50
Figure V-12 : Energie échangée avec le sol (scénario 3).....	51
Figure V-13 : Evolution de la température du sol dans les 3 derniers scénarios	52

INTRODUCTION

Pour lutter contre le réchauffement de la planète, l'intégration des énergies renouvelables doit être encouragée dans l'approvisionnement énergétique en l'occurrence dans le secteur du bâtiment. Ce dernier est le deuxième poste le plus émetteur de gaz à effet de serre après le transport en France [2]. Les énergies renouvelables sont propres et respectueuses au regard de l'environnement. Elles sont supposées inépuisables, car se régénèrent au fil du temps, bien que l'intermittence soit un des problèmes majeurs auquel elles font face.

L'énergie solaire est celle qui se démarque dans cette famille car elle est la plus répandue et son abondance lui confère une attention particulière. En effet, elle est de plus en plus utilisée pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire dans le secteur du résidentiel, qui constitue 38%¹ de la consommation finale d'énergie en France. De plus, le poste de chauffage constitue 61,3% de la consommation énergétique moyenne dans ce secteur [1]. Mais, cette énergie est plus disponible en été alors que le besoin se manifeste le plus en hiver.

La chaleur du sous-sol est aussi une ressource qui peut être utilisée comme source de chaleur. Mais cette dernière est de nos jours sous-exploitée.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une étude de couplage de chaleur solaire et géothermique pour optimiser l'apport énergétique. L'inertie thermique du sol, relativement constante au cours de l'année sera à cet effet exploitée pour réaliser ce mix énergétique.

Pour ce faire, le document sera principalement structuré en cinq parties comme suit :

- Une première partie abordant la présentation générale du projet, les objectifs du stage et la structure d'accueil ;
- Une seconde partie présentant une synthèse bibliographique des installations de stockage thermique par le couplage solaire – géothermie ;
- Une troisième partie décrivant l'installation faisant office de l'étude ;
- Une quatrième partie dans laquelle sera faite la modélisation des différents éléments de l'installation ;
- Une cinquième partie consacrée à l'analyse des résultats obtenus.

¹ RTE, Bilan électrique 2020

https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/Bilan%20electrique%202020_0.pdf

I. PRESENTATION DU PROJET

I.1 Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC)

Une pompe à chaleur est une machine frigorifique, mais fonctionnant en mode chauffage. Elle est constituée d'un circuit fermé et étanche dans lequel le fluide frigorigène en circulation évolue entre des états liquide et gazeux selon l'organe qu'il traverse. Comme représenté sur la Figure I-1, ses organes principaux sont : le compresseur, le détendeur, le condenseur et l'évaporateur. Le principe de son fonctionnement est de transférer l'énergie d'un milieu froid (source froide) à un milieu chaud (source chaude). On parle de PAC réversible lorsque cette dernière peut en plus être utilisée pour extraire la chaleur d'un local et la rejeter à l'extérieur. Cette machine se caractérise par le coefficient de performance (COP) qui représente le rapport entre la puissance frigorifique ou calorifique produite et l'énergie électrique consommée.

Les deux phases d'échanges de chaleur ont lieu au niveau de l'évaporateur et au niveau du condenseur. D'une part, la chaleur provenant du sol est captée par l'évaporation du fluide frigorigène (évaporateur) qui capte l'énergie thermique du sol. Et d'autre part la chaleur est transférée au local à travers la condensation du fluide frigorigène (condenseur).

La particularité de la pompe à chaleur géothermique est qu'elle utilise comme source la chaleur du sous-sol. On distingue les PAC sur échangeurs verticaux et horizontaux, et les PAC sur nappes phréatiques.

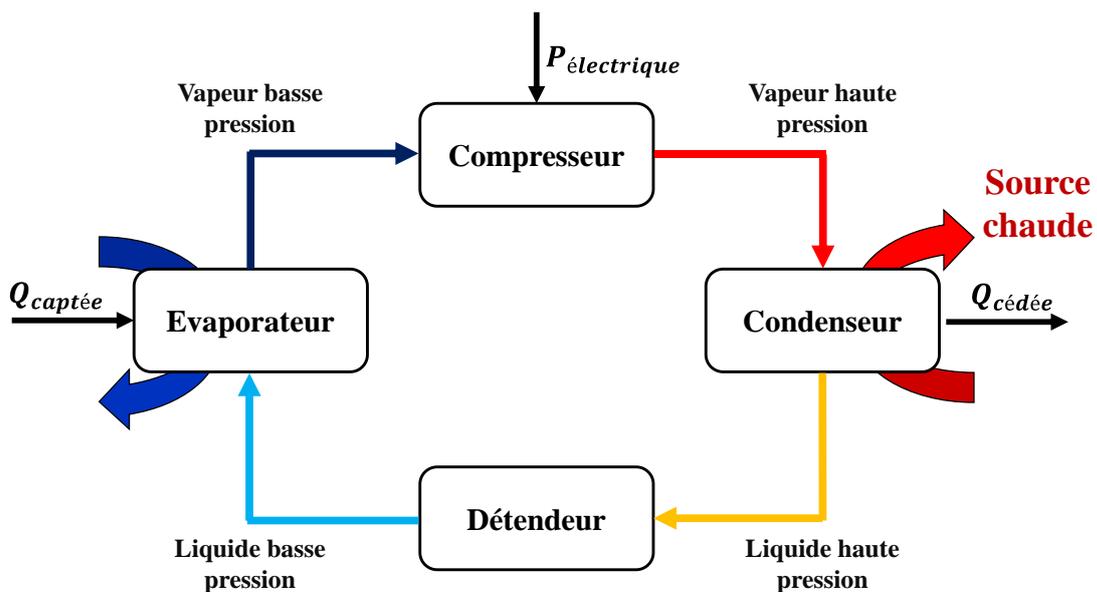


Figure I-1 : Principe de fonctionnement d'une PAC

I.2 Contexte du projet BTESmart

Ce travail rentre dans le cadre de la première phase du projet BTESmart ADEME 2017, en partenariat avec l'entreprise Storengy et la ville d'Annecy sur une période de trois ans, lancé en juin 2021.

En d'autres termes, il s'agit du complexe « Vallin-Fier » regroupant une école, un gymnase et une crèche. L'installation, par appellation BTESmart, a été initialement équipée d'une installation de géothermie constituée de sondes géothermiques verticales et d'une PAC. Cependant, il a été constaté une baisse de température moyenne du champ de sondes due à une forte sollicitation de l'installation (décharge thermique) [3].

Ainsi, ce projet fera l'objet d'une étude de couplage solaire – géothermie (Figure I-2) en injectant la production d'un champ de capteurs solaires thermiques sur un champ de sondes géothermiques. Ce potentiel servira à chauffer les bâtiments, produire de l'eau chaude sanitaire et contrer la décharge thermique du sol.

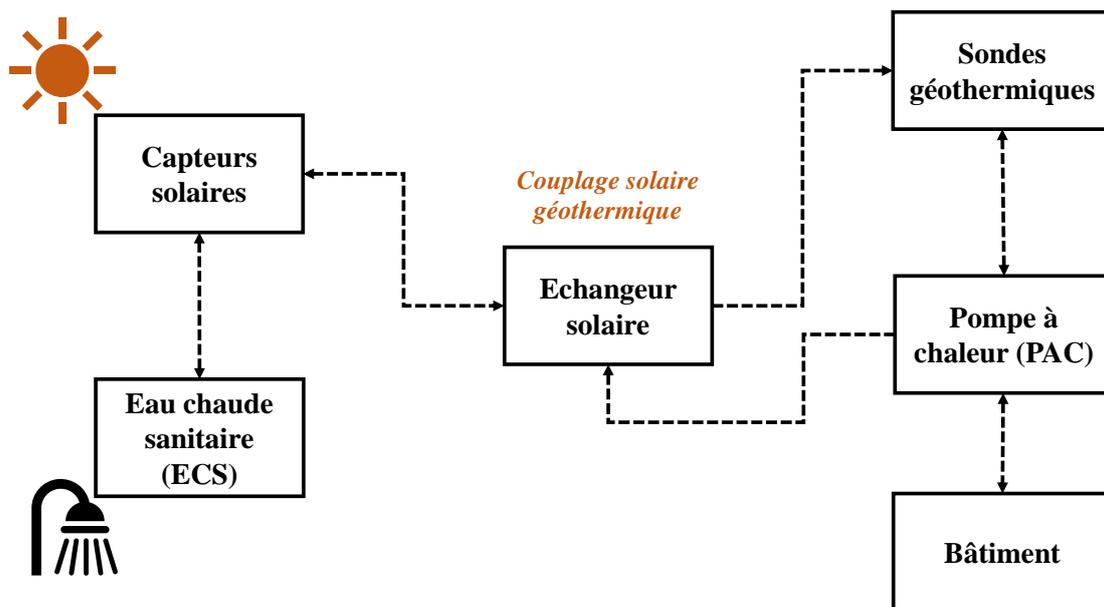


Figure I-2 : Schéma de principe du couplage solaire géothermique

I.3 Objectifs du stage

L'objectif global du travail est d'abord de modéliser dans son ensemble l'installation composée de :

- La chaufferie constituée d'une part du circuit de production d'eau chaude sanitaire (ECS). D'autre part, on retrouve le circuit de chauffage et de recharge thermique une pompe à chaleur ;

- Les bâtiments connectés (de façon simplifiée).

La modélisation servira ensuite à étudier le comportement du BTESmart à travers des simulations énergétiques dynamiques. Pour cette première partie du projet, le but essentiel est de parvenir à simuler le système dans son ensemble.

I.4 Présentation de la structure d'accueil

Le Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE), unité mixte de recherche **UMR 5271** – Université Savoie Mont Blanc et CNRS, oriente ses activités vers les domaines du bâtiment et énergie durable. Représentant l'Université Savoie Mont Blanc au sein de l'Institut National de l'Energie Solaire (INES), les activités du LOCIE sont regroupées en trois thèmes dont :

- **BASE** : Bati durable : Structure et Enveloppe ;
- **STEP** : Systèmes Energétiques et Procédés ;
- **SITE** : Systèmes et bâtiments Intégrés à la ville et aux Territoires.

Son effectif, d'environ une quatre vingtaine (80), est principalement constitué d'une part d'enseignants-chercheurs, de doctorants et post-doctorants et d'autre part de personnels techniques et administratifs [4].

II. ETAT DE L'ART

La géothermie se traduit par une augmentation graduelle de la température du sol en allant de plus en plus en profondeur. Son potentiel se traduit par la stabilité en température tout au long de l'année à une profondeur donnée (Figure II-1).

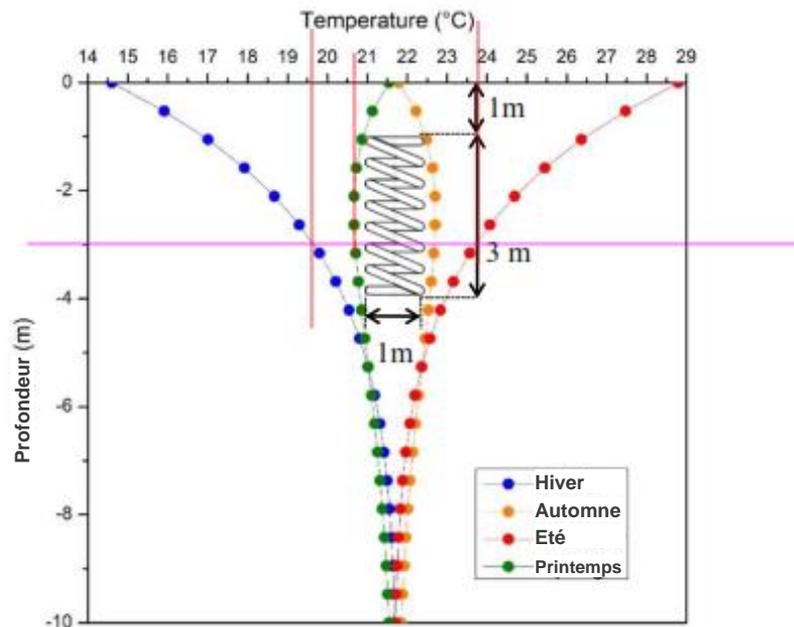


Figure II-1 : Profil de température du sol – ville de Monterrey (Mexique) pour différentes saisons[5]

L'objectif de cette revue de littérature a pour but d'une part de présenter quelques généralités sur les installations d'exploitation de la ressource géothermique. D'autre part, nous analyserons quelques travaux qui ont été réalisés afin d'identifier les sensibilités de ce système de couplage d'énergie.

II.1 Généralités sur les installations géothermiques

Selon le niveau de température et la géologie du milieu, on distingue la géothermie profonde ou « géothermie haute température » et la géothermie de surface « géothermie basse température ». Ses applications sont principalement : la production d'électricité, le chauffage et la production du froid à travers une PAC couplée à des capteurs enterrés. La production d'électricité nécessite des ressources à des niveaux de température importants (supérieur à 90°C) notamment dans les zones volcaniques. Pour le chauffage, les applications vont du chauffage de maisons individuelles au chauffage collectif à travers les réseaux de chaleur.

II.1.1 Géothermie haute température

Les usages de la géothermie profonde sont entre autres :

- L'exploitation des aquifères profonds pour alimenter directement les réseaux de chauffage ;
- La production d'électricité dans les zones volcaniques ;
- La production d'électricité et/ou de chaleur par cogénération dans les fossés d'effondrement.

Les gradients de température peuvent être de l'ordre de 10°C par 100 m voire plus à des niveaux de température dépassant 150°C [6]. Le circuit est essentiellement constitué d'un dispositif de captage (les forages), les centrales de production (électricité, chaleur) et le réseau de distribution (Figure II-2).

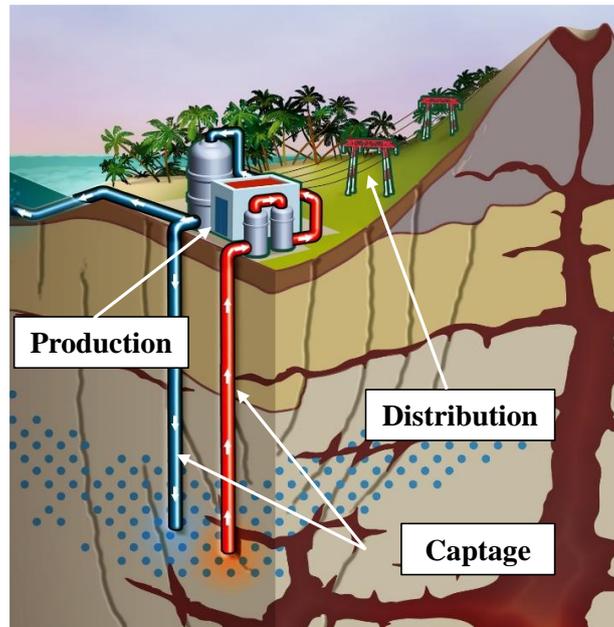


Figure II-2 : Production d'électricité à partir de géothermie haute température [7]

II.1.2 Géothermie basse température

La « géothermie basse température », regroupe l'ensemble des modes de valorisation de l'énergie géothermique proche du sol (jusqu'à 200 m). Une pompe à chaleur (PAC) géothermique est utilisée pour extraire la chaleur du sol par l'intermédiaire d'échangeurs de chaleurs verticaux ou horizontaux en fonction de la géologie du milieu (Figure II-3). Les températures d'exploitation sont comprises entre 12°C et 18°C [8]. La chaleur est extraite en faisant circuler dans un circuit en boucle fermée, un fluide caloporteur (eau glycolée) dans des

tubes en polyéthylène haute densité (PEHD) couplés aux échangeurs de chaleurs.

Ses applications vont du chauffage basse température (plancher chauffant, radiateurs) ou de production d'eau chaude sanitaire, à la production du froid ou au rafraîchissement de l'air.

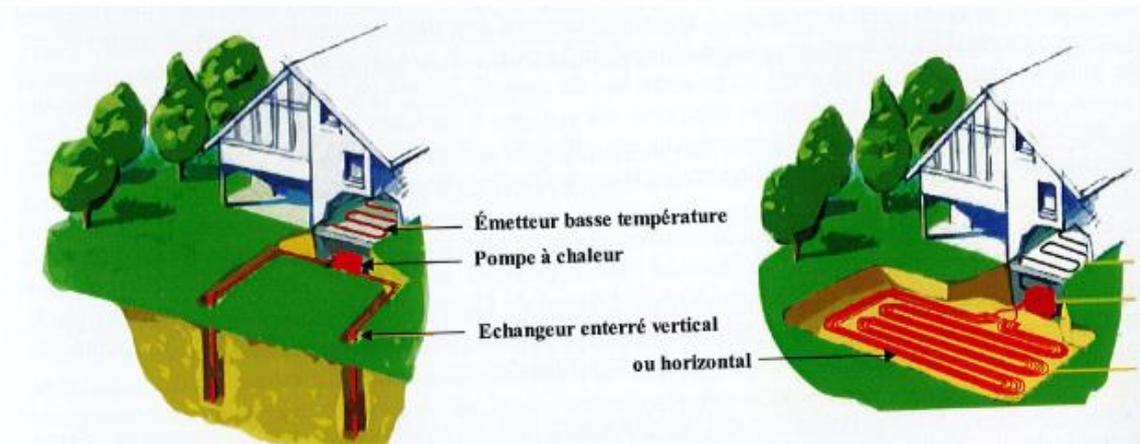


Figure II-3 : PAC sur échangeurs verticaux et horizontaux [9]

II.2 Décharge thermique du sol

La température du sol bien que constante dans le temps tend à baisser lorsqu'elle est exploitée sur une certaine période. Comme le stipule le contexte du projet BTESmart, il a été remarqué une baisse de la température du sol au fil du temps dû à une sollicitation importante de l'installation.

Le couplage des énergies, solaire thermique et géothermique comme illustré sur la Figure I-2 constitue ainsi une solution pour contrer le problème de décharge thermique du sol. Le champ solaire sera dimensionné afin qu'une partie de sa production serve à régénérer le potentiel thermique du sol. Cependant, ce système a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches que nous allons présenter dans cette partie.

II.2.1 Le procédé GEOSOL

V. Trillat-Berdal et al. ont mené une étude sur une installation constituée d'une PAC géothermique réversible (CIAT, 15,8 kW), de 12 m² de capteurs solaires thermiques et de 2 échangeurs verticaux (90 de long chacun). Appelé procédé GEOSOL, ce système est prévu pour subvenir aux besoins de chauffage, de rafraîchissement et de production d'eau chaude sanitaire d'une maison individuelle de 180 m² en Savoie (France).

Les résultats des simulations [10] révèlent qu'une diminution de la température du sol d'environ 2 °C a été constatée sur 20 ans de fonctionnement (Figure II-4).

MODELISATION D'UNE INSTALLATION INNOVANTE DE COUPLAGE DE CHALEUR SOLAIRE GEOtherMIQUE

Le COP de la PAC (fonctionnant entre 26 et 30°C) est amélioré grâce à un ballon de stockage intermédiaire en amont de celle-ci qui permet d'avoir en permanence une température assez élevée à l'entrée de l'évaporateur. On retient un ratio de $45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ de puissance fournie par les sondes géothermiques.

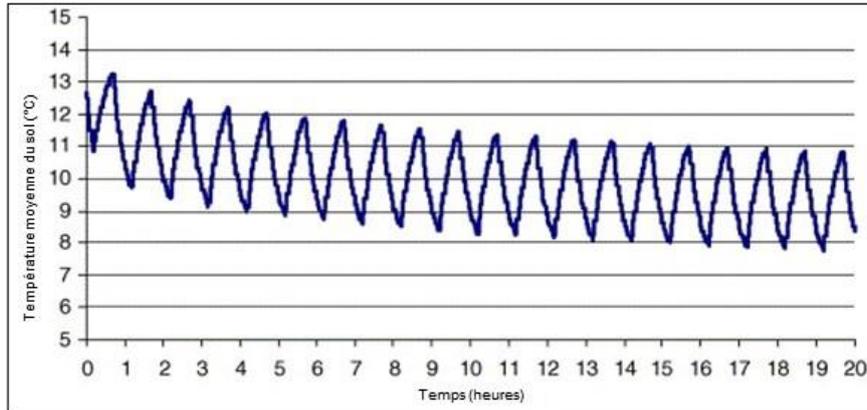


Figure II-4 : Evolution de la température du sol en fonction du temps [4]

Lors de l'étude expérimentale du procédé GEOSOL[11], le système de contrôle a été amélioré afin de limiter la consommation électrique en l'occurrence, celle des pompes. Après 11 mois de fonctionnement, on remarque sur la Figure II-5 que 6 253 kWh d'énergie est extraite du sol en mode chauffage contre 2 121 kWh introduite. Les temps de fonctionnement pour l'injection et l'extraction sont respectivement 838 h et 298 h.

En plus, c'est 34% de la chaleur introduite dans le sol qui est extraite avec une fraction solaire maximale de 68% pour l'ECS malgré le coefficient de déperditions excessif du ballon. Le COP de la PAC atteint une valeur moyenne de 3,75 en mode chauffage contre 2,6 pour une pompe fonctionnant en continu.

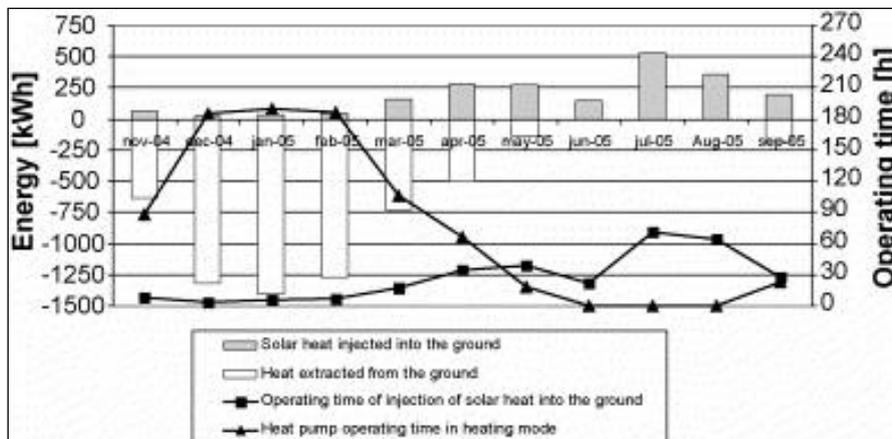


Figure II-5 : Echanges thermiques avec le sol pendant le fonctionnement de l'installation

II.2.2 Le projet GEOHELIOS et le procédé SOLARGEOTHERM

Julien NOU et al. ont travaillé sur un projet intitulé GEOHELIOS [12]. Implantée en région montagneuse au Sud de la France (commune de Saint-Pierre Dels Forcats) dans les Pyrénées Orientales, l'installation a pour vocation d'assurer le chauffage d'une maison individuelle par la combinaison des énergies solaire et géothermique. Le système est composé de 21,25 m² de capteurs solaires thermiques qui assurent la recharge thermique du sol, d'une PAC de 15 kW de puissance calorifique, 2 forages de 100 m et 100 m² de plancher chauffant basse température.

Le projet SOLARGEOTHERM [6] est implanté dans une carrière schiste à Montauriol (Pyrénées Orientales). Il est constitué d'un champ solaire de 42 m², 3 forages de 200 m de profondeur et un aérotherme servant de dissipateur de chaleur. Ce projet étant installation pilote, met en œuvre le stockage et le déstockage dans un massif rocheux de chaleur produite par un champ de capteurs solaires thermiques.

Ces deux projets ont en effet permis d'étudier à travers un système de contrôle et d'acquisition performant la gestion de la demande et l'offre de la chaleur tout en assurant le confort et les besoins de chauffage. Pour ce faire, le système hydraulique a été scindé en deux parties (Figure II-6) : (i) celui du système solaire (injection) et (ii) celui de la PAC (extraction). Le premier regroupe la liaison des capteurs solaires à un échangeur de chaleur et de ce dernier à la sonde. Le deuxième circuit concerne celui de l'extraction de la chaleur par la PAC pour alimenter le circuit de chauffage. Le forage constitue une zone tampon où la chaleur est stockée.

Il est important de noter que dans ce procédé les capteurs solaires ne participent pas directement au chauffage de la maison mais plutôt à la recharge thermique du sol.

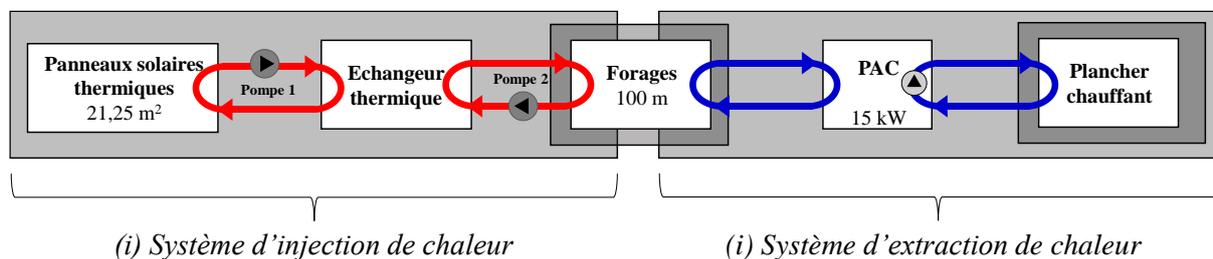


Figure II-6 : Schéma de l'installation [6]

II.2.3 Relation entre la surface de capteurs et la profondeur de forages

Chen et Yang [13] ont réalisé des simulations numériques sur une PAC géothermique assisté par des capteurs solaires thermiques dans différentes zones au nord de la Chine. L'objectif est de mettre en évidence l'influence des capteurs solaires sur la longueur des forages (Figure II-7). On remarque que le rapport entre la profondeur des forages et la surface des capteurs croît lorsque la surface des capteurs diminue et inversement. Le ratio de diminution de la profondeur des forages est de $4 \text{ m} \cdot \text{m}^{-2}$ lorsque la surface des capteurs évolue jusqu'à 20 m^2 . Une chute de ce ratio est remarquée quand les capteurs atteignent une surface de 40 m^2 avant de chuter à $4 \text{ m} \cdot \text{m}^{-2}$ à partir de 50 m^2 de capteurs. Par conséquent si on privilégie des forages à profondeur réduite, il faut que la surface de capteurs soit comprise entre 20 et 40 m^2 .

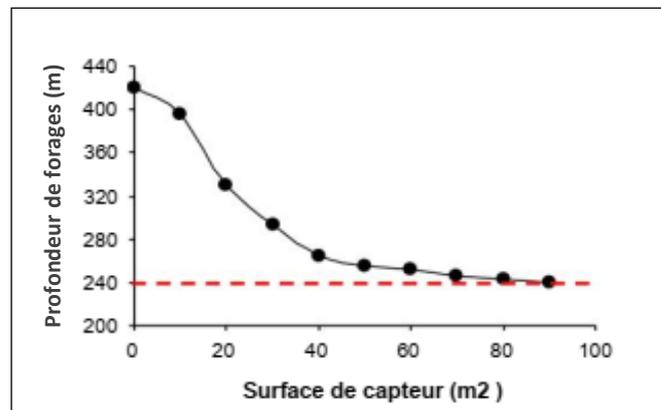


Figure II-7 : Influence de la surface de capteurs sur la longueur du forage [13]

II.2.4 Synthèse

Nous pouvons retenir comme synthèse :

- Une diminution de la température après une certaine période d'exploitation du sol sans recharger son potentiel. Cependant même en cas de renouvellement du potentiel thermique, on peut observer un abaissement de température s'il y a une différence entre les deux modes de fonctionnement, le soutirage et l'injection de calories.
- La nécessité de la mise en place d'un système de contrôle efficace. Ce dernier a une grande influence sur le rendement global.

Les éléments qui sont les plus sensibles dans le rendement de l'installation sont principalement les capteurs solaires et les forages. Mais, aucune règle de dimensionnement n'est encore disponible pour ce type de procédé hybride.

II.2.5 Stockage thermique sur aquifère

Le stockage thermique sur aquifère (Figure II-8) permet d'assurer un stockage saisonnier de chaleur à travers deux forages géothermiques (doublets). Le premier prélève l'eau à température élevée d'une aquifère profonde. Cette eau parcourt l'installation en cédant sa chaleur puis sera réinjectée vers l'aquifère par le deuxième forage. Les deux puits, respectivement appelés « puits chaud » et « puits froid », sont suffisamment éloignés pour retarder le recyclage de la source.

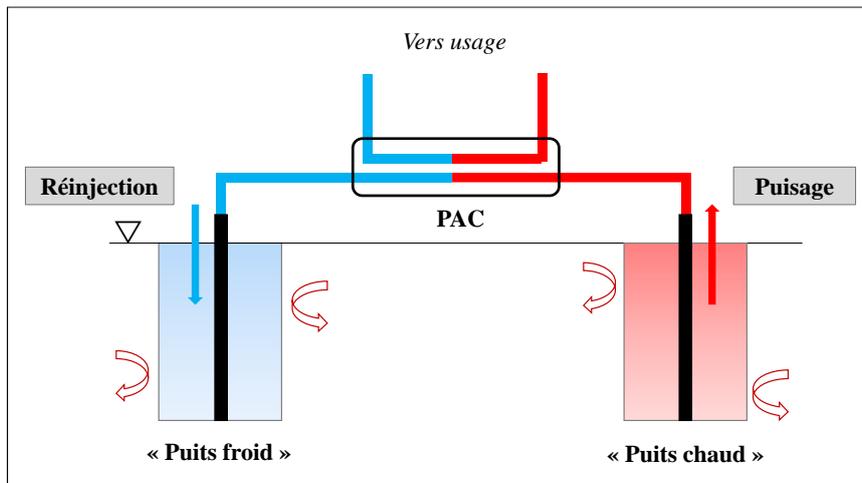


Figure II-8 : Schéma de principe de stockage thermique sur aquifère

II.2.6 Stockage diffusif dans le sol

L'inertie thermique du sol étant relativement constante dans le temps, le stockage diffusif dans le sol (contrairement à celui sur aquifère) est réalisé dans une même zone. Il s'agit de la mise en circulation en boucle fermée d'un fluide (eau glycolée) dans un forage muni d'échangeurs verticaux ou horizontaux (Figure II-3). En fonction des saisons, le sol est soumis à une décharge (hiver) ou recharge (été) thermique. La profondeur des puits peut aller jusqu'à 30 m pour les échangeurs horizontaux et jusqu'à 200 m pour les échangeurs verticaux. Une isolation thermique est réalisée pour réduire les échanges diffusifs avec les zones environnantes.

III. PRESENTATION DU BTESMART

Le complexe Vallin-Fier fait partie d'un écoquartier dans la ville d'Annecy. Bâti sur une surface d'environ 6 000 m² (Figure III-1), il est constitué :

- D'un bâtiment à deux niveaux : maternelle, crèche et restaurant au rez-de-chaussée, les salles de classes et les infrastructures communautaires au premier niveau ;
- D'une salle de sports ;
- D'une aire de récréation.

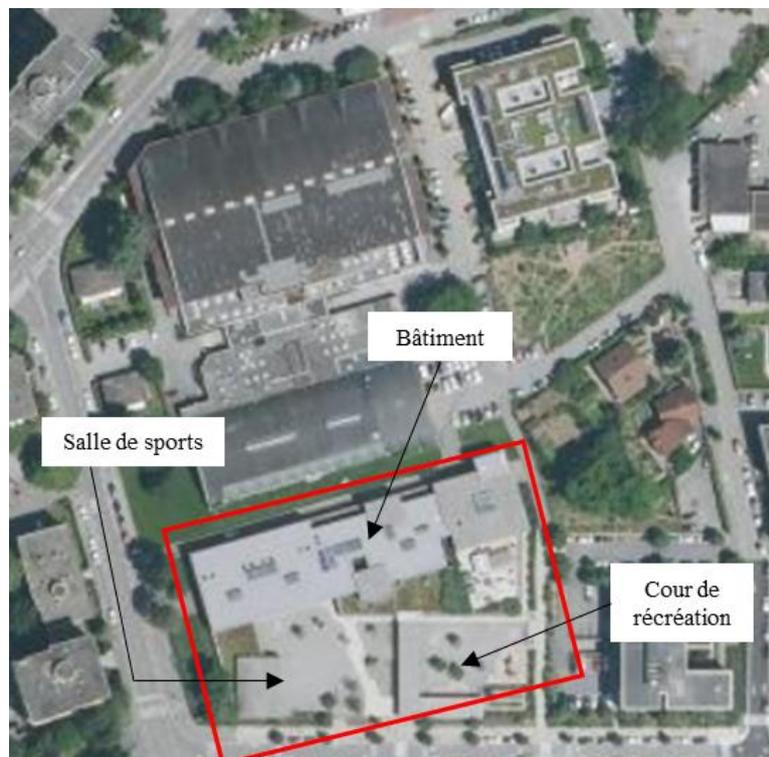


Figure III-1 : Vue du bâtiment sur Géoportail [14]

III.1 L'installation

Comme indiqué dans la partie I.2, le BTESmart a pour but de satisfaire les besoins de chauffage du bâtiment avec la production d'eau chaude sanitaire en hiver et le rafraîchissement de l'air neuf en été.

Le chauffage et le rafraîchissement du bâtiment sont assurés par une PAC géothermique sur 18 puits forés. En été, la PAC extrait la chaleur de l'intérieur des bâtiments pour la rejeter au sol (mode rafraîchissement) par l'intermédiaire de sept (07) centrales de traitement d'air (CTA). Elles sont de marque CIAT à double flux avec échangeur thermique réparties chacune

pour une zone du bâtiment. En hiver, la PAC extrait la chaleur emmagasinée dans le sol pour l'introduire dans les pièces à chauffer. La ventilation se fait à l'aide d'une huitième CTA qui alimente les autres en air neuf.

L'eau chaude sanitaire est fournie partiellement par les capteurs solaires thermiques et le complément assuré par l'appoint électrique.

L'injection de l'énergie dans le sol se fera en été et éventuellement en hiver en fonction de la régulation à travers un échangeur de chaleur.

Les fluides qui interviennent dans les échanges sont le R410a et l'eau glycolée (à 40%) respectivement dans la pompe à chaleur et dans le circuit de chauffage tandis que le circuit des sondes géothermiques est parcouru par de l'eau.

III.2 Principe de fonctionnement du BTESmart

Sur le schéma de la chaufferie (Figure III-2), on peut distinguer trois circuits principaux :

- Le circuit de production d'ECS (**I**) ;
- Le circuit de chauffage (**III**) ;
- Le circuit d'injection/extraction de la chaleur du sol (**II**).

L'ECS produite est stockée dans le ballon ECS d'un volume de 1 500 l muni d'un échangeur immergé. Un appoint électrique est également prévu lorsque la consigne de l'ECS n'est pas atteinte. Un bouclage ECS permet de lutter contre la prolifération des légionnelles. Ce sont des bactéries qui se développent dans des eaux douces et les sols humides. Les milieux favorables à leur développement sont les eaux stagnées ou à une température comprise entre 25 et 45 °C.

Les besoins de chauffage du bâtiment sont couverts par la PAC à travers le ballon tampon dans lequel est stocké le fluide (eau glycolée). Cette configuration permet de rajouter de l'inertie au circuit. Le fluide est ensuite distribué dans le bâtiment aux différents postes de chauffage qui sont : les batteries chaudes des centrales de traitement d'air (CTA), un plancher chauffant et des radiateurs.

La recharge thermique sera assurée par l'ajout de 60 m² de capteurs (78 m² au total, 18 m² étant prévus pour l'ECS) et les deux circuits (production solaire et injection au sol) sont connectés à travers l'échangeur solaire.

En ce qui concerne la régulation du système, les vannes V1, V2, V3 et V4 assurent la répartition du débit des fluides dans l'installation. La production solaire est répartie entre le

MODELISATION D'UNE INSTALLATION INNOVANTE DE COUPLAGE DE CHALEUR SOLAIRE GEOtherMIQUE

circuit ECS et celui du chauffage et de recharge par la vanne 3 voies V3. L'approvisionnement en chaleur du bâtiment est obtenu en faisant circuler le fluide (par la pompe P1) dans le sol tout en captant ses calories. A la sortie de la PAC, la vanne 3 voies V4 permet de retourner le fluide soit vers l'échangeur solaire soit vers le sol. En mode géocooling la pompe P2 assure la circulation du fluide dans les canalisations. La vanne V2 est fermée et V1 est ouverte en mode chauffage et vice versa en mode rafraîchissement.

Le Tableau III-1 présente les caractéristiques des équipements de l'installation.

Tableau III-1 : Composition de la chaufferie

Désignation	Marque/type	Caractéristiques
Capteurs solaires thermiques	VITOSOL/300 TM S3PC	Surface totale : 78 m ² 2 batteries de 9 m ² 5 batteries de 12 m ²
Préparateur ECS	VEYRET/Electrique	Volume de stockage : 1500 l
Pompe à chaleur	CIAT/PAC géothermique	Fluide : R410a Puissance de chauffage : 138,2 kW Puissance de climatisation : 102,2 kW COP : 3,84
Ballon tampon	VEYRET	Volume de stockage : 3000 l

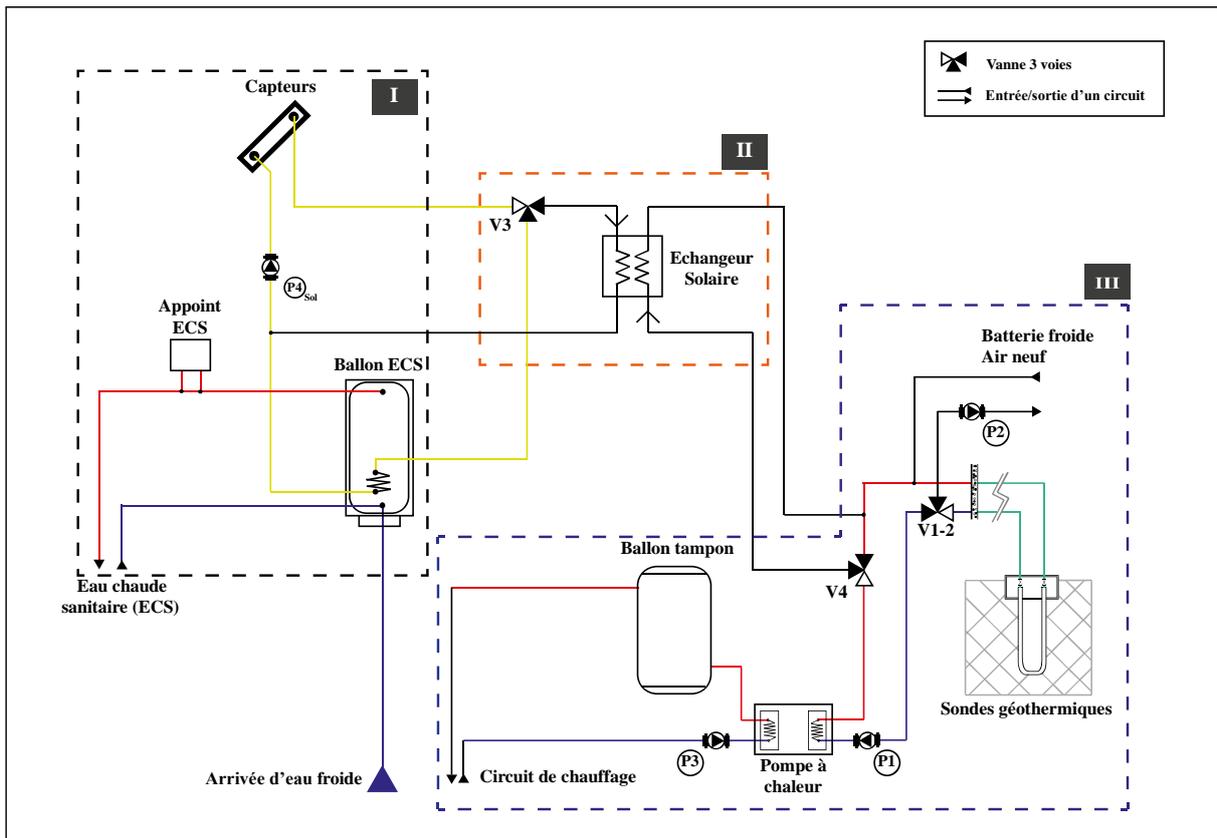


Figure III-2 : Schéma simplifié des équipements techniques de chauffage

III.2.1 Fonctionnement en période hivernale

La Figure III-3 illustre le fonctionnement du système en hiver :

- Lorsque le rayonnement solaire est abondant, les batteries de capteurs solaires assurent une partie de la production d'ECS et injectent le restant au sol à travers l'échangeur solaire. Le circuit de chauffage est desservi par la PAC en soutirant de la chaleur au sol et en faisant circuler en boucle fermée le fluide (eau glycolée) dans le circuit côté condenseur. En effet, ce fluide récupère de la chaleur au sol (plus chaud que le fluide) par l'intermédiaire des échangeurs géothermiques verticaux.
- En absence de rayonnement, le circuit de recharge thermique est bypassé. La PAC assure les besoins de chauffage en puisant l'énergie thermique du sol. Les besoins ECS sont couverts par l'appoint électrique.

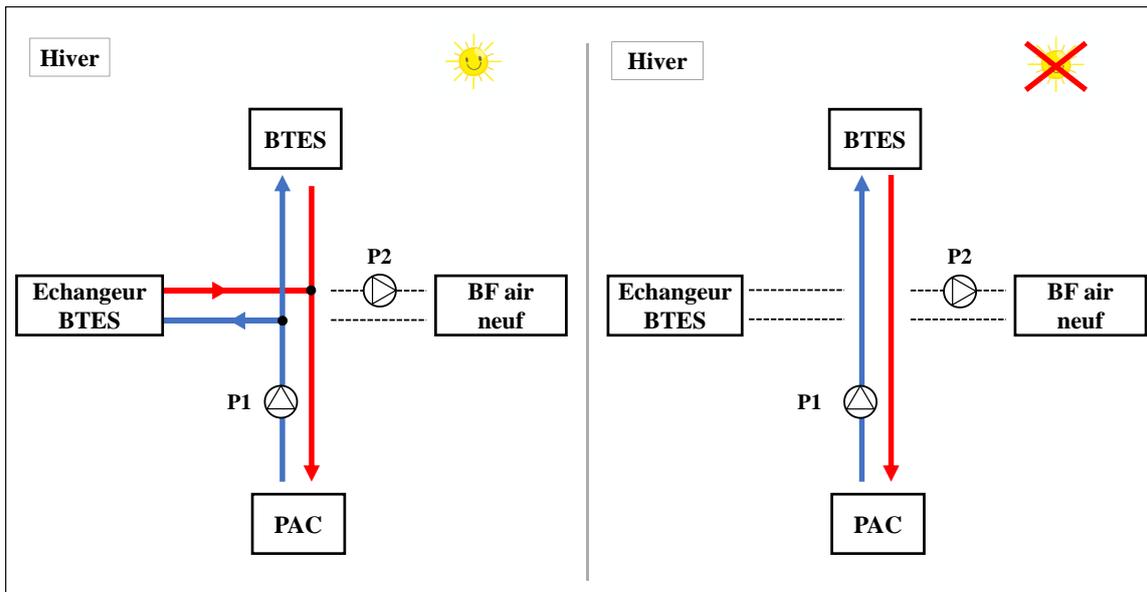


Figure III-3 : Fonctionnement du BTESmart en hiver

III.2.2 Fonctionnement en période estivale

La Figure III-4 présente le fonctionnement de l'installation en été :

- L'air neuf est rafraîchi par la batterie froide de la CTA avant son introduction dans le bâtiment, le fluide (plus chaud) cède sa chaleur en parcourant le sol et revient plus frais au bâtiment. Le mode rafraîchissement est mis à l'arrêt lorsque la température du fluide provenant du sol dépasse les 19 °C. Au même moment le champ solaire intervient dans la production ECS et achemine le surplus de production vers le sol lorsqu'il y a une abondance d'ensoleillement.
- Dans le cas contraire, seul le circuit de rafraîchissement de l'air neuf fonctionne et la recharge thermique par le solaire est bypassée.

MODELISATION D'UNE INSTALLATION INNOVANTE DE COUPLAGE DE CHALEUR SOLAIRE
GEOtherMIQUE

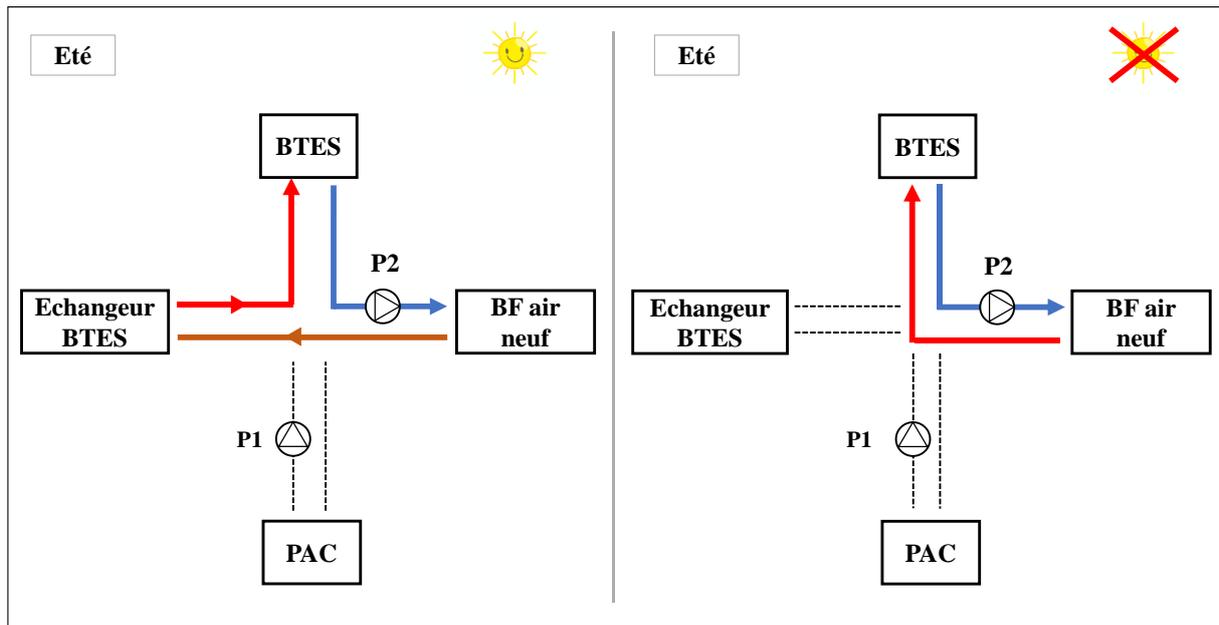


Figure III-4 : Fonctionnement du BTESmart en été

IV. MODELISATION DE L'INSTALLATION

IV.1 Présentation du logiciel TRNSYS

Le logiciel TRNSYS (**TR**AnSient **SY**stem Simulation program) proposé par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) est un outil de simulations énergétique et thermique dynamiques principalement utilisé dans le domaine des énergies renouvelables et du bâtiment. Il permet de modéliser des bâtiments et des systèmes énergétiques hybrides.

La simulation thermique dynamique permet de prédire des comportements énergétiques basés sur des changements de facteurs tels que la stratégie de contrôle de l'équipement, la construction du bâtiment et les sources d'énergies utilisées.

Son principe de fonctionnement est basé sur des modules appelés « TYPES ». Ces derniers (Figure IV-1) sont assemblés pour constituer le système modélisé. Les liens ainsi créés entre les modules définissent leurs interactions (entrées et sorties) et il revient à l'utilisateur de paramétrer les **types** afin de décrire le comportement désiré du système.

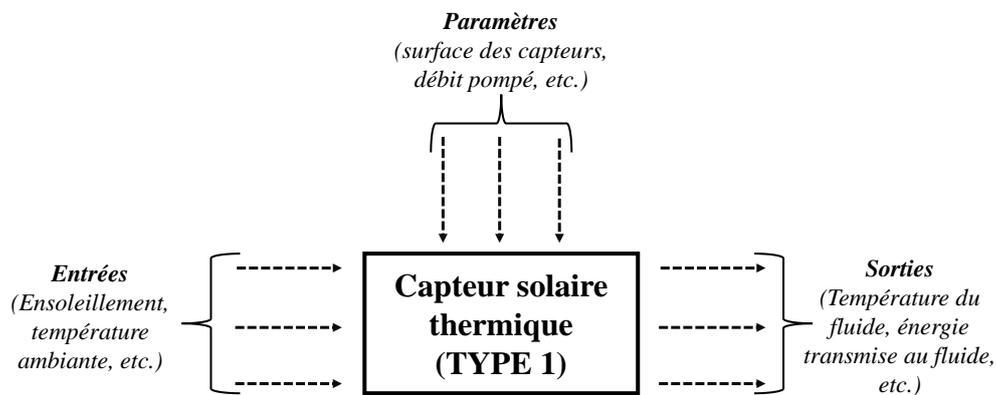


Figure IV-1 : Fonctionnement d'un TYPE sous TRNSYS : Exemple des capteurs solaires thermiques

L'outil TRNSYS comprend plusieurs interfaces parmi lesquelles on peut citer :

- **TRNBUILD** : qui permet de modéliser l'enveloppe du bâtiment et d'évaluer les besoins thermiques ;
- **Simulation STUDIO** : orientée système, cette interface permet de modéliser les systèmes énergétiques (solaire, Chauffage, ventilation, climatisation, etc.).

IV.2 Approche de la modélisation

La méthodologie adoptée pour modéliser le système du BTESmart est la suivante :

- Une première approche des besoins énergétiques décrivant la courbe de charge (chauffage et rafraîchissement) sera faite sur TRNBUILD et les besoins en ECS seront déterminés sur la base d'une consommation journalière définie par le projet ;
- Ensuite, on modélisera le système intégrant les différents circuits (production ECS, chauffage, etc.) sur Simulation STUDIO ;
- Et enfin, les deux modèles seront couplés pour apprécier le fonctionnement global de l'installation.

IV.3 Modélisation du bâtiment sous TRNBUILD

Ce travail a constitué la première tâche du projet. Elle a été réalisée en collaboration avec **Eric POLIDORI** et **Eliott VERDON**, tous les deux étudiants à Polytech Annecy – Chambéry. Nous avons collaboré sur ce travail car il constituait leur projet de recherche et développement (PRD), et moi la première partie de mon travail.

La modélisation du bâtiment est faite au préalable sous TRNBUILD et elle a pour but de quantifier les besoins en chauffage et en rafraîchissement de l'air neuf. Ces besoins seront ensuite extraits pour être utilisés afin de réaliser le couplage avec le système.

IV.3.1 Hypothèses prises en compte dans la modélisation

IV.3.1.1 Zonage du bâtiment

Le zonage du complexe Vallin Fier a été fait en fonction des paramètres suivants :

- L'occupation ;
- Les dimensions des pièces ;
- Les activités qui sont pratiquées (salle de classe, salle de sport, etc.).

Ainsi on retrouve la configuration présentée sur la Figure IV-2. La zone 1 représente le sous-sol qui est non chauffé. Les zones deux (2) à sept (7) constituent le rez-de-chaussée et les zones huit (8) à dix (10) le premier étage.

Les surfaces des différentes zones sont consignées dans le Tableau IV-4.

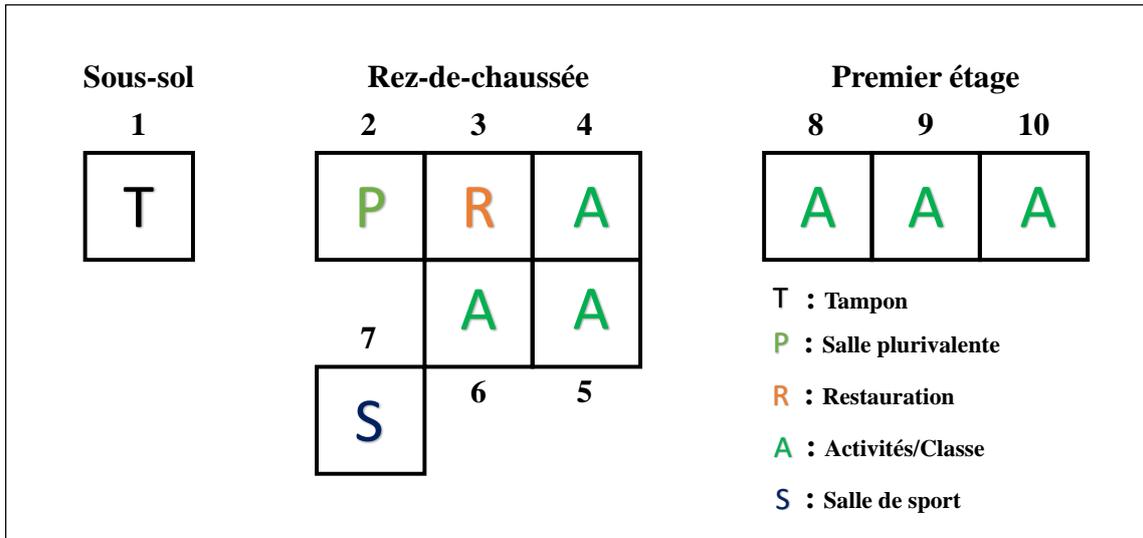


Figure IV-2 : Zonage du complexe Vallin Fier

IV.3.1.2 Consignes

Les consignes en température sont les suivantes :

- **Mode chauffage** : 20 °C en période d'occupation et 16 °C la nuit et le weekend ;
- **Mode rafraîchissement** : 19 °C comme consigne et 26 °C comme température d'inconfort en période d'occupation.

Pour estimer les besoins de chauffage, on paramètre une puissance de chauffage illimitée. Donc les puissances qui seront récupérées après les simulations seront celles qui permettront de satisfaire au mieux le besoin.

IV.3.1.3 Compositions des parois et des surfaces vitrées

Les données de construction du bâtiment (tirées du CCTP) nous renseignent sur la composition des différentes parois. Ce sont en total sept (7) types de parois qu'on retrouve parmi lesquelles : deux (2) types de planchers, un (1) pour la toiture et les quatre (4) restants concernent les murs (Tableau IV-1).

Tableau IV-1 : Coefficient d'échange des différentes parois

Paroi	Mur extérieur	Cloison intérieure	Porte extérieure	Porte intérieure
U ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	0,13	4,17	5	1,4

Pour chaque zone, on définira 4 parois suivant l'orientation et si la paroi est intérieure ou extérieure. Les proportions des surfaces des portes sont ensuite prises en compte dans la surface totale d'une paroi afin d'avoir une meilleure précision.

Un exemple de calcul de la zone 2 est présenté sur le Tableau IV-2.

Tableau IV-2 : Inventaire des parois de la zone 2

RDC	Zone 2			
Pondération de la paroi avec U Portes	Nord	Est	Ouest	Sud
Type de mur	Extérieur	Cloison	Extérieur	Extérieur
U_porte (W·m⁻²·K⁻¹)	1,4	5	1,4	1,4
U_mur (W·m⁻²·K⁻¹)	0,13	4,17	0,13	0,13
Surface porte (m²)	16,4	6,4	3,2	12,8
Surface mur (m²)	126	42	42	126
U_moyen (W·m⁻²·K⁻¹)	0,28	4,28	0,22	0,25

Pour les surfaces vitrées, une estimation a été faite en fonction des différentes orientations sur le Tableau IV-3.

Tableau IV-3 : Surface des baies vitrées

Orientation	Surface (m²)
Sud	216
Nord	207
Est	82
Ouest	78
Horizontal	75
TOTAL	658

IV.3.1.4 Renouvellement d'air

Une infiltration de 0,2 vol·h⁻¹ comme le préconise la réglementation thermique (RT 2012) sera considérée pour chaque zone.

La ventilation est assurée par 8 CTA avec un débit estimé à 13 664 m³·h⁻¹ pour une efficacité de récupération de 70% selon le CCTP. La modélisation sous TRNBUILD ne pouvant pas prendre en compte la récupération des CTA, le débit de ventilation (30%) sera réparti dans les différentes zones. La salle de sport et le réfectoire seront particulièrement plus ventilés car les activités sont plus denses dans ces dernières.

IV.3.1.5 Apports internes

Nous distinguons ici 3 postes de gains à savoir : l'éclairage, le métabolisme humain et les appareils :

- **Eclairage et lumière** : La moyenne pour les bâtiments à usage scolaire est de $8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. La régulation du système d'éclairage dépend de la lumière du jour et il sera en marche lorsque l'éclairement est en dessous de 600 lumens sinon il sera mis à l'arrêt.
- **Occupation** : Le Tableau IV-4 présente l'occupation par zone sauf la zone tampon (zone 1) qui n'est pas chauffée, on considère qu'une personne émet en moyenne 80 W.

Tableau IV-4 : Estimation des apports internes des différentes zones

Zone	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Surface (m ²)	432	336	408	765	630	360	432	336	408
Nb occupants	59	120	57	95	95	58	190	81	48
$\Phi \text{ (W}\cdot\text{m}^{-2}\text{)}$	11	29	11	10	12	13	35	19	9

- **Apport des équipements** : Les équipements qu'on retrouve dans le bâtiment sont principalement des appareils de bureautique et ceux pour la cuisson. Leur consommation est présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV-5 : Puissance des équipements

Désignation	Ordinateur	Projecteur	Imprimante	Four	Plaques cuisson
Puissance (W)	250	250	3 000	6 000	3 000
Nombre	54	34	2	2	2

IV.3.1.6 Scénarios d'occupation humaine

De façon générale, les locaux sont occupés du lundi au vendredi (profil hebdomadaire). Cependant, on aura un profil d'occupation journalier (Figure IV-3) propre à chaque zone en fonction de l'activité pratiquée.

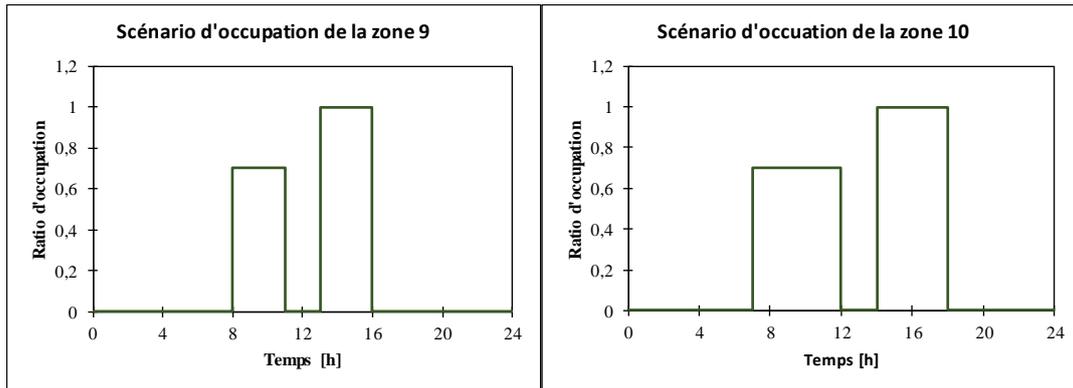


Figure IV-3 : Scénarios d'occupation des zones 9 et 10

IV.3.2 Résultats des simulations

IV.3.2.1 Evolution des températures du bâtiment

Plusieurs simulations ont été faites pour observer l'impact de chaque composante sur le profil de température du bâtiment. Néanmoins, nous allons présenter deux scénarios : le scénario 1 prenant en compte toutes les hypothèses ci-haut énoncées et le scénario 2 dans lequel on négligera les apports internes.

On remarque sur le scénario 1 (Figure IV-4), des températures relativement élevées dues aux apports internes non négligeables. En effet, cela est dû aux charges des équipements qui sont surestimées et le nombre d'heures d'inconfort atteint 1 077 h au RDC et 3 229 h au R+1.



Figure IV-4 : Evolution de la température du bâtiment sur année type (scénario 1)

L'évolution des températures du scénario 2 (Figure IV-5) nous montre que les températures sont moins élevées (toujours en dessous de 30°C) en ne prenant pas en compte les

MODELISATION D'UNE INSTALLATION INNOVANTE DE COUPLAGE DE CHALEUR SOLAIRE GEOtherMIQUE

apports internes. Ceci est logique car le bâtiment abrite un trafic important de personnes et de matériel conséquent. Le but de cette simulation est d'apprécier la période estivale qui correspond à la période des vacances scolaires.

On retrouve alors moins de 400 h d'inconfort au RDC et moins de 2 000 h au R+1 avec ce scénario (Figure IV-6).

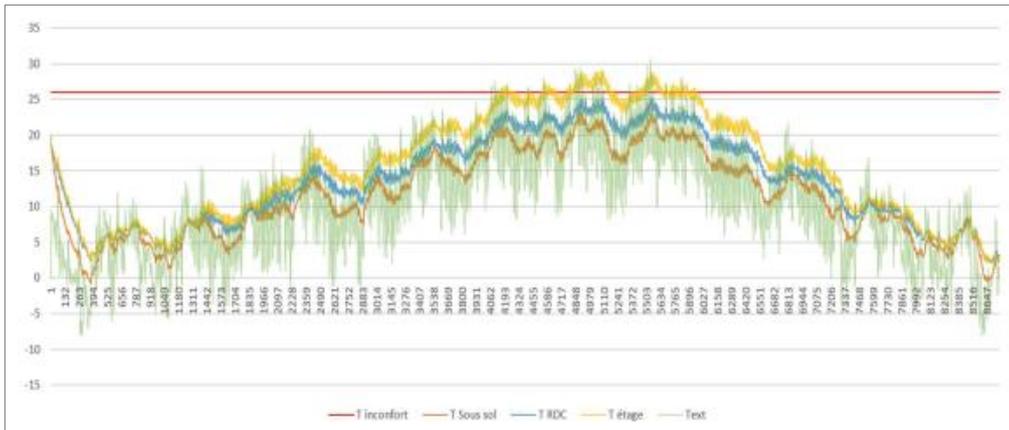


Figure IV-5 : Evolution de la température du bâtiment sur année type (scénario 2)

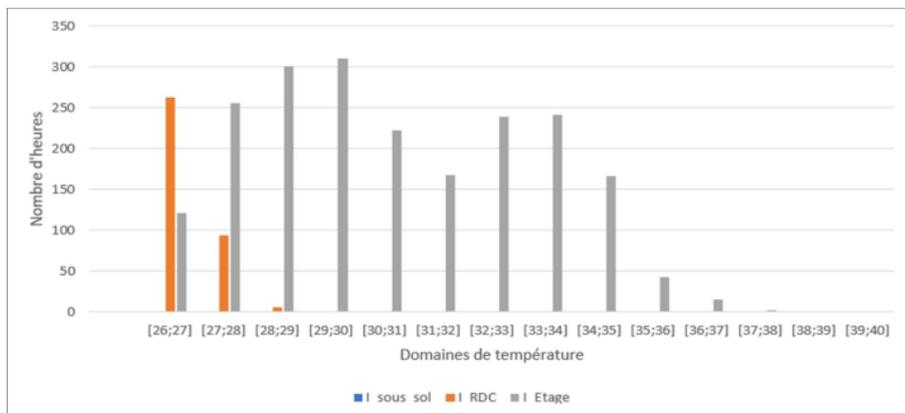


Figure IV-6 : Diagramme d'inconfort en période estivale (scénario 2)

IV.3.2.2 Besoins thermiques du bâtiment

Les besoins en chauffage ont été récupérés à partir des simulations du modèle du bâtiment sur TRNBUILD (pas de temps horaire).

Les besoins de rafraîchissement seront estimés à partir de la température ambiante de la zone en considérant une consigne de 24°C. On note :

$$P_{frigorique} = \frac{q_{CTA} * C_{v_{air}} * (T_{amb} - 24)}{1000} \quad (IV.1)$$

Avec :

$P_{frigorique}$: Puissance horaire de rafraîchissement [kW] ;

q_{CTA} : Débit des 7 CTA [$m^3 \cdot h^{-1}$] ;

Cv_{air} : Chaleur volumique de l'air [$Wh \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$] ;

T_{amb} : Température ambiante [$^{\circ}C$].

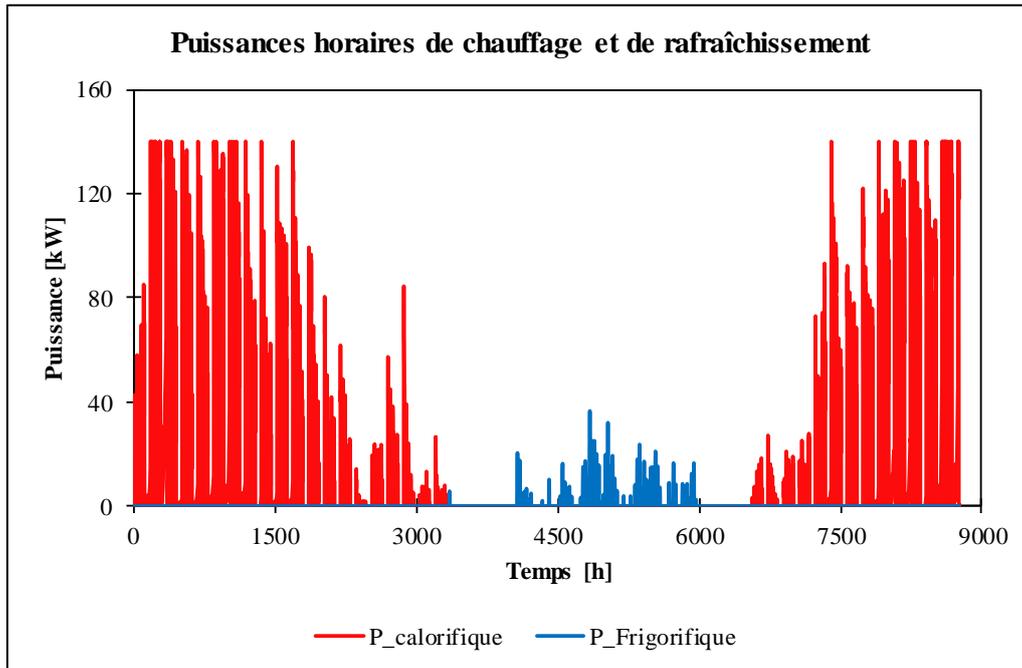


Figure IV-7 : Besoins en chauffage et en rafraîchissement d'air neuf

On a un besoin annuel en chauffage d'environ $16 \text{ kWh} \cdot m^{-2}$ (95,6 MWh) avec TRNBUILD contre 100 MWh de besoin réel.

Les besoins en rafraîchissements ont été estimés à 3,9 MWh par an. Néanmoins, ces besoins sont de très loin inférieurs à la réalité car le calcul ne prend en compte que la différence de température entre l'ambiance et l'environnement extérieur.

Pour l'appel en puissance on retrouve un maximum de 190 kW sans prendre en compte le besoin en ECS alors que la puissance installée est de 200 kW.

Pour la prochaine étape nous allons écrêter l'appel de puissance calorifique à 140 kW (Figure IV-7), correspondant à la puissance calorifique nominale de la PAC installée.

IV.4 Estimation des besoins ECS

Les besoins en ECS ne pouvant pas être estimés sur TRNBUILD, le cahier de charges préconise une consommation de $150 \text{ l} \cdot h^{-1}$ en période d'occupation (de 8h à 18h).

IV.5 Modélisation du système BTESmart

La méthodologie adoptée pour la modélisation est de réaliser d'abord le circuit de production d'ECS. Une fois que ce dernier est validé, on procèdera ensuite à la réalisation du circuit de chauffage et de rafraîchissement de l'air neuf. Enfin, ces deux modèles couplés seront associés aux besoins du bâtiment pour constituer le BTESmart.

IV.5.1 Régulation du BTESmart

IV.5.1.1 Inventaire des appareils de régulation

Le système est composé de pompes assurent la circulation des fluides et des vannes pour la répartition des débits. Le Tableau IV-6 donne un récapitulatif de l'ensemble des pompes intervenant dans la régulation.

La pompe P1 permet de faire circuler le fluide entre le sol et la PAC côté évaporateur. La pompe P2 permet de faire passer le fluide à travers la batterie froide pour le rafraîchissement de l'air avant son introduction dans le local. La pompe P3 fait circuler le fluide dans le réseau de distribution du côté condenseur de la PAC. La mise en circulation du fluide au sein du circuit de production d'ECS est assurée par la pompe P4_sol.

Tableau IV-6 : Caractéristiques des circulateurs

Désignation	Marque	Débit [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]
P1	WILO	21,5
P2		10,6
P3		25
P4_sol		-

IV.5.1.2 Régulation été/hiver

Connaissant les besoins du bâtiment, nous pouvons définir l'été comme la période pendant laquelle nous avons des besoins de chauffage et l'hiver correspondra à la période de demande en rafraîchissement de l'air.

IV.5.1.3 Répartition de la production solaire

La production est répartie par la vanne V3 (Figure III-2) entre le circuit de production d'ECS et celui de la recharge thermique en fonction des conditions de régulation. Le principe de ce contrôle est décrit sur la Figure IV-8.

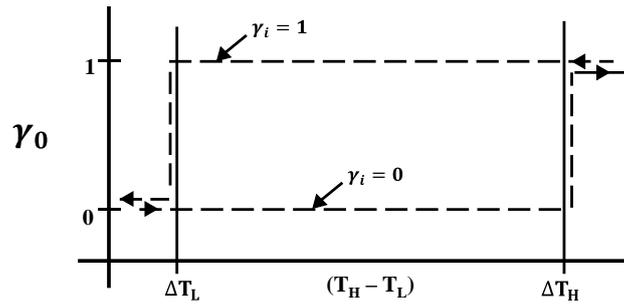


Figure IV-8 : Contrôleur différentiel de température (TYPE 165)

Le contrôleur est caractérisé par la différence entre la température à la sortie des capteurs solaires thermiques (T_H) et la température en bas du ballon ECS (T_L)

Les deux différentiels ΔT_H et ΔT_L représentent les seuils de mise à l'arrêt ou en marche du contrôleur. Ils sont respectivement fixés à 2°C et 5°C .

L'état du contrôleur dépend de la valeur de γ :

- Lorsque $(T_H - T_L)$ devient supérieur à ΔT_H , γ passe à 1, le contrôleur est en marche (ON) ;
- Lorsque $(T_H - T_L)$ devient inférieur à ΔT_L , γ passe à 0, le contrôleur est à l'arrêt (OFF).

En plus de cette condition, on comparera la température au premier nœud du ballon ECS à la consigne, qui est de 60°C . Ces deux conditions réunies vont constituer la consigne de répartition de la vanne V3 (Figure III-2).

Ainsi, si la consigne est vraie (indice 1) 20% de la production ira vers le ballon ECS et 80% vers l'échangeur solaire. Sinon (indice 0) 100% de la production sera destinée à la recharge thermique (Figure IV-9).

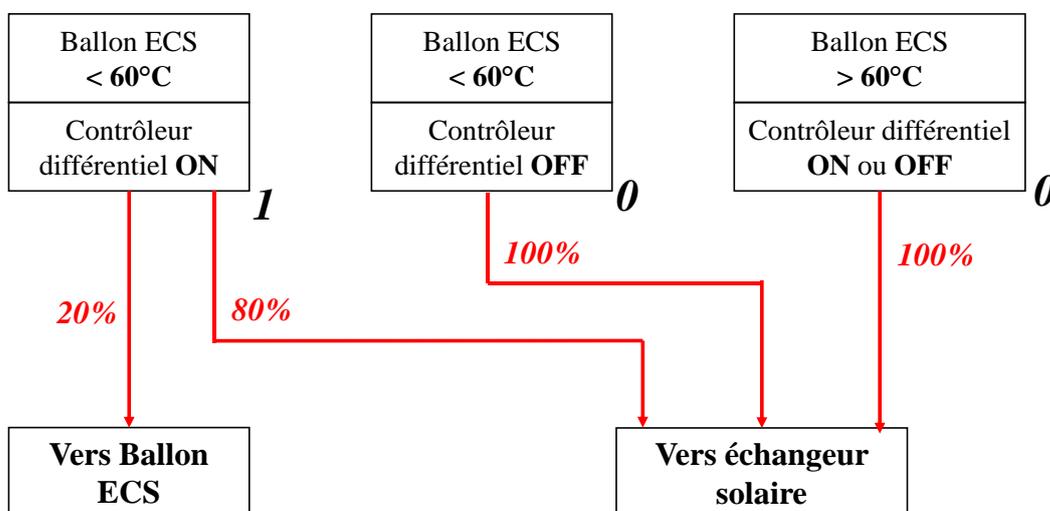


Figure IV-9 : Principe de la répartition de la production solaire

IV.5.2 Modélisation du circuit de production d'ECS

Le modèle réalisé sur TRNSYS correspond à un modèle de CESI (Chauffe-Eau Solaire Individuel). Son principe de fonctionnement consiste à chauffer l'eau contenue dans le ballon ECS par la mise en circulation du fluide caloporteur dans un échangeur immergé.

Les principaux composants et leurs caractéristiques sont renseignés sur le Tableau IV-7.

Tableau IV-7 : Composition du modèle du CESI

Désignation	Caractéristiques	Désignation sur TRNSYS
Capteurs solaires thermiques	Surface : 18 m² ⁽¹⁾, 78 m² ⁽²⁾ Débit : 75 l·h⁻¹ m⁻² ⁽¹⁾ 30 l·h⁻¹ m⁻² ⁽²⁾	TYPE 1b
Circulateur P4_sol	Débit : 1 350 l·h⁻¹ ⁽¹⁾ 2 340 l·h⁻¹ ⁽²⁾	TYPE 114
Ballon de stockage	Capacité : 1 500 l	TYPE 156
Appoint électrique	Puissance : 14,2 kW	TYPE 138

IV.5.3 Régulation du circuit de production d'ECS

La pompe P4_sol (Figure III-2) est régulée en fonction de la température à la sortie de capteurs (T_{s_Cap}) et celle à la sortie des sondes géothermiques (T_{s_BTES}). Le principe de régulation sera le même que celui décrit sur la Figure IV-8 avec :

- T_H : la température à la sortie de capteurs ;
- T_L : la température à la sortie de sondes géothermiques ;
- ΔT_H et ΔT_L respectivement fixés à 5°C et 2°C.

IV.5.3.1 Les capteurs solaires thermiques

On considère un modèle de capteurs solaires thermiques à tube sous vide de marque VITOSOL. Ils sont caractérisés par leur rendement qui dépend des coefficients a_0 , a_1 et a_2 .

On a :

$$\eta = a_0 - a_1 \times \frac{(T_e - T_{amb})}{I_T} - a_2 \times \frac{(T_e - T_{amb})^2}{I_T} \quad (IV.2)$$

¹ Modélisation de l'ECS seulement

² Modélisation du système complet

Avec :

η : le rendement des capteurs solaires thermiques ;

a_0 : le rendement maximal ;

a_1 : le coefficient des pertes optiques [$\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] ;

a_2 : le coefficient des pertes thermiques [$\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$] ;

T_e : la température d'entrée du fluide caloporteur [$^{\circ}\text{C}$] ;

T_{amb} : la température ambiante [$^{\circ}\text{C}$] ;

I_T : l'irradiation globale sur plan incliné [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$].

IV.5.3.2 Le ballon de stockage

Le modèle simulé (Figure IV-10) est celui d'un ballon de stockage dans lequel est stocké un fluide chauffé à partir d'un échangeur de chaleur immergé. Le réservoir est divisé en N nœuds pour modéliser le phénomène de stratification. Plus le nombre de nœuds est important, plus la stratification est réussie. Dans notre cas on considère 10 nœuds, la température au nœud 8 correspondra à celle qui servira à la régulation de P4_sol (température en bas du ballon).

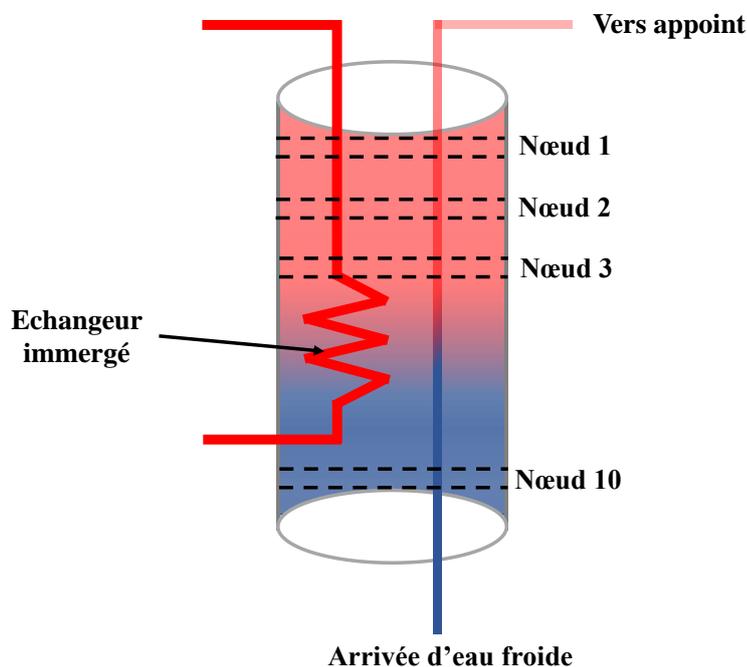


Figure IV-10 : Modélisation du ballon ECS

IV.5.3.3 Profil de puisage d'ECS

Le besoin journalier en ECS est de 1500 l en période d'occupation (150 l·h⁻¹ de 8h à 18h), la consigne étant de 60°C. Le profil de puisage implémenté sur TRNSYS est celui présenté sur la Figure IV-11. On considère comme température d'entrée du réseau d'eau froide 10 °C.

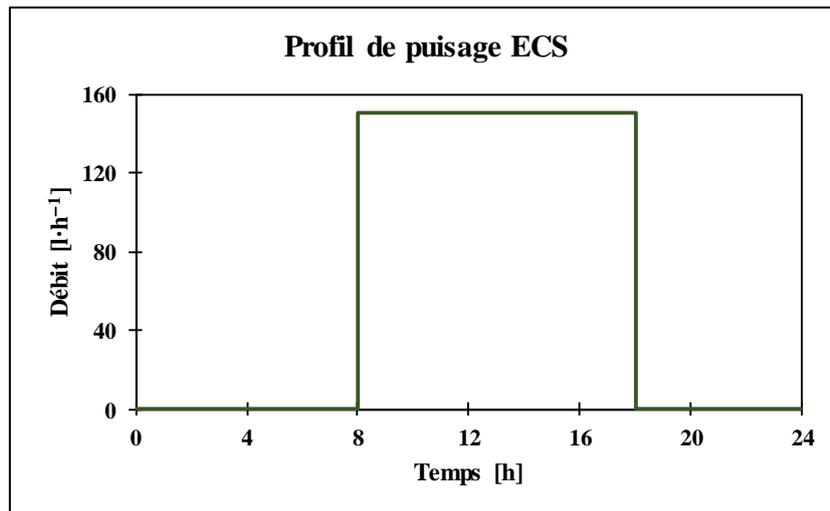


Figure IV-11 : Profil de puisage ECS

IV.5.4 Modélisation du circuit de chauffage et de rafraîchissement

IV.5.4.1 La PAC

On considère une PAC mono étagée d'une puissance nominale de 140 kW et d'une puissance électrique de 36 kW, ses caractéristiques sont présentées sur le Tableau IV-8.

Tableau IV-8 : Caractéristiques de la PAC

Puissance calorifique nominale (kW)		140	
Puissance électrique nominale (kW)		36	
Côté évaporateur (P1)		Côté condenseur (P3)	
Débit [kg·h⁻¹]	21 500	Débit [kg·h⁻¹]	25 000
Cp fluide (eau glycolée) [kJ·kg⁻¹·K⁻¹]	1 038	Cp fluide (eau) [kJ·kg⁻¹·K⁻¹]	1 000

Les performances de la PAC sont délicates à modéliser dans leur intégralité. Pour ce faire, un fichier de mesures de performances expérimentales réalisées par le fournisseur est nécessaire dans lequel on retrouve le couple ($T_{source,in}$, $T_{source,out}$) et le couple (Cap_h , P_h).

La PAC est caractérisée par son coefficient de performance (COP) qui est calculé à partir de la relation suivante :

$$COP = \frac{Cap_h}{P_h} \quad (IV.3)$$

Avec :

COP : le coefficient de performance de la PAC ;

Cap_h : le besoin calorifique du bâtiment au pas de temps considéré [kW] ;

P_h : la puissance électrique consommée par la PAC en mode chauffage [kW].

La puissance prélevée à la source (géothermie) est :

$$Q_{abs} = Cap_h - P_h \quad (IV.4)$$

On déduit les différentes températures des fluides du côté de la source et de la charge par les relations suivantes :

$$T_{source,out} = T_{source,in} - \frac{Q_{abs}}{\dot{m}_{source} * C_{p,source}} \quad (IV.5)$$

Avec :

T_{source,out} : la température du fluide à la sortie de l'évaporateur de la PAC (source) [°C] ;

T_{source,in} : la température du fluide à l'entrée de l'évaporateur de la PAC [°C] ;

Q_{abs} : l'énergie prélevée à la source [kWh]

ṁ_{source} : le débit massique du fluide du côté de l'évaporateur de la PAC [kg·s⁻¹] ;

C_{p,source} : la chaleur spécifique du fluide du côté de l'évaporateur de la PAC [kJ kg⁻¹·°C⁻¹].

$$T_{load,out} = T_{load,in} + \frac{Cap_h}{\dot{m}_{load} * C_{p,load}} \quad (IV.6)$$

Avec :

T_{load,out} : la température du fluide à l'entrée du condenseur de la PAC (charge) [°C] ;

T_{load,in} : la température du fluide à la sortie du condenseur de la PAC [°C] ;

ṁ_{load} : le débit massique du fluide du côté du condenseur de la PAC [kg·s⁻¹] ;

C_{p,load} : la chaleur spécifique du fluide du côté du condenseur de la PAC [kJ kg⁻¹·°C⁻¹].

IV.5.4.2 Les sondes géothermiques

Le modèle des échangeurs géothermiques considéré sur TRNSYS (Figure IV-12 et Figure IV-13) permet de modéliser un volume de stockage supposé homogène et de forme cylindrique. L'échange de chaleur (convectif en majorité) se fait par la mise en circulation du fluide caloporteur dans les échangeurs verticaux. Ce modèle considère une seule zone d'échange de chaleur avec le volume de stockage.

On dispose de 18 échangeurs verticaux (6*3 échangeurs en série) profonds de 100 m avec un diamètre de 0,15 m chacun. Les puits sont espacés entre eux de 6 m et leurs caractéristiques sont présentées en Annexe II : Caractéristiques des forages géothermiques.

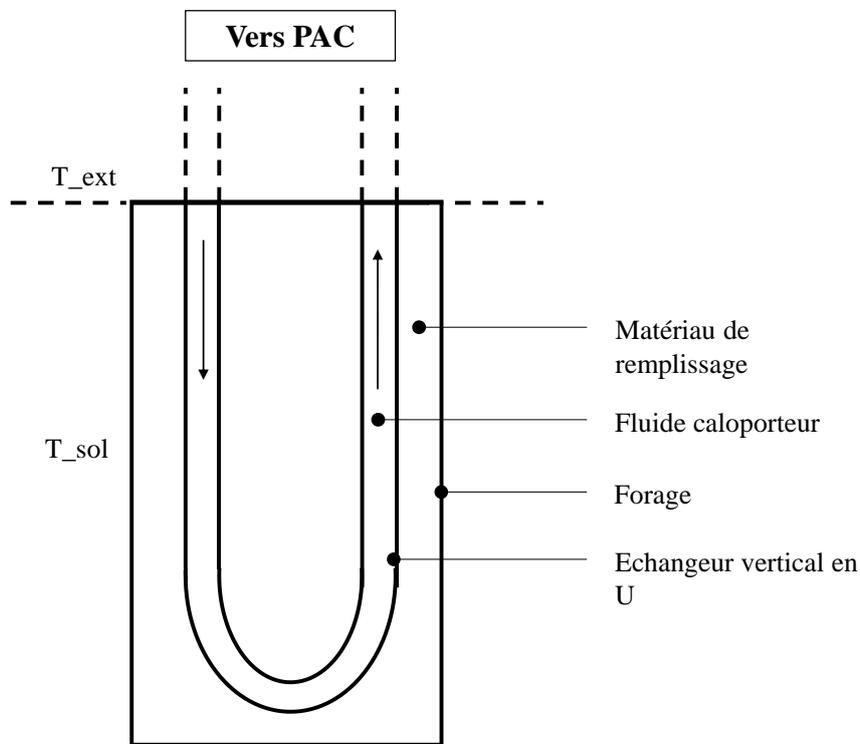


Figure IV-12 : Coupe transversale d'un capteur vertical [9]

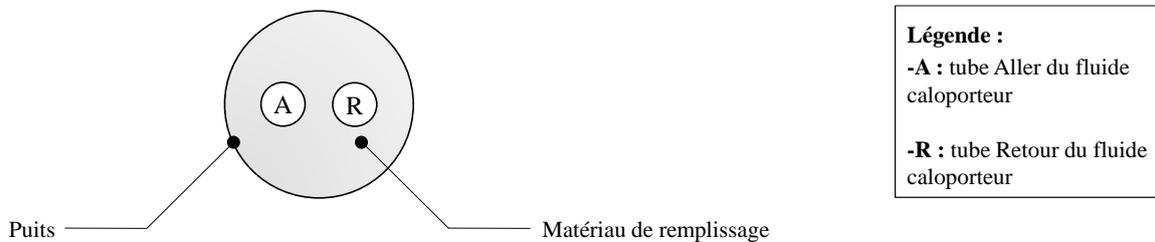


Figure IV-13 : Coupe horizontale d'un capteur vertical [7]

Le volume d'échange est calculé à partir de la relation suivante :

$$V_{zone} = y_{puits} * Nb_{puits} * \pi * (0,525 * D)^2 \quad (IV.7)$$

V_{zone} : le volume de la zone d'échange [m³] ;

y_{puits} : la profondeur des forages [m] ;

Nb_{puits} : le nombre de forages ;

D : la distance entre les forages [m].

IV.5.4.3 Le ballon de stockage d'eau chaude

On dispose d'un ballon de stockage à l'aval de la PAC. Il permet vient rajouter de l'inertie au circuit de chauffage en stockant l'eau chaude produite avant d'être distribuée dans le circuit de chauffage (radiateurs, planchers chauffant). Ses caractéristiques sont les mêmes que celles de l'ECS à la différence du volume qui est de 3 000 l.

IV.5.4.4 Le circuit de chauffage et de rafraîchissement

Les informations détaillées des circuits de chauffage et de rafraîchissement étant indisponibles, on modélisera ces derniers de façon simplifiée comme présenté sur Figure IV-14.

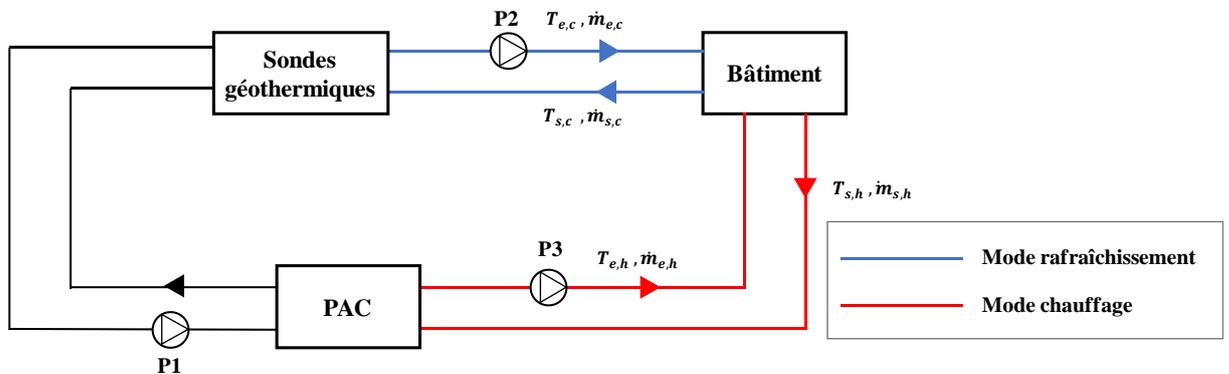


Figure IV-14 : Schéma simplifié des circuits de chauffage et de rafraîchissement

Connaissant la température et le débit du fluide en mode chauffage et en mode rafraîchissement, on pourra déterminer la température de retour du fluide.

On sait que :

$$P_{calo} = \dot{m}_{e,h} * C_{p,eau} * (T_{e,h} - T_{s,h}) \quad (IV.8)$$

On déduit la température à la sortie du circuit en mode chauffage :

$$T_{s,h} = T_{e,h} - \frac{P_{calo}}{\dot{m}_{e,h} * C_{p,eau}} \quad (IV.9)$$

De même on déduit la température de sortie du fluide en mode rafraîchissement :

$$P_{frigo} = \dot{m}_{e,c} * C_{p,eau} * (T_{s,c} - T_{e,c}) \quad (IV.10)$$

$$T_{s,c} = \frac{P_{frigo}}{\dot{m}_{e,c} * C_{p,eau}} + T_{e,c} \quad (IV.11)$$

Avec :

P_{calo} : le besoin en chauffage [kW] ;

$\dot{m}_{e,h}$: le débit massique du fluide à l'entrée du circuit de chauffage [kg·s⁻¹] ;

$C_{p,eau}$: la chaleur massique de l'eau [kJ kg⁻¹ °C⁻¹] ;

$T_{e,h}$: la température du fluide à l'entrée du circuit de chauffage [°C] ;

$T_{s,h}$: la température du fluide à la sortie du circuit de chauffage [°C] ;

P_{frigo} : le besoin en rafraîchissement [kW] ;

$\dot{m}_{e,c}$: le débit massique du fluide à l'entrée du circuit de rafraîchissement [kg·s⁻¹] ;

$T_{s,c}$: la température du fluide à la sortie du circuit de rafraîchissement [°C] ;

$T_{e,c}$: la température du fluide à l'entrée du circuit de rafraîchissement [°C].

V. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Cette partie sera consacrée à la présentation des résultats issus des différentes modélisations précédemment réalisées.

V.1 Zone climatique et météo

La ville d'Annecy (Haute Savoie) se trouve dans la zone climatique H1c (zone froide). Néanmoins, le cahier de charge définit comme données météo à utiliser celles de Genève (CH-Geneve-Cointrin-67 000). Ce sont des données météo génériques fournies par le logiciel TRNSYS. Elles comprennent les informations sur l'ensoleillement de la zone, la vitesse du vent, la température ambiante pour ne citer que ces dernières.

Sur les figures Figure V-1 et Figure V-2 sont respectivement représentés l'ensoleillement et le profil de la température ambiante de la zone considérée.

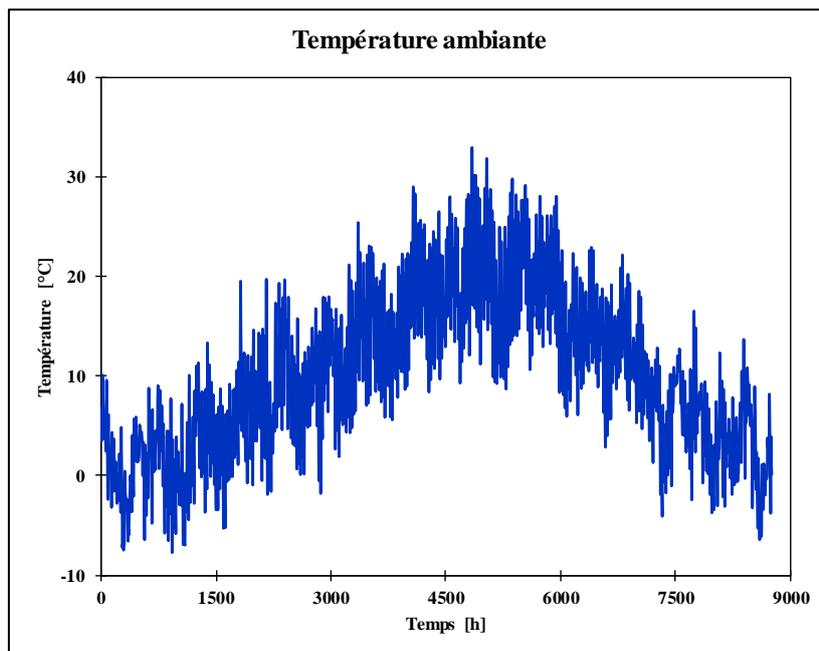


Figure V-1 : Température ambiante sur une année à Genève

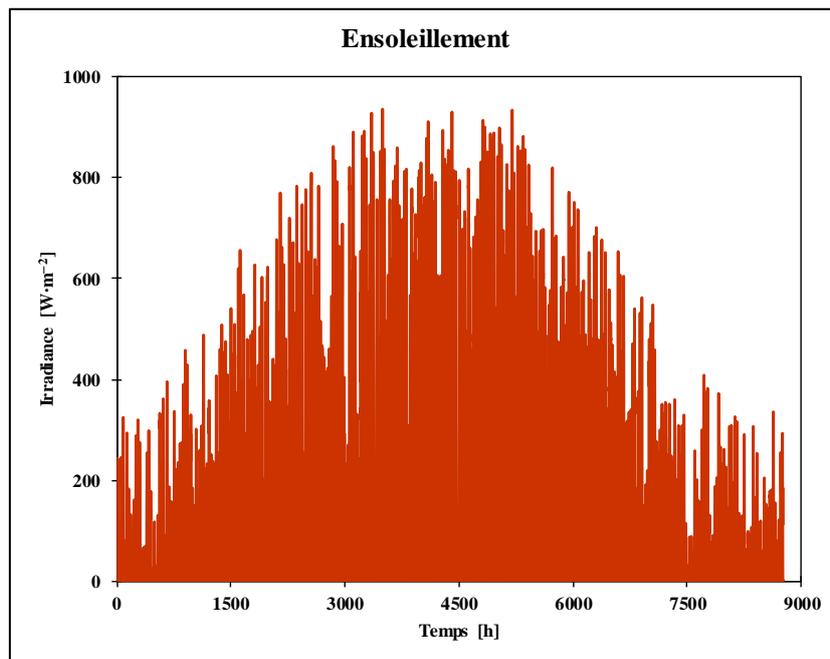


Figure V-2 : Irradiance globale sur une année à Genève

V.2 Les différents scénarios modélisés

Pour mieux apprécier le comportement du BTESmart, nous allons simuler quatre (4) différents scénarios, le pas de temps de simulation étant d'une heure. Les détails des scénarios simulés sont présentés sur le Tableau V-1 : Scénarios simulés du BTESmart.

Tableau V-1 : Scénarios simulés du BTESmart

Scénarios	Désignation	Description
1	Production ECS	Mise en évidence du circuit de production ECS
2	Sol soumis aux conditions climatiques	Mise en évidence de la réponse des sondes géothermiques
3	Chauffage/rafraîchissement sans recharge thermique	Capacité des sondes à satisfaire le besoin
4	BTESmart	Modèle complet avec recharge thermique

V.3 Modèle de production d'ECS

Nous avons dans un premier temps simulé indépendamment le circuit de production d'ECS afin de le valider. On rappelle que le modèle simulé est similaire à celui d'un chauffe-eau solaire individuel (CESI).

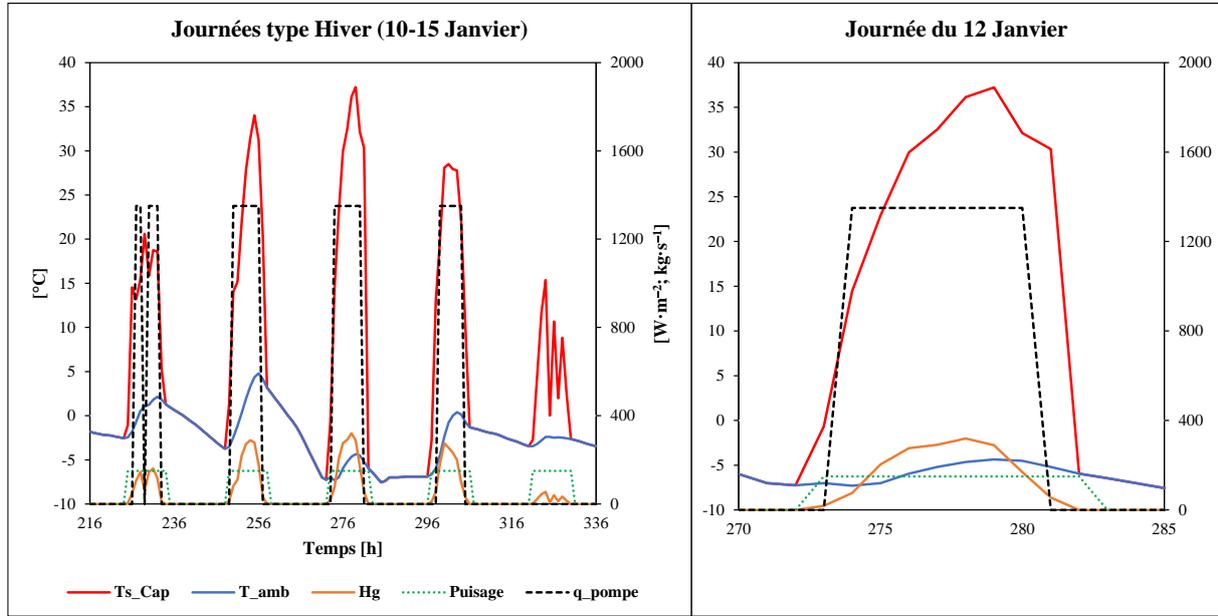


Figure V-3 : Simulation en période hivernale

La Figure V-3 présente le comportement du circuit de production ECS sur cinq (5) journées type **hiver** et un zoom sur une journée.

Le fonctionnement de la pompe dépend de l'ensoleillement. La pompe se met en marche lorsque l'ensoleillement devient de plus en plus important et que la condition de mise en route de la pompe est vérifiée. Elle s'arrête en fin de journée lorsque la condition de mise à l'arrêt est vérifiée ou lorsque l'ensoleillement n'est pas suffisant pour chauffer le fluide caloporteur. On remarque pour les journées moins ensoleillées ou nuageuses des pics de marche et d'arrêts de la pompe.

La température de sortie des capteurs évolue avec l'ensoleillement et est sensiblement égale à la température ambiante à l'arrêt du système.

En hiver le puisage commence très souvent avant le fonctionnement de la pompe. En effet, l'ensoleillement commence à être abondant après le début du puisage (8h le matin), et c'est ce qui explique la forte sollicitation de l'appoint pendant cette période.

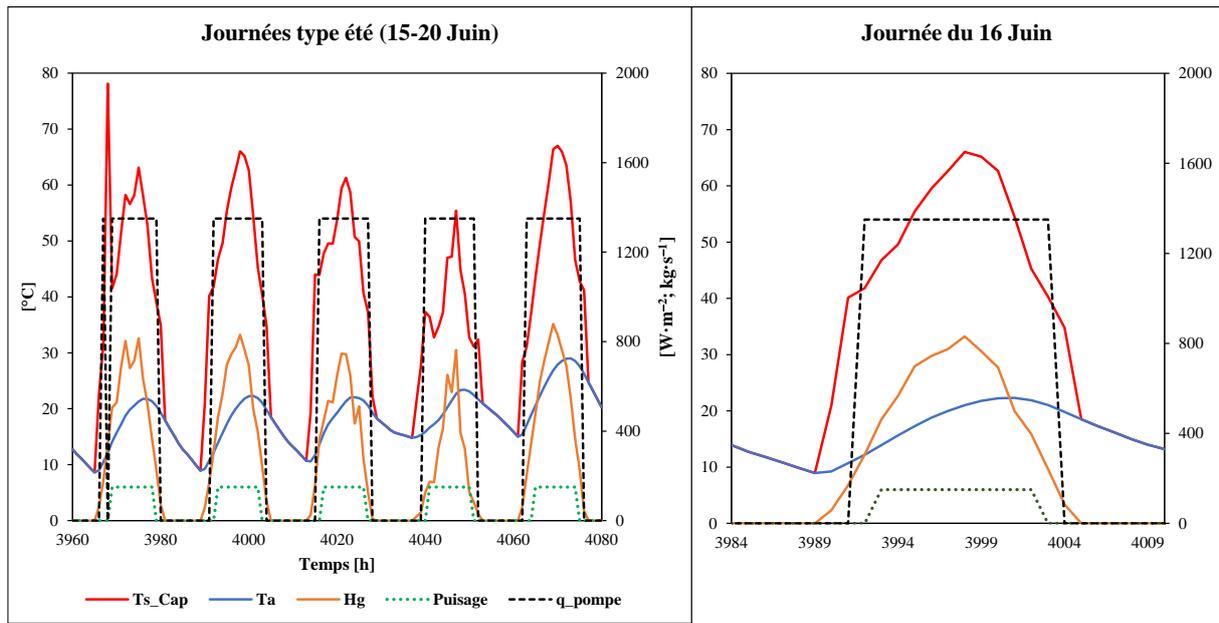


Figure V-4 : Simulation en période estivale

La Figure V-4 présente le comportement du circuit de production ECS sur cinq (5) journées type **été** et un zoom sur une journée.

Le fonctionnement de la pompe est le même que précédemment mais elle fonctionne pendant presque tout le temps d'ensoleillement, le ciel étant généralement dégagé.

On remarque des températures de sortie de capteurs est assez élevées en été (de l'ordre de 65 °C).

On assiste ici à une compatibilité entre la demande et la production contrairement à la période hivernale, l'appoint est ainsi moins sollicité.

Stratification du ballon

Sur la Figure V-5, on peut observer la stratification du ballon à travers l'évolution des températures aux dix (10) nœuds.

On remarque que les trois (3) premiers nœuds (Tn-1 à Tn-3) ont pratiquement la même évolution et sont proches de la température en haut du stockage. Les températures du 4^{ème} au 9^{ème} nœud sont influencées par l'ensoleillement. En effet, c'est la zone qui abrite l'échangeur de chaleur entre le fluide caloporteur et l'eau contenue dans le ballon. L'allure de la température en bas du ballon (nœud 10) est pratiquement celle d'entrée d'eau froide (autour de 10 °C).

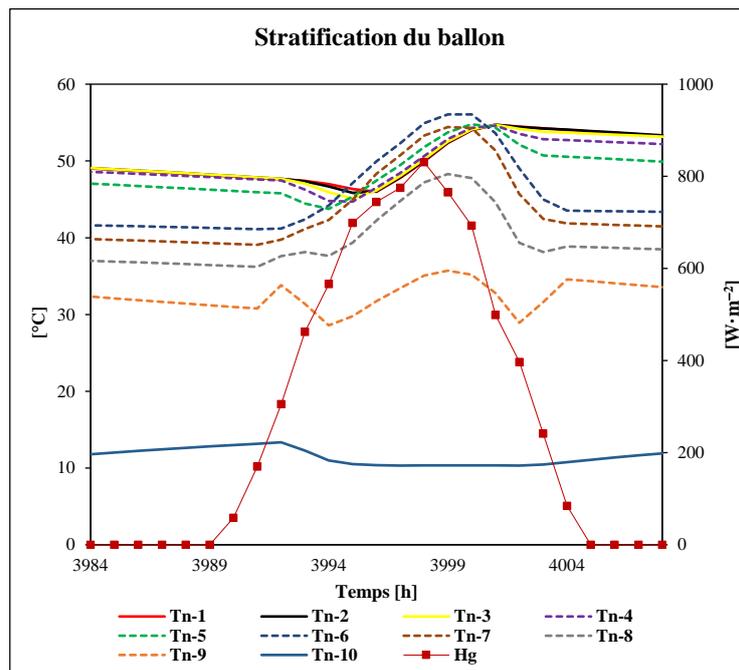


Figure V-5 : Evolution des températures des nœuds du ballon ECS

Bilan d'une année de fonctionnement

La Figure V-6 présente l'évolution de la température à la sortie du ballon ECS (TH_Bal) et celle à la sortie de l'appoint électrique (T_ECS).

On remarque que pendant l'hiver on a des températures relativement faibles avec un minimum de 8,6 °C. A la différence de la période hivernale, nous avons en été des températures assez élevées avec un maximum de 63,23 °C.

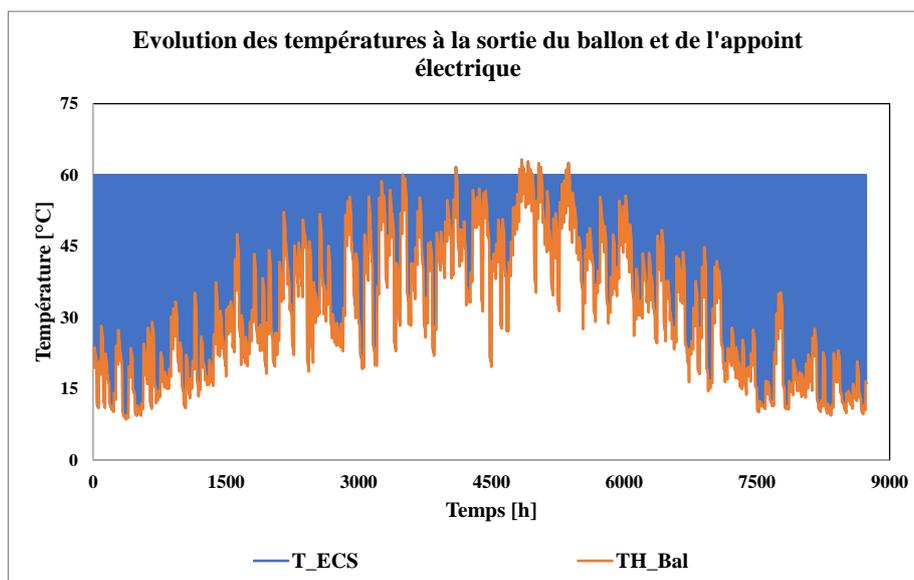


Figure V-6 : Evolution des températures d'ECS et à la sortie du ballon

Le bilan énergétique (Figure V-7) nous donne une production solaire d'environ 14 MWh et un appoint électrique à hauteur de 18 MWh, ce qui nous donne respectivement une couverture solaire et un appoint de 43% et 57%.

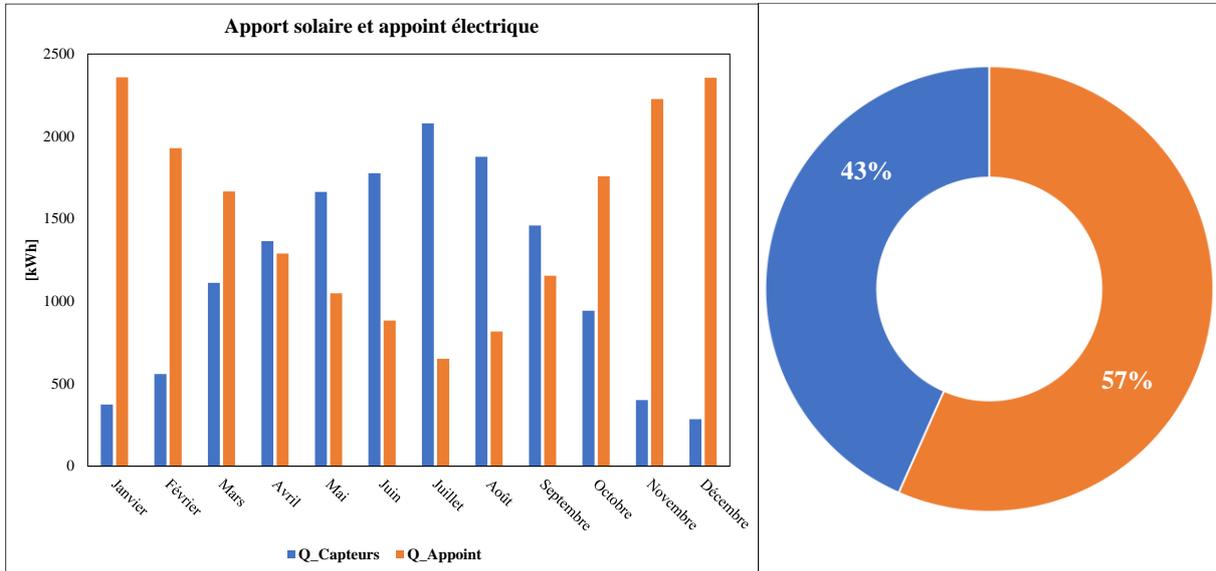


Figure V-7 : Bilan énergétique (scénario 1)

V.4 Modèle du sol soumis aux conditions climatiques

Dans cette partie, on met en évidence le comportement du gisement géothermique à travers l'évolution de la température du sol et on l'évaluera sur une période de 10 ans.

Pour trouver la température de référence des sondes géothermiques, un test de réponse thermique a été réalisé sur un forage dans la zone d'étude. Il permet de caractériser la résistance thermique du sol ainsi que sa température moyenne. On trouve :

- une température de 10,2 °C ;
- une conductivité de la couche de remplissage du forage de $2,07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- une résistance thermique de $0,063 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

On remarque que le comportement du sol (Figure V-8) est celui désiré et la température tend à évoluer en fonction des saisons. On fait face à une légère augmentation en été et une baisse en hiver (de l'ordre de $\pm 0,15 \text{ °C}$). Mais la température moyenne du sol d'une année revient toujours relativement à la température de l'année précédente, d'où la stabilité en température qui traduit le gisement géothermique.

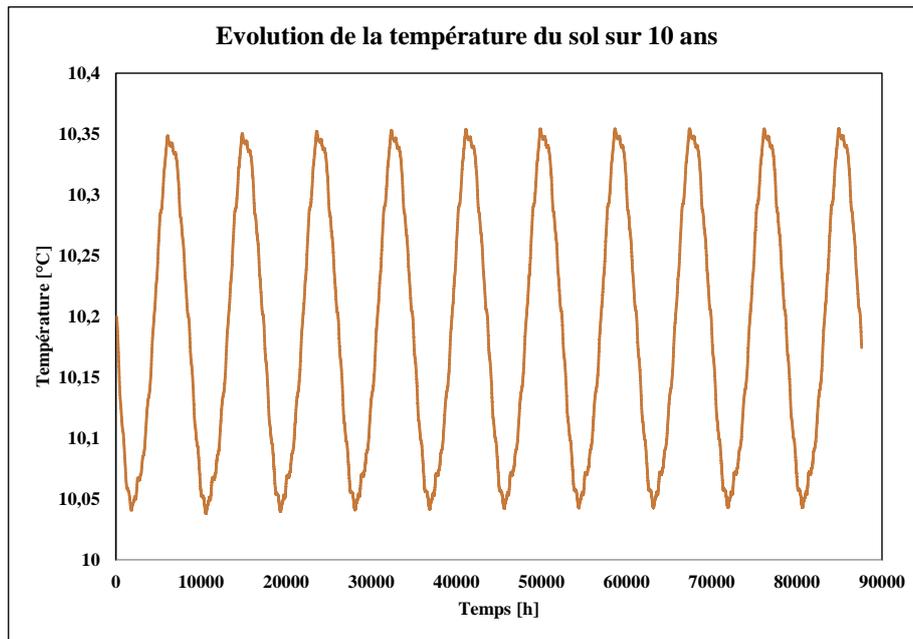


Figure V-8 : Evolution de la température du sol sur 10 ans de simulation

V.5 Modèle de chauffage géothermique

Dans cette partie, on étudie le comportement du système de chauffage et de rafraîchissement de l'air neuf à partir du gisement géothermique sans apport solaire.

Sur le premier graphe, on observe que le sol fournit l'énergie nécessaire au chauffage du bâtiment. Cependant, le comportement de PAC n'est pas celui désiré. En effet, la puissance extraite par cette dernière correspond pratiquement à sa puissance nominale (140 kW) et non au besoin thermique du bâtiment. La PAC délivre une puissance non correspondante à la puissance désirée, on déduit que ce modèle ne module pas la puissance en fonction du besoin.

Le troisième graphe illustre les températures du condenseur (Tout_cond) et de l'évaporateur (Tout_Evapo). La température de l'évaporateur n'atteint pas -5°C comme spécifié par le cahier de charges (CCTP). Le risque de gel est alors évité. Au niveau du condenseur, l'eau chaude délivrée varie entre 35°C et 45°C en période de fonctionnement de la PAC, ce qui correspond au seuil de régulation du ballon tampon ($40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$).

On remarque une diminution du gisement géothermique qui se traduit par la baisse en température du sol de l'ordre de 2°C ($10,2^{\circ}\text{C}$ à 8°C) après une année d'exploitation. Ainsi, ce modèle nous montre combien importante est la recharge thermique.

MODELISATION D'UNE INSTALLATION INNOVANTE DE COUPLAGE DE CHALEUR SOLAIRE
GEOtherMIQUE

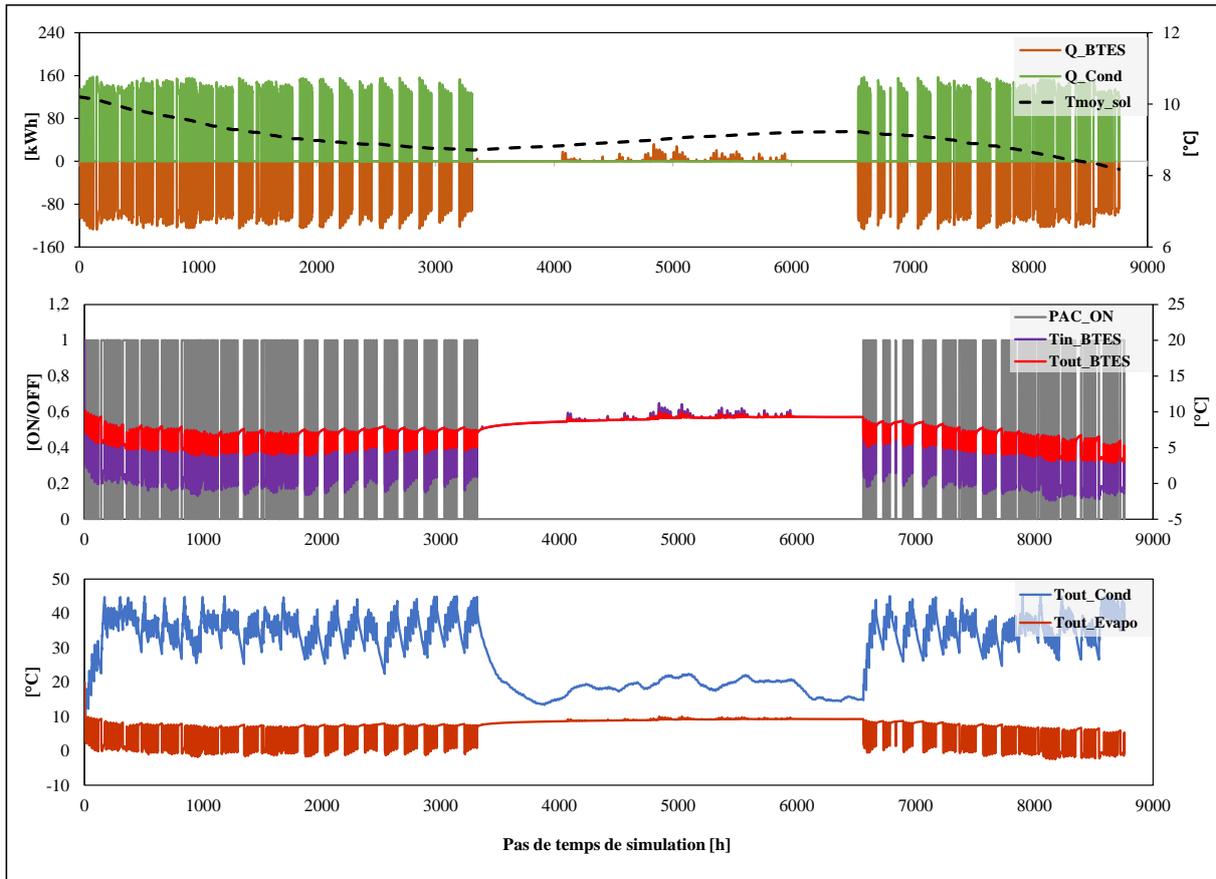


Figure V-9 : Comportement du BTESmart sans recharge thermique

La Figure V-10 présente l'énergie extraite du sol pour satisfaire les besoins thermiques du bâtiment et les calories injectées au sol pour rafraîchir l'air neuf.

On se retrouve avec une puissance extraite du sol en mode chauffage d'environ **225 MWh** contre un besoin calorifique estimé à **96 MWh**.

En période estivale, la chaleur prélevée du local est injectée au sol et elle est estimée à environ **3,5 MWh**.

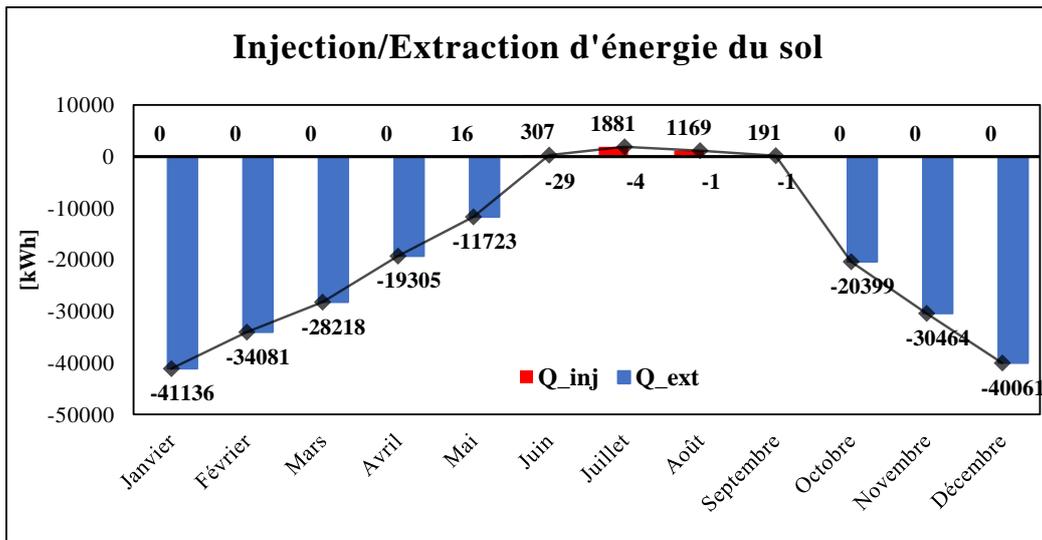


Figure V-10 : Energie échangée avec le sol (scénario 2)

V.6 Modèle complet du BTESmart

Les dernières simulations (Figure V-11) concernent le BTESmart dans son ensemble intégrant les différentes stratégies de contrôle décrites dans la partie modélisation du système.

On remarque sur le premier graphe que contrairement au scénario 2, l'énergie prélevée du sol ne correspond pas à l'énergie au condenseur de la PAC et ceci est dû à l'apport solaire. Pendant la période hivernale, la PAC délivre l'énergie nécessaire au chauffage du bâtiment. Au même moment le champ de capteurs solaires achemine tout ou une partie de sa production en fonction de la régulation ECS. On rappelle que le comportement de la PAC n'est pas celui désiré. En période estivale, on peut bien observer la recharge thermique par l'apport solaire et les calories prélevées au bâtiment pour rafraîchir l'air.

Sur le deuxième graphe, on met en évidence l'évolution des températures à l'entrée et à la sortie des sondes géothermiques. Pendant les périodes de fonctionnement de la PAC, la température à la sortie (Tout_BTES) est toujours inférieure à la température moyenne du sol (10,2 °C). En été, la température à l'entrée (Tin_BTES) excède la température du gisement géothermique et c'est ce qui explique la recharge thermique.

La température de sortie du condenseur (Tout_cond) sur le troisième graphe correspond à la température du fluide acheminé vers le ballon tampon. Elle évolue entre 35°C et 45°C (consigne de régulation).

On remarque sur le quatrième graphe que le COP de la PAC est toujours supérieur à 4. La PAC a une consommation électrique nominale de 35 kW pour une puissance calorifique nominale de 140 kW. Cependant, la puissance fournie par la PAC n'étant pas bien modélisée

MODELISATION D'UNE INSTALLATION INNOVANTE DE COUPLAGE DE CHALEUR SOLAIRE GEOtherMIQUE

par cette dernière, ce COP pourrait être supérieur à celui mesuré sur site.

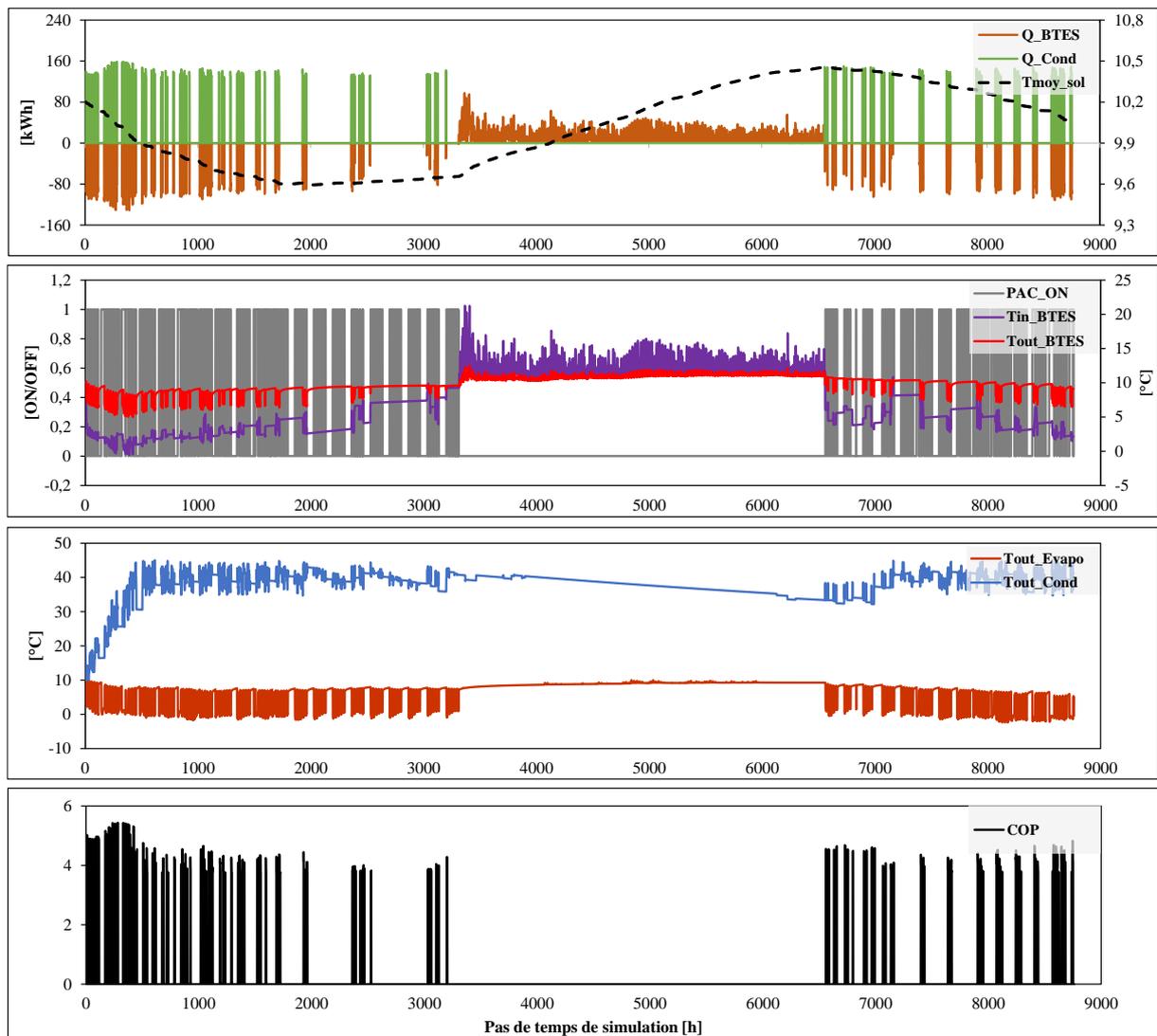


Figure V-11 : Comportement du BTESmart avec recharge thermique

La Figure V-12 présente l'échange d'énergie résultant du fonctionnement du BTESmart avec la recharge thermique. Le bâtiment est chauffé en hiver en soutirant de la chaleur au sol. Les extractions de chaleur (Q_{ext}) sont plus importantes pendant les mois les plus froids (décembre, janvier et février) avec un maximum de 26 MWh extrait en janvier.

La recharge thermique se fait remarquer en été, mais a aussi lieu en hiver. Une moyenne de 9 MWh de chaleur est injectée (Q_{inj}) au sol pendant la période estivale (de mai à septembre).

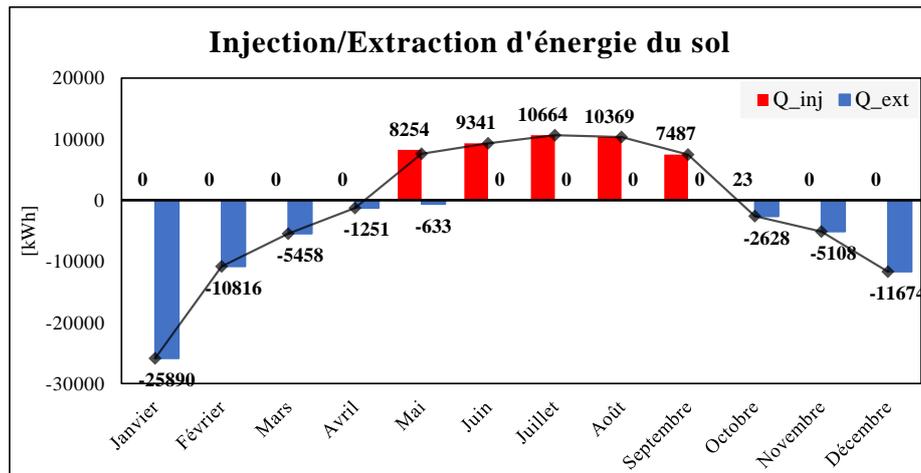


Figure V-12 : Energie échangée avec le sol (scénario 3)

On remarque sur le bilan énergétique du scénario 3 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) qu'environ 74% de l'énergie produite est injectée au sol pour la recharge thermique.

V.7 Synthèse

Sur la Figure V-13, on observe l'évolution de la température du sol dans les 3 derniers scénarios. En orange, nous avons la réponse du sol sans sollicitations (premier scénario). On remarque une adéquation entre la température en début et à la fin de l'année.

Dans le deuxième scénario (courbe en bleu), on remarque une chute brute du gisement (environ 2°C), on puise la chaleur du sol sans lui donner du temps pour se régénérer ou le recharger.

On assiste à une légère baisse de température de l'ordre de 0,2°C dans le troisième scénario. Cet abaissement vient du fait de la différence entre l'énergie extraite (63,5 MWh) et l'énergie injectée (46 MWh).

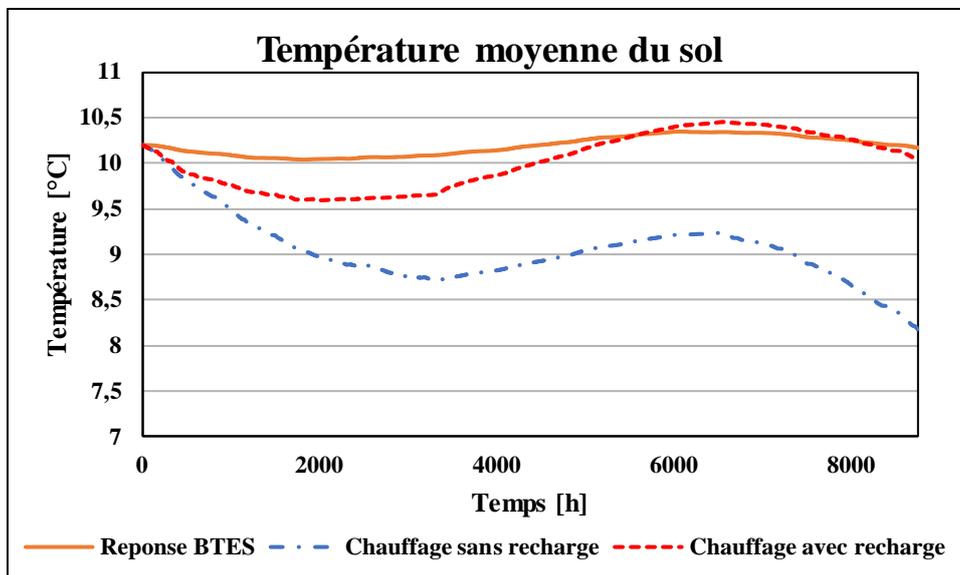


Figure V-13 : Evolution de la température du sol dans les 3 derniers scénarios

D'après les résultats des simulations précédemment représentés, on a observé le comportement thermique du BTESmart en prenant en compte toutes les régulations. On peut dire que le modèle développé donne d'assez bons résultats en les comparant à ceux de STORENGY.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le but du présent travail a été d'étudier le comportement d'une installation de couplage de l'énergie solaire et de la géothermie pour améliorer l'apport énergétique d'un système. Ce dernier a pour vocation la satisfaction des besoins en chauffage et en ECS en hiver et de rafraîchissement de l'air neuf en été.

Nous avons au préalable fait une revue bibliographique des systèmes de couplage de ces énergies (spécifiquement la géothermie basse température) et quelques projets déjà faits ont été présentés pour montrer le potentiel d'un tel couplage afin de positionner notre sujet.

Tout d'abord, nous avons présenté une description complète de l'installation. Elle constitue un bâtiment scolaire situé dans l'écoquartier Vallin-Fier à Annecy en France. Le système (BTESmart) est constitué d'un champ de capteurs solaires thermiques qui satisfont le besoin en ECS et injectent leur surplus de leur production sur un champ de sondes géothermiques à travers un échangeur de chaleur. Le chauffage du bâtiment est assuré par une PAC géothermique qui soutire les calories du sol.

Ensuite, nous avons modélisé le système sur le logiciel TRNSYS en commençant par le circuit de production d'ECS.

Enfin, des simulations ont été faites à partir du modèle réalisé et il en résulte premièrement que la couverture solaire du circuit ECS est assurée à 43% par le champ de capteurs. Deuxièmement, on a remarqué que lorsque le système est simulé sans la recharge thermique, celui-ci nous donne une extraction de chaleur de 225 MWh contre un besoin d'environ 96 MWh. Troisièmement, il en ressort que 74% de la production solaire est consacrée à la recharge thermique du sol après une année de simulation.

Ce travail m'a personnellement permis de découvrir le logiciel TRNSYS et de le maîtriser dans un bref délai. En dehors de cela, j'ai appris à analyser de manière méthodique les systèmes énergétiques.

A l'issue de cette première partie du projet BTESmart qui a permis de modéliser le système dans son ensemble, ce livrable servira à :

- Trouver une solution au problème de la modélisation de la pompe à chaleur sur TRNSYS ;
- Affiner l'évaluation du besoin thermique du bâtiment (puissances de chauffage écrites et simplifications en rafraîchissement);
- Modéliser de façon plus détaillée le circuit de chauffage et de rafraîchissement ;

- Optimiser l'apport énergétique en faisant une analyse comparative (variation de la surface de capteurs, volume de stockage, etc.).

Le modèle développé sur le logiciel TRNSYS n'a pas été inclus dans le document pour des restrictions dues à la confidentialité du projet.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] « L'eau chaude sanitaire – Ademe », *Agence de la transition écologique*. <https://t.ly/8gIF> (consulté le 6 avril 2022).
- [2] M. de la transition écologique durable, « chiffres-cles-du-climat-2022 », *Chiffres clés du climat 2022*. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2022/avant-propos.php> (consulté le 16 mars 2022).
- [3] « BTESmart - Présentation », *Agence de la transition écologique*. <https://bit.ly/3yGoaQz> (consulté le 6 mars 2022).
- [4] « Présentation », *Locie*. <https://www.univ-smb.fr/locie/presentation-2/> (consulté le 6 mars 2022).
- [5] A. Altamirano Cundapi, « Development of a new concept of compact and low-cost absorption chillers: application in solar cooling for hot climates », Thèse de doctorat, Université Savoie Mont Blanc, 2016.
- [6] J. Nou, « Gestion optimale de l'énergie thermique dans un procédé hybride : solaire/géothermie pour le chauffage de bâtiments », Thèse de doctorat, Université de Perpignan, 2011. Consulté le: 12 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00756810>
- [7] « Géothermie profonde, fonctionnement et technologies ». <https://bit.ly/3yKG2Rd> (consulté le 7 avril 2022).
- [8] « La géothermie – Ademe », *Agence de la transition écologique*. <https://bit.ly/3MzLwUz> (consulté le 6 mars 2022).
- [9] V. T. Berdal, « Intégration énergétique dans le bâtiment par utilisation combinée de l'énergie solaire et de la géothermie basse température », Thèse de doctorat, Université Savoie Mont Blanc, 2006.
- [10] V. Trillat-Berdal, B. Souyri, et G. Achard, « Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors », *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, n° 10, p. 1750-1755, juill. 2007, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2006.07.022.
- [11] V. Trillat-Berdal, B. Souyri, et G. Fraisse, « Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors », *Energy and Buildings*, vol. 38, n° 12, p. 1477-1484, déc. 2006, doi: 10.1016/j.enbuild.2006.04.005.
- [12] J. Nou, A. Traoré, T. Talbert, et M. Polit, « Modeling of a geothermal and thermal solar process », *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, n° 1, p. 12934-12939, janv. 2011, doi:

10.3182/20110828-6-IT-1002.03149.

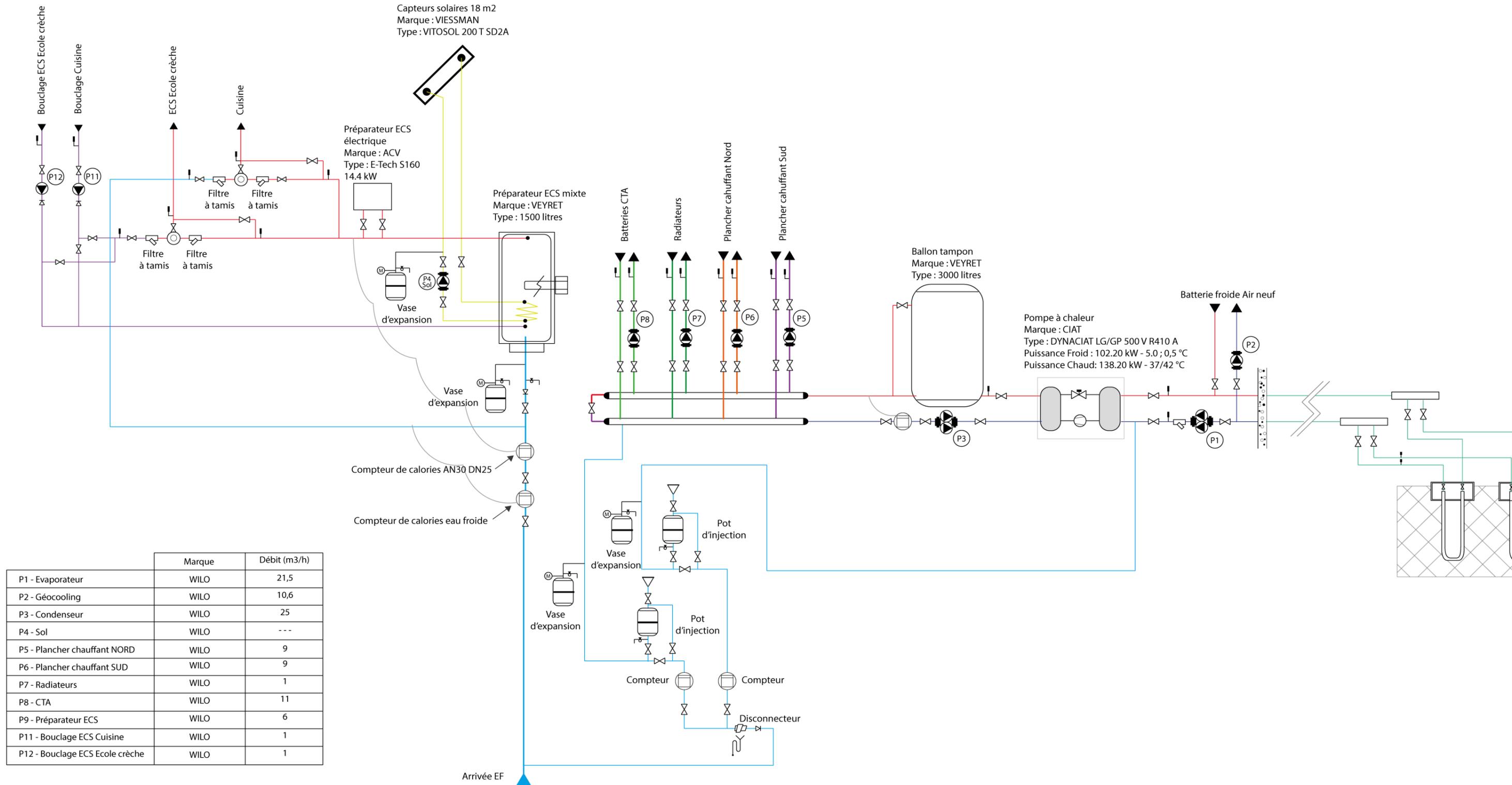
[13] X. Chen et H. Yang, « Performance analysis of a proposed solar assisted ground coupled heat pump system », *Applied Energy*, vol. 97, p. 888-896, sept. 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.11.073.

[14] « Géoportail ». <https://www.geoportail.gouv.fr/> (consulté le 19 mars 2022).

ANNEXES

Annexe I : Schéma de principe de la chaufferie

SCHEMA DE PRINCIPE DE PRODUCTION DE CHALEUR - VALLIN FIER (Existant)



	Marque	Débit (m3/h)
P1 - Evaporateur	WILO	21,5
P2 - Géocooling	WILO	10,6
P3 - Condenseur	WILO	25
P4 - Sol	WILO	---
P5 - Plancher chauffant NORD	WILO	9
P6 - Plancher chauffant SUD	WILO	9
P7 - Radiateurs	WILO	1
P8 - CTA	WILO	11
P9 - Préparateur ECS	WILO	6
P11 - Bouclage ECS Cuisine	WILO	1
P12 - Bouclage ECS Ecole crèche	WILO	1

Annexe II : Caractéristiques des forages géothermiques

N° Ordre	Paramètre	Unité	Valeur
1	Volume d'échange	m ³	155 862
2	Profondeur des forages	m	100
3	Profondeur de la tête des forages	m	1
4	Nombre de forages	u	18
5	Rayon de forages	mm	75
6	Nombre de puits en série	u	1
7	Nombre de zones radiales	u	1
8	Nombre de zones verticales	u	10
9	Conductivité de la zone d'échange	W·m ⁻¹ K ⁻¹	2,07
10	Capacité thermique de la zone d'échange principale	kJ·m ⁻³ K ⁻¹	2160
11	Résistance thermique du forage	m·K·kJ ⁻¹ ·h ⁻¹	0.018
12	Résistance interne du forage	m·K·kJ ⁻¹ ·h ⁻¹	-0.083
20	Chaleur spécifique du fluide caloporteur (eau glycolée à 30%, 10°C)	kJ·kg ⁻¹ K ⁻¹	3,639
21	Densité du fluide caloporteur (eau glycolée à 30%, 10°C)	kg·m ⁻¹	1052
22	Isolation de la zone d'échange principale (0 = Pas d'isolation)		0
24	Epaisseur de l'isolant autour de la zone d'échange	m	0
25	Conductibilité de l'isolant autour de la zone d'échange	m	0
26	Durée de la simulation en années	années	
27	Température d'entrée maximale du fluide caloporteur	°C	40
28	Température initiale du sol	°C	10,2
29	Durée du préchauffage pour les conditions initiales	années	0
30	Température maximale de préchauffage	°C	0
31	Température minimale de préchauffage	°C	0
32	Délai de préchauffage	Jours	0
33	Température moyenne de l'air pour le préchauffage	°C	0
34	Déphasage de la température de l'air	-	0
35	Nombre de couches de sol externes à la zone d'échange principale	u	1
36	Conductivité de la couche externe	W·m ⁻¹ K ⁻¹	2.07
37	Capacité de la zone externe	kJ·m ⁻³ K ⁻¹	2160
38	Epaisseur de la couche externe	m	1000

Annexe III : Fiche techniques des capteurs solaires thermiques (1)

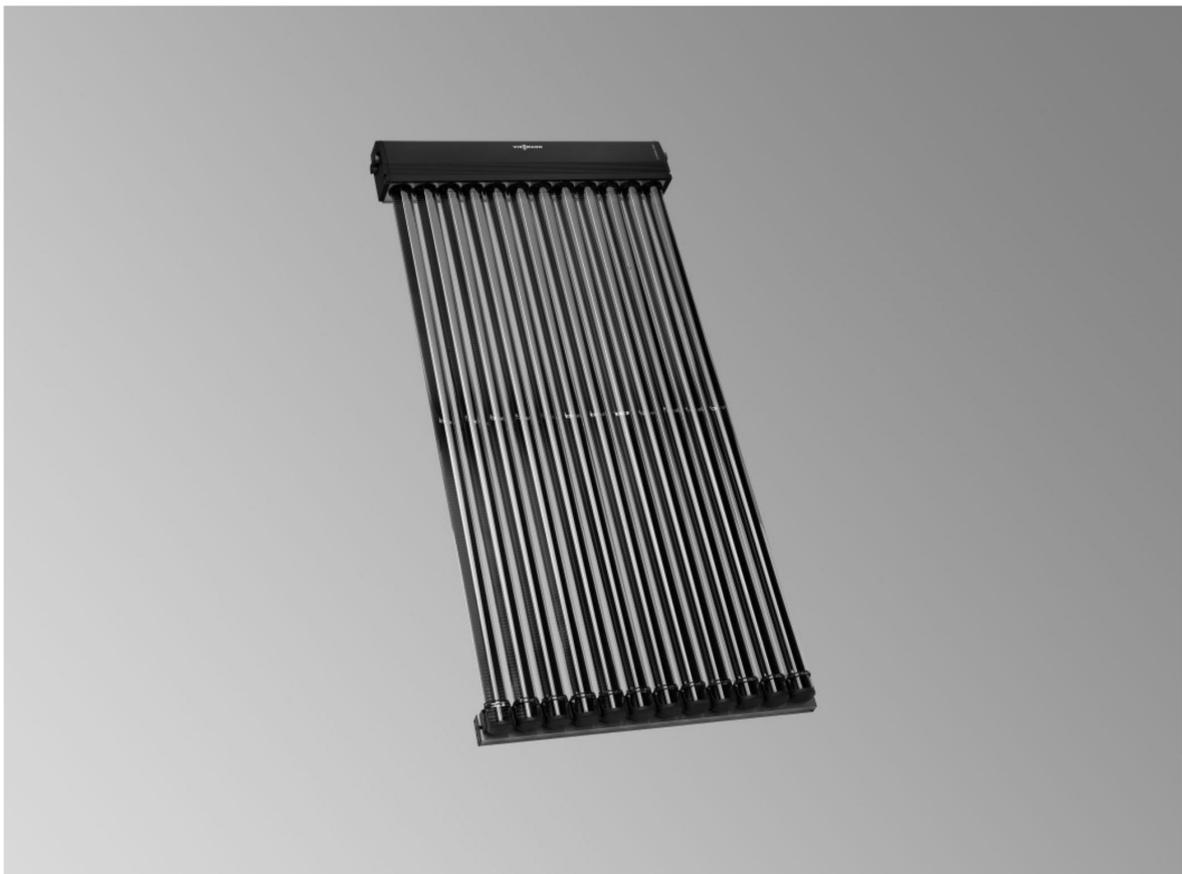
VIESSMANN

VITOSOL 300-TM

Capteur solaire à tubes sous vide selon le principe du Caloduc
pour l'exploitation de l'énergie solaire

Feuille technique

Référence et prix : voir liste de prix



VITOSOL 300-TM type SP3C

Capteur à tubes sous vide

Pour la production d'ECS, pour le réchauffage de l'eau de chauffage et de l'eau de piscine via un échangeur de chaleur ainsi que pour la production de chaleur pour les process industriels.

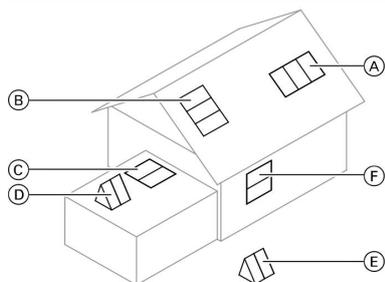
Pour montage sur toitures-terrasses, toits à versants ainsi que sur supports indépendants.

Annexe III : Fiche techniques des capteurs solaires thermiques (2)

Caractéristiques techniques

Données techniques				
Type SP3C		1,25 m ²	1,51 m ²	3,03 m ²
Nombre de tubes		10	12	24
Surface brute (nécessaire en cas de demande de subventions)	m ²	1,98	2,36	4,62
Surface de l'absorbeur	m ²	1,26	1,51	3,03
Surface d'ouverture	m ²	1,33	1,60	3,19
Ecart entre capteurs	mm	—	88,5	88,5
Dimensions				
Largeur a	mm	885	1053	2061
Hauteur b	mm	2241	2241	2241
Profondeur c	mm	150	150	150
Les valeurs suivantes se rapportent à la surface de l'absorbeur :				
– Rendement optique	%	79,2	79,7	78,2
– Coefficient de déperditions calorifiques k ₁	W/(m ² · K)	1,512	2,02	1,761
– Coefficient de déperditions calorifiques k ₂	W/(m ² · K ²)	0,027	0,006	0,008
Les valeurs suivantes se rapportent à la surface optique :				
– Rendement optique	%	75	75,2	74
– Coefficient de déperditions calorifiques k ₁	W/(m ² · K)	1,432	1,906	1,668
– Coefficient de déperditions calorifiques k ₂	W/(m ² · K ²)	0,025	0,006	0,007
Les valeurs suivantes se rapportent à la surface brute :				
– Rendement optique	%	50,4	51	51,4
– Coefficient de déperditions calorifiques k ₁	W/(m ² · K)	0,932	1,292	1,158
– Coefficient de déperditions calorifiques k ₂	W/(m ² · K ²)	0,017	0,004	0,005
Capacité calorifique	kJ/(m ² · K)	6,08	5,97	5,73
Poids	kg	33	39	79
Capacité en liquide (fluide caloporteur)	litres	0,75	0,87	1,55
Pression de service adm.	bar/MPa	6/0,6	6/0,6	6/0,6
Si une soupape de sécurité 8 bar (accessoire) est montée	bar/MPa	8/0,8	8/0,8	8/0,8
Température à l'arrêt maxi.	°C	150	150	150
Puissance de production de vapeur	W/m ²	0	0	0
Raccordement	Ø mm	22	22	22
Données techniques pour déterminer la classe d'efficacité énergétique (label ErP)				
Type SP3C		1,26 m ²	1,51 m ²	3,03 m ²
Surface d'ouverture	m ²	1,33	1,6	3,19
Les valeurs suivantes se rapportent à la surface optique :				
– Rendement des capteurs η _{col} , avec une différence de température de 40K	%	68	69	69
Rendement optique	%	74	76	76
– Coefficient de déperditions calorifiques k ₁	W/(m ² · K)	1,3	1,3	1,3
– Coefficient de déperditions calorifiques k ₂	W/(m ² · K ²)	0,007	0,007	0,007
Coefficient de correction angulaire IAM		0,98	0,98	0,98

Emplacement (voir la figure ci-dessous) (A), (B), (C), (D), (E), (F)



Annexe IV : Fiche technique PAC



ISO 9001 • ISO 14001
OHSAS 18001



N° : 188 2011 18288

Date émission : 16/03/2012

Page : 1 / 6

Votre référence : Groupe scolaire VALLIN FIER ANNE

N° Ligne Offre : 100

Poste Cahier des Charges : PAC

Groupe compact, esthétique et silencieux - Compresseurs SCROLL - Echangeurs à plaques brasées

Régulation et gestion complète par module électronique à microprocesseur.

Suivant notice technique N° CAT

Fluide frigorigène / kg : R410A / 16.1
Nb de circuit(s) frigorifique(s) : 1
Régulation de puissance : 100-50-0 %
Mode démarrage : en cascade

Puissance frigorifique : 102.2 kW
EER (ESEER) : 2.84 (5.44)
Fluide : MEG 30%
Température entrée / sortie : 5.0 °C / 0.5 °C
Débit : 21.5 m3/h
Perte de charge : 2.65 mCE
Diamètre de raccordement : G 2" 1/2 M

Puissance calorifique : 138.2 kW
COP : 3.84
Fluide : MEG 30%
Température entrée / sortie : 37.0 °C / 42.0 °C
Débit : 25.0 m3/h
Perte de charge : 9.1 mCE
Diamètre de raccordement : G 2" 1/2 M

Puissance électrique dépensée : 36.0 kW
Tension d'alimentation : Triphasé 400V
50Hz
Intensité pour sélection câble d'alimentation :
91.8 A
Intensité de démarrage : 318.0 A
Intensité de démarrage avec option SOFTSTART :
210.0 A



DynaCIAT^{POWER}
700V-2400V



DynaCIAT
120V-600V

