

## Étude de l'intégration d'un système géothermique dans un réseau de chaleur à basse température

**Auteur :** Nebhani, Manal

**Promoteur(s) :** François, Bertrand

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

**Diplôme :** Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

**Année académique :** 2022-2023

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/16758>

---

### Avertissement à l'attention des usagers :

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---



Université de Liège  
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

---

# Étude de l'intégration d'un système géothermique dans un réseau de chaleur à basse température

---

*Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade  
de Master "Ingénieur civil des Constructions"*

*Auteur*  
Manal NEBHANI

*Promoteur*  
Bertrand FRANÇOIS

Année académique 2022-2023

# Résumé

Ce travail vise une étude de préfaisabilité pour l'intégration d'un système géothermique, en boucle fermé, dans un réseau de chaleur à basse température (0°C à 25°C) dans le campus d'Uliège au quartier Polytech.

Cette étude de préfaisabilité est réalisée selon différentes phases :

La première phase consiste à contextualiser le projet, définir les bâtiments concernés ainsi que leurs historiques et leurs surfaces.

La deuxième phase consiste à caractériser les ressources géothermiques selon le cadre géologique à travers les cartes et les coupes géologiques. L'objectif derrière cette phase est d'évaluer le potentiel géothermique du site pour l'exploitation d'un champ de sondes.

La troisième phase comprend l'évaluation des besoins énergétiques mensuels des bâtiments ainsi que le choix du système de chauffage à adopter à travers l'évaluation de la puissance nécessaire, à fournir par la pompe à chaleur géothermique, à l'aide de la courbe monotone des puissances de chauffage. Ce qui en résulte l'utilisation d'un système bivalent avec un important taux de couverture important par le système géothermique.

Finalement, ces données énergétiques et thermiques ont été exploitées pour dimensionner le champ de sondes d'une manière à desservir les besoins énergétiques requis sans épuiser de manière excessive le réservoir de chaleur du sol ou de dégrader les performances du système. Ainsi qu'une modélisation du champ de sondes a été réalisée pour visualiser son fonctionnement à travers la réponse thermique du sol. L'analyse des résultats montre que, la majorité du temps, l'installation des sondes géothermiques parvient à répondre aux besoins de chauffage des bâtiments.

**Mots clés :** *Système géothermique, champ de sondes, réseau de chaleur à basse température.*

# *Abstract*

This thesis work aims at a prefeasibility study of a geothermal system, in closed loop, in a low temperature heat network (0° C to 25° C) in the campus of Uliège in the Polytech area.

This prefeasibility study is carried out in different phases :

The first phase consists of contextualizing the project, defining the perimeter concerned and carrying out a historical photographic study to determine the years of construction of the buildings in the area.

The second phase consists in characterizing the geothermal resources according to the geological framework through maps and geological sections. The objective behind this phase is to evaluate the geothermal potential of the site for the exploitation of a BHE field.

The third phase includes the evaluation of the monthly energy needs of the buildings and the choice of the system to be adopted through the evaluation of the necessary power to be supplied by the heat pump via the monotonic curve of the heating powers.

These energy and thermal data were used to size the borehole heat exchanger field to provide the required energy needs without excessively depleting the ground heat reservoir. A model of the BHE field has been made to visualize its operation through the thermal response of the soil. The analysis of the results shows that, most of the time, the installation of geothermal probes succeeds in satisfying the heating needs of the buildings.

***Keywords*** : *Low temperature geothermal system, borehole heat exchanger system, low temperature heating network.*



# *Remerciements*

*Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de mon travail de fin d'étude.*

*Tout d'abord, je remercie mon promoteur Bertrand François pour son aide, sa patience et ses conseils réguliers qui m'ont permis d'avancer dans ce travail.*

*Je remercie également Kevin Sartor pour les informations fournies et sa disponibilité.*

*Je remercie également les membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré pour la lecture de mon travail.*

*Pour finir, je tiens à remercier mes proches, spécialement mes parents, pour le soutien qu'ils m'ont apporté tout au long de ce travail et de mes études.*

# Table des matières

Table des figures	vi
Liste des tableaux	ix
Liste des abréviations et symboles	ix
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte . . . . .	1
1.2 Objectif du travail . . . . .	1
1.3 Organisation . . . . .	2
<b>2 État de l'Art</b>	<b>3</b>
2.1 Géothermie . . . . .	3
2.1.1 Histoire de la géothermie . . . . .	4
2.1.2 Statistiques . . . . .	5
2.1.3 Les bénéfices d'un système géothermique . . . . .	5
2.2 Les systèmes géothermiques . . . . .	6
2.2.1 Les différents types de systèmes géothermiques . . . . .	6
2.2.2 Géothermie à basse température . . . . .	8
2.2.3 La géothermie basse température en système fermé . . . . .	10
2.2.4 Intégration d'un système géothermique dans un bâtiment . . . . .	11
2.2.5 Pompe à chaleur . . . . .	12
2.2.6 Intégration d'un système géothermique dans un réseau de chaleur basse température . . . . .	13
2.3 Paramètres thermiques du sol . . . . .	13
2.3.1 Conductivité thermique du sol : . . . . .	13
2.3.2 Capacité thermique : . . . . .	16
2.3.3 Diffusivité thermique : . . . . .	17
2.4 Dimensionnement des systèmes géothermiques . . . . .	17
2.4.1 Première étape : Détermination des besoins thermiques . . . . .	18
2.4.2 Introduction de la pompe à chaleur et calcul de la puissance d'ex- traction . . . . .	18
2.4.3 Deuxième étape : Première estimation de la longueur de l'échangeur géothermique . . . . .	19
2.4.4 Troisième étape : Application des facteurs correcteurs . . . . .	20
2.4.5 Détermination du nombre des sondes géothermiques . . . . .	20

2.5	Conclusion . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Cadre du projet</b>	<b>22</b>
3.1	Cadre géographique . . . . .	22
3.1.1	L'emprise du projet . . . . .	23
3.1.2	Historique des bâtiments . . . . .	24
3.1.3	Surface des bâtiments . . . . .	25
3.2	Cadre géologique . . . . .	25
3.3	Cadre hydrogéologique . . . . .	26
3.4	Relevés géologiques et géothermiques [16] . . . . .	27
3.4.1	Forages géologiques . . . . .	28
3.4.2	Diagraphie de forage . . . . .	28
3.4.3	Gamma-Ray essai . . . . .	29
3.4.4	Essai laboratoire . . . . .	31
3.5	Propriétés thermiques du sol . . . . .	32
3.5.1	Température du sol non perturbé . . . . .	32
3.5.2	Conductivité thermique . . . . .	33
3.5.3	Capacité thermique . . . . .	33
3.6	Conclusion . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Evaluation des besoins énergétiques</b>	<b>34</b>
4.1	La notion des degrés-jours . . . . .	34
4.2	La collecte et le traitement des données . . . . .	36
4.3	Les besoins en chauffage . . . . .	37
4.3.1	Bâtiment B52 : . . . . .	37
4.3.2	Les autres bâtiments . . . . .	41
4.3.3	Comparaison des consommations des bâtiments aux normes . . . . .	45
4.3.4	Le réseau . . . . .	46
4.4	Conclusion . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Dimensionnement d'un champ de sondes pour le bâtiment B52</b>	<b>50</b>
5.1	Prédimensionnement selon la norme hollandaise ISSO 73 : . . . . .	50
5.2	Emplacement des sondes . . . . .	52
5.3	Modélisation . . . . .	53
5.3.1	Choix des paramètres d'entrées . . . . .	53
5.3.2	Modélisation sur une année . . . . .	54
5.4	Modélisation sur 10 ans . . . . .	57
5.5	Analyse de sensibilité . . . . .	57
5.5.1	Pourcentage des sondes géothermiques . . . . .	57
5.5.2	Année plus froide . . . . .	59
5.5.3	Profondeur des sondes . . . . .	60
5.5.4	Système monovalent . . . . .	60
5.5.5	Re-injection de la chaleur en été . . . . .	61
5.6	Conclusion . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Dimensionnement d'un champ de sondes pour le réseau de chaleur</b>	<b>65</b>
6.1	Prédimensionnement des sondes géothermiques . . . . .	65

## TABLE DES MATIÈRES

6.1.1	Prédimensionnement pour chaque bâtiment du réseau . . . . .	65
6.1.2	Prédimensionnement pour le réseau . . . . .	66
6.1.3	Discussions . . . . .	66
6.2	Emplacement des sondes . . . . .	67
6.3	Modélisation . . . . .	67
6.3.1	Modélisation sur une année . . . . .	67
6.3.2	Modélisation sur 10 ans . . . . .	68
6.4	Analyse de sensibilité . . . . .	69
6.4.1	10% de sondes en moins . . . . .	69
6.4.2	Système monovalent . . . . .	70
6.4.3	Année plus froide . . . . .	71
6.4.4	Profondeur des sondes . . . . .	72
6.4.5	Ré-injection . . . . .	73
6.5	Conclusion . . . . .	75
<b>7</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>76</b>
<b>A</b>	<b>Application des facteurs correcteurs</b>	<b>III</b>
A.1	Application des facteurs correcteurs : La conductivité thermique du sol . .	III
A.2	Application des facteurs correcteurs : Le matériau de remplissage . . . . .	IV
A.3	Application des facteurs correcteurs : La température du médium . . . . .	V
A.4	Application des facteurs correcteurs : La géométrie de la sonde . . . . .	V
A.5	Application des facteurs correcteurs : La configuration du champ des sondes	VI
A.6	Application des facteurs correcteurs : L'écart entre les échangeurs géother- miques . . . . .	VI
<b>B</b>	<b>Conductivité thermique</b>	<b>VIII</b>
<b>C</b>	<b>Plateforme HeidiSQL</b>	<b>X</b>
<b>D</b>	<b>Prédimensionnement des sondes géothermiques pour le réseau de cha- leur</b>	<b>XI</b>

# Table des figures

2.1	Structure de la terre à partir de la surface jusqu'au noyau. (Source : [1]) . .	3
2.2	Évolution de la température souterraine en géothermie peu profonde. (Source : [4]) . . . . .	4
2.3	Avantage thermique (Source : [8]) . . . . .	6
2.4	Différentes grandes catégories de géothermie (Source : [10]) . . . . .	7
2.5	Système ouvert et fermé (Source : [8]) . . . . .	9
2.6	Système ouvert durant la période de chauffe/refroidissement (Source : [4]) .	9
2.7	Composition d'une installation géothermique. (Source :ADEME et BRGM)	11
2.8	Cycle thermodynamique d'une PAC Source : (Source : [9]) . . . . .	12
2.9	Configuration d'essai d'un Test de réponse thermique (Source : [4]) . . . .	15
2.10	Exemple fictif des résultats d'un TRT. (Source : [4]) . . . . .	15
2.11	Organigramme de la méthode de conception à l'aide de la norme ISSO 73	18
2.12	Relation entre le nombre d'heures de fonctionnement à charge pleine, la régénération et la puissance d'extraction spécifique (Source : [4] ) . . . . .	19
3.1	Extrait de la carte IGN - 1/20 000ème (Source :[17]) . . . . .	23
3.2	Les bâtiments . . . . .	23
3.3	Photo aérienne prise en 1971 . . . . .	24
3.4	Photo aérienne prise en 1994 . . . . .	24
3.5	Photo aérienne prise en 2001 . . . . .	24
3.6	Photo aérienne prise en 2009 . . . . .	24
3.7	Photo aérienne prise en 2016 . . . . .	25
3.8	Photo aérienne prise en 2021 . . . . .	25
3.9	Carte géologique du Sart-Tilman (Source : [15]) . . . . .	26
3.10	Coupe géologique (Adapté de : [15]) . . . . .	26
3.11	Cadre hydrogéologique (Source :[15]) . . . . .	27
3.12	Implantation des forages réalisés (Source :[16]) . . . . .	27
3.13	Fractures (Source :[16]) . . . . .	28
3.14	Résultats Gamma-ray pour les 4 forages (Source : [16]) . . . . .	29
3.15	Résultats Gamma-ray pour les 4 forages (Adapté de [16]) . . . . .	30
3.16	Interprétation géologique des résultats de l'essai Gamma-Ray (Source :[16])	30
3.17	Conductivité thermique mesurée des échantillons (Source :[16]) . . . . .	31
3.18	Température mesurée (Source :[16]) . . . . .	32
4.1	Les degrés-jours mensuels année 2021-2022 . . . . .	35
4.2	Les degrés-jours annuels pendant les 12 dernières années. . . . .	36

## TABLE DES FIGURES

4.3	Les besoins mensuels du B52 de la période du 13 octobre 2021 au 13 octobre 2022 . . . . .	38
4.4	La puissance par heure . . . . .	39
4.5	La puissance par jour . . . . .	39
4.6	La courbe monotone de chaleur par heure . . . . .	40
4.7	La courbe monotone de chaleur par heure . . . . .	41
4.8	Les besoins mensuels du B65 . . . . .	42
4.9	Les besoins mensuels du B28 . . . . .	42
4.10	Les besoins mensuels du B37 . . . . .	42
4.11	Les besoins mensuels du B48 . . . . .	42
4.12	Les besoins mensuels du B47 et du B49 . . . . .	42
4.13	Les besoins mensuels du B53 . . . . .	42
4.14	Les besoins mensuels du B26 . . . . .	43
4.15	La courbe monotone de chaleur B26. . . . .	43
4.16	La courbe monotone de chaleur B28. . . . .	43
4.17	La courbe monotone de chaleur B47 et B49. . . . .	44
4.18	La courbe monotone de chaleur B48. . . . .	44
4.19	La courbe monotone de chaleur B53. . . . .	44
4.20	La courbe monotone de chaleur B37. . . . .	44
4.21	La courbe monotone de chaleur B65. . . . .	44
4.22	Comparaison aux consommations de combustibles des bureaux publics HT en 2008- Adapté de [19] . . . . .	46
4.23	Les besoins mensuels du réseau . . . . .	46
4.24	La courbe monotone de chaleur du réseau par heure . . . . .	47
4.25	La courbe monotone de chaleur du réseau journalière . . . . .	47
4.26	La courbe monotone de chaleur du réseau journalière . . . . .	48
5.1	Localisation des sondes . . . . .	52
5.2	Distribution de la température tout au long de l'année : en cas d'un point au milieu du premier groupe des sondes . . . . .	54
5.3	Distribution de la température tout au long de l'année : en cas d'un point au milieu du deuxième groupe des sondes . . . . .	55
5.4	Distribution de la température tout au long de l'année : en cas d'un point au coin du champ des sondes . . . . .	56
5.5	Distribution de la température tout au long de l'année : en cas d'un point à l'extérieur . . . . .	56
5.6	Distribution de la température tout au long de 10 ans . . . . .	57
5.7	Distribution de la température en réduisant le nombre de sondes par 20% . . . . .	58
5.8	Distribution de la température en réduisant le nombre de sondes par 10% . . . . .	59
5.9	Distribution de la température durant une année plus froide . . . . .	59
5.10	Distribution de la température en cas d'une profondeur de 250m . . . . .	60
5.11	Distribution de la température en cas de système monovalent . . . . .	61
5.12	Distribution de la température sur 10 ans après ré-injection . . . . .	62
5.13	Distribution de la température sur une année après ré-injection . . . . .	63
5.14	Distribution de la température après ré-injection et réduction du nombre de sondes par 10% . . . . .	64

## TABLE DES FIGURES

6.1	Distribution de la température tout au long de l'année . . . . .	67
6.2	Distribution de la température tout au long de l'année . . . . .	68
6.3	Distribution de la température tout au long de 10 ans . . . . .	69
6.4	Distribution de la température en réduisant le nombre de sondes par 10% .	70
6.5	Distribution de la température en cas d'un système monovalent . . . . .	71
6.6	Distribution de la température en cas d'une année plus froide . . . . .	72
6.7	Distribution de la température en cas d'une profondeur de 250m. . . . .	73
6.8	Distribution de la température sur 10 ans après ré-injection . . . . .	74
6.9	Distribution de la température sur une année après ré-injection . . . . .	75
A.1	influence du type de sol . . . . .	IV
A.2	influence du type de matériau de remplissage . . . . .	IV
A.3	Influence de la température médian . . . . .	V
A.4	Influence du type d'échangeur de chaleur souterrain . . . . .	V
A.5	Influence de de la configuration (< 10 sondes géothermiques) . . . . .	VI
A.6	Influence de de la configuration (> 50 sondes géothermiques) . . . . .	VI
A.7	Influence de l'espacement entre les sondes (< 10 sondes) . . . . .	VI
A.8	Influence de l'espacement entre les sondes (> 50 sondes) . . . . .	VII
B.1	Les conductivités thermiques selon le type de roche (Source :[4]) . . . . .	IX
C.1	Plateforme HeidiSQL . . . . .	X

# Liste des tableaux

2.1	Production mondiale de chaleur géothermique (Review 2015-2020) (Source : <a href="#">[7]</a> . . . . .	5
2.2	Les différentes catégories et leurs caractéristiques en termes de profondeur d'extraction, de températures concernées et d'utilisations <a href="#">[11]</a> . . . . .	8
3.1	Les surfaces des bâtiments . . . . .	25
4.1	Les degrés-jours mensuels année 2021-2022 . . . . .	35
4.2	Les consommations spécifiques pour la période octobre 2021 à octobre 2022 . . . . .	45
5.1	Les paramètres d'entrée pour la modélisation . . . . .	53
6.1	Prédimensionnement des sondes pour chaque bâtiment . . . . .	65



# Liste des abréviations et symboles

## Les symboles et unités de mesure

$E_{cal}$     Energie thermique fournie par la pompe à chaleur [kWh]

$E_{elec}$     Energie électrique [kWh]

$\lambda$         Conductivité thermique [ $W/mK$ ]

$\vec{q}$         Vecteur densité de flux de chaleur [ $W/m^2$ ]

$\nabla T$     Gradient de température [K/m]

$D$         Epaisseur de la couche [m]

$T_0$       Température initiale [K ou °C]

$T_f$       Température du fluide [K ou °C]

$T$         Température [K ou °C]

$H$         Profondeur de l'échangeur géothermique [m]

$c$         Capacité thermique [J/K]

$c_p$       Capacité thermique massique [J/kg.K]

$\rho c_p$     Capacité thermique volumique [ $J/m^3K$ ]

$n$         Porosité du sol [-]

$S_r$       Degré de saturation du sol [-]

$\alpha$       Diffusivité thermique [ $m^2/s$ ]

## LISTE DES TABLEAUX

$P_{ground}$	Capacité d'extraction de la pompe à chaleur [kW]
$P_{heating}$	Capacité de chauffage de la pompe à chaleur [kW]
$P_{spécifique}$	Puissance spécifique d'extraction [W/m]
$Q_{besoin}$	Les besoins énergétiques [kWh ou MWh]
$L_{totale}$	Longueur totale préliminaire des sondes [m]
$L_{corrected}$	Longueur totale des sondes corrigées [m]
$L_{BHE}$	Profondeur maximale du forage [m]
$N_{BHE}$	Nombre de sondes géothermiques [-]

### Les abréviations

SCF	Stockage chaud/froid
COP	Le coefficient de performance
PAC	Une pompe à chaleur
TRT	Test de réponse thermique
BHE	Champ de sondes géothermiques (Borehole heat exchanger)
GSHP	Système de pompe à chaleur géothermique (Ground source heat pump)

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Contexte

Aujourd'hui, tandis que les besoins énergétiques ne cessent pas d'augmenter, que les combustibles fossiles se raréfient et chargent l'atmosphère en dioxyde de carbone, il est essentiel de développer de nouvelles ressources énergétiques non polluantes et bien évidemment renouvelables.

À la différence des énergies fossiles, concentrées en quelques sites particuliers de la croûte terrestre, **la géothermie** est présente dans tous les sous-sols et sous tous les climats. Ses usages sont variés, car elle présente une large gamme de températures et de profondeurs. À faible profondeur, en tout point du globe, associée à une pompe à chaleur, elle peut servir au chauffage et au refroidissement des habitations. Plus en profondeur et selon la structure des formations géologiques ou la composition des roches, cette énergie sera plus ou moins facile à extraire avec des technologies maîtrisées, permettant d'autres usages comme la production d'électricité. [1]

### 1.2 Objectif du travail

Actuellement, le chauffage des bâtiments du campus du Sart-Tilman est assuré par un réseau de chaleur ( $80^{\circ} - 120^{\circ} \text{ C}$ ) alimenté par la biomasse [2], cette cogénération de biomasse est intégrée à la centrale thermique (B10) au nord du campus, et gérée par l'entreprise Cofély du groupe Engie. Ce système assure des besoins constants au cours de l'année pourtant il ne peut donc pas s'adapter aux fluctuations des demandes.

Ce système représente de nombreux avantages (renouvelable, biodégradable, permet de se débarrasser des déchets biodégradables...), mais aussi des inconvénients.

Tout d'abord, l'une des ressources majeures pour la biomasse est les pellets de bois qui restent épuisables et deviennent de plus en plus chers. L'autre inconvénient est la partie logistique puisque ce système nécessite le transport des matériaux biodégradables, cela va engendrer des charges financières en plus et surtout des émissions des gaz polluants. Enfin, malgré que la biomasse est considérée comme une source éco-énergétique non polluante, elle reste génératrice du  $\text{CO}_2$  avec des quantités plus ou moins maîtrisables.

L'idée est de proposer une alternative plus avantageuse, rentable à long terme, ne nécessite pas des matériaux, renouvelable et surtout efficace tout au long de son fonctionnement. C'est pour cette raison qu'un système géothermique est intéressant vu qu'il va permettre d'alimenter en chaud et en froid les bâtiments du campus de l'Uliège.

En se basant sur les consommations du quartier Polytech, nous allons étudier la faisabilité d'un réseau de chaleur géothermique à basse température qui nécessite en plus des éléments du réseau une pompe à chaleur dans chaque bâtiment pour ajuster, en l'augmentant ou en l'abaissant, la température du réseau selon les besoins de chaque bâtiment.

Dans ce travail, nous analyserons selon différents critères la possibilité de l'installation d'un réseau de chaleur à basse température.

### 1.3 Organisation

Le document est scindé sur plusieurs chapitres :

Tout d'abord, afin de mieux comprendre le sujet et de situer la problématique, le chapitre [2] fait le point sur l'état de l'art des systèmes géothermiques.

Ensuite, le chapitre [3] décrit le cadre géographique de la zone d'implantation des sondes géothermiques, la situation géologique et hydrogéologique. Dans le même chapitre, nous déterminons les paramètres thermiques du sol.

Pour créer ou développer un réseau de chaleur géothermique, il est indispensable d'évaluer les besoins des bâtiments qui seront raccordés et desservis par ce réseau qui sera abordé au chapitre [4].

Le chapitre [5] présente le dimensionnement et la modélisation d'un système géothermique dans le cas d'un seul bâtiment.

Finalement, le chapitre [6] est dédié à l'extension du système géothermique d'un bâtiment à un réseau de chaleur raccordant tous les bâtiments appartenant au Campus.

# Chapitre 2

## État de l'Art

Ce chapitre marque la toute première étape de ce travail, il passe en revue le principe de la géothermie et plus précisément les systèmes géothermiques à basse température et les différentes techniques utilisées, vers la fin du chapitre il a été présenté la méthode de prédimensionnement d'un système fermé.

### 2.1 Géothermie

La géothermie, du grec géo (« la Terre ») et thermos (« la chaleur »), désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à les exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur. [3]

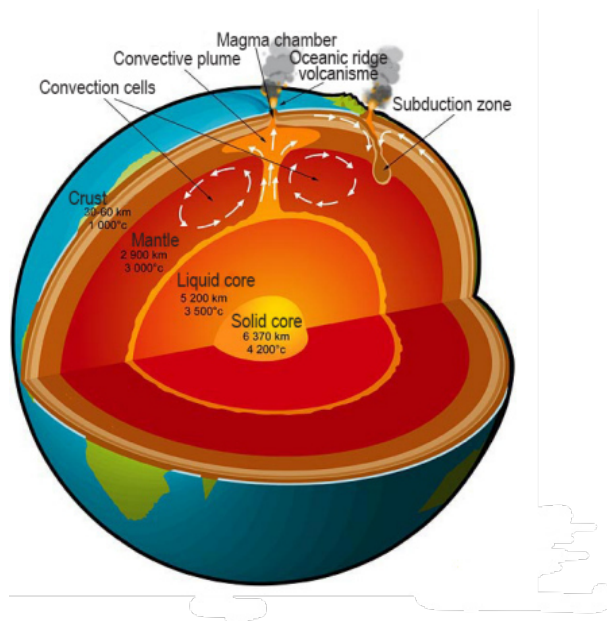


FIGURE 2.1 – Structure de la terre à partir de la surface jusqu'au noyau. (Source : [1])

La température s'élève au centre de la Terre à environ  $5000^{\circ}\text{C}$  (voir figure [2.1]) et diminue fortement à proximité de la surface en raison de l'influence du climat. En Belgique, il règne un climat d'équilibre de  $10$  à  $12^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $18$  m de profondeur (voir figure [2.2]). Au-delà, on augmente de  $2$  à  $3^{\circ}\text{C}$  tous les  $100$  m. Malgré ces basses températures, une masse immense d'énergie thermique, en renouvellement permanent, se trouve dans ces couches "peu profondes" (jusqu'à  $500$  m). Si la chaleur est extraite à une profondeur de plus de  $500$  m (parfois jusqu'à  $2500$  m ou plus), on parle de "géothermie profonde", l'eau souterraine pompée peut alors être utilisée directement à des fins de chauffage ou de production d'électricité.

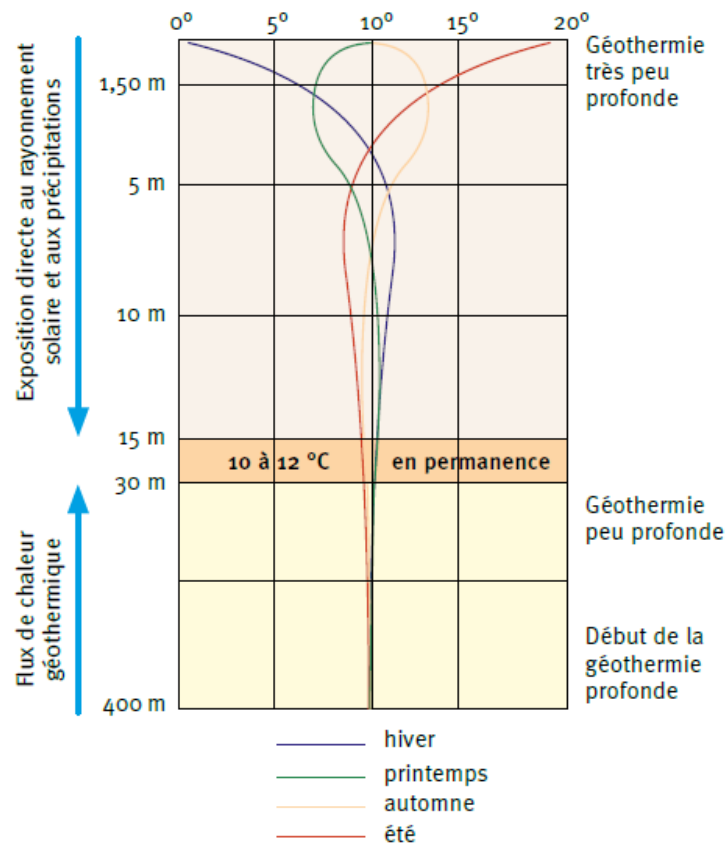


FIGURE 2.2 – Évolution de la température souterraine en géothermie peu profonde. (Source : [4])

### 2.1.1 Histoire de la géothermie

Depuis la préhistoire, les eaux naturellement chaudes s'écoulant de sources situées dans des régions volcaniques ont été utilisées par l'Homme pour se chauffer, se baigner et cuire des aliments. Les bains thermaux ont ensuite été développés par les romains et constituaient des lieux d'échange et de convivialité. La première distribution de chaleur thermique a été créée en France au début XIV<sup>ème</sup> siècle à Chaudes-Aigues (Cantal) à partir de la source du Par, réputée être la plus chaude d'Europe ( $82^{\circ}\text{C}$ ). Un réseau de tuyauteries en bois desservait par gravité quelques maisons du village. Il était géré, moyennant le prélèvement de taxes, par le seigneur local.

A la même époque, près de Volterra dans la région volcanique de la Toscane en Italie, des petits bassins d'eau chaude salée de plus de 100°C, appelés lagoni, sont exploités pour récupérer du soufre, de l'alun et du vitriol. En 1818, le français François Lardarel, qui donna naissance au village de Lardarello, invente la technique du "lagoni couvert" pour capter la vapeur d'eau à une pression suffisante pour alimenter des chaudières. [5]

### 2.1.2 Statistiques

La géothermie s'est considérablement développée au cours des dernières années et des environnements très variés sont à présent envisagés pour la mise en place de systèmes de chauffage et/ou de refroidissement. La preuve en est que le nombre de systèmes géothermiques a considérablement augmenté partout dans le monde, y compris en Belgique, avec la mise en place de systèmes géothermiques de très basse température (Lund et al., 2011 [6]).

Au niveau mondial, la géothermie est de plus en plus exploitée, que ce soit pour la production de chaleur ou d'électricité. 88 pays produisent aujourd'hui de la chaleur géothermique et 29 pays produisent de l'électricité géothermique.

Pays	Production de chaleur [TWh/an]
Argentine	335
Japon	8 534
Belgique	407
Canada	4 031
Chine	123 192
France	4 799
Allemagne	8 094
Turquie	15 162
Etats-Unis	42 447
Suisse	3 692
Suède	17 333

TABLE 2.1 – Production mondiale de chaleur géothermique (Review 2015-2020) (Source : [7])

### 2.1.3 Les bénéfices d'un système géothermique

D'un point de vue thermique, l'utilisation de la géothermie nous permet de produire de la chaleur durant l'hiver et du froid durant l'été, ainsi que le sol joue un rôle tampon à travers le stockage saisonnier de la chaleur. En hiver, le sol est plus chaud que l'air ambiant ce qui nous permet d'extraire de la chaleur. En été, le sol est plus froid que l'air ambiant ce qui permet d'injecter la chaleur dans le sol qui est un dissipateur de chaleur dans de cas (Voir figure [2.3]). De plus la chaleur injectée en été peut être réutilisée en hiver car le nuage de chaleur produit reste à proximité de la zone d'injection.

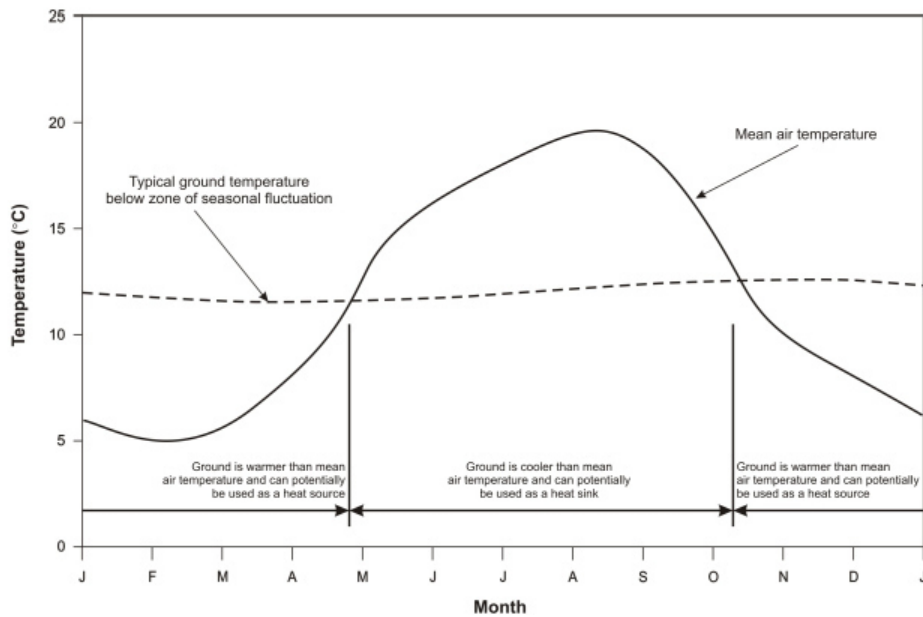


FIGURE 2.3 – Avantage thermique (Source : [8])

D'un point de vue environnementale, cette énergie provient de ressources naturelles et se reconstituent naturellement qui fait d'elle une source d'énergie renouvelable.

Ainsi un autre avantage se manifeste dans le fait que cette énergie est disponible partout dans le monde.

## 2.2 Les systèmes géothermiques

### 2.2.1 Les différents types de systèmes géothermiques

Nous pourrions catégoriser les systèmes géothermiques en fonction soit de la profondeur soit de la température du réservoir de chaleur. Sur ce site, une classification en fonction de la profondeur est adoptée :

- Catégorie I : La géothermie très peu profonde : max. 5 m de profondeur ;
- Catégorie II : La géothermie peu profonde : de 50 à 300 m de profondeur ;
- Catégorie III : La géothermie profonde : à plus de 1000 m de profondeur.

Les deux premières catégories regroupent les systèmes géothermiques pour lesquelles un usage indirect de la chaleur est effectué. A ces faibles profondeurs les puissances thermiques dégagées ne suffisent en effet pas pour alimenter directement un bâtiment en chauffage ou pour générer de l'électricité. Il est donc nécessaire d'avoir recours à une pompe à chaleur en surface pour fournir au bâtiment l'énergie nécessaire au chauffage ou au refroidissement.

Au contraire, la 3ème catégorie permet, à partir de la chaleur dégagée, d'alimenter des systèmes de chauffage urbain ou d'actionner des turbines en vue d'une production d'électricité. Il s'agit dans ce cas d'usage direct de la chaleur du sous-sol.



La profondeur des installations dépend de la puissance thermique requise, de l'espace en surface disponible et des caractéristiques géothermiques du sous-sol. Les limites de profondeur séparant les différentes catégories sont donc purement indicatives et peuvent être adaptés d'un système à l'autre[9].

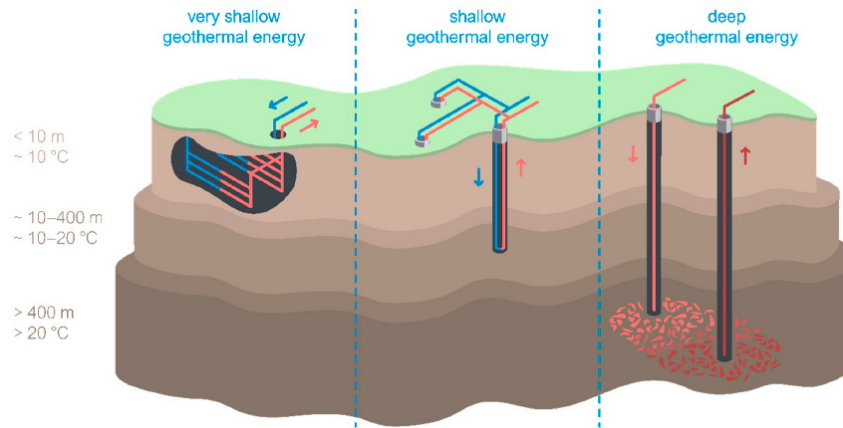


FIGURE 2.4 – Différentes grandes catégories de géothermie (Source : [10])

Les différentes catégories et leurs caractéristiques en termes de profondeur d'extraction, de températures concernées et d'utilisations sont synthétisées dans ce tableau [2.2]

Catégorie	Profondeur [m]	Température [°C]	Enthalpie	Types	Sol/Roche	Eau dans le sous-sol
Catégorie I	1 à 5	-10 à 25	Très basse énergie	Capteurs horizontaux et corbeilles	Sol meuble	Présence d'eau non- recommandée
Catégorie II Systèmes fermés	10 à 30	0 à 25	Très basse énergie	Pieux énergétiques et autres géostructures	Sol meuble	Présence d'eau non- indispensable
Catégorie II Systèmes fermés	50 à 300	0 à 25	Très basse énergie	Sondes verticales	Sol meuble ou roche poreuse	Présence d'eau non- indispensable
Catégorie II Systèmes ouverts	10 à 100	0 à 25	Très basse énergie	Puits (puits de pompage)	Sol perméable saturé (aquifère)	Aquifère
Catégorie III	1000 à 2000	50 à 100	Basse énergie	Puits (puits de pompage)	Roche poreuse ou fracturée	Eau chaude
Catégorie III	4000 à 5000	100 à 200	Energie intermédiaire	Puits (puits de pompage)	Roche fracturée	Eau chaude ou vapeur
Catégorie III	1500 à 3000	>200	Haute énergie	Puits de pompage / puits de vapeur	Roche fracturée	Vapeur

TABLE 2.2 – Les différentes catégories et leurs caractéristiques en termes de profondeur d'extraction, de températures concernées et d'utilisations [11]

### 2.2.2 Géothermie à basse température

La géothermie dite « basse température » prélève la chaleur du sous-sol à basse température - de 0°C à 25°C - jusqu'à 300 mètres de profondeur pour les systèmes fermés et une centaine de mètres au cas d'un système ouvert. Ce niveau de température ne permet

pas une utilisation directe de la chaleur par simple échange mais nécessite l'ajout d'une pompe à chaleur (PAC) en surface qui permet d'obtenir la température désirée.

### Catégorie des systèmes géothermiques à basses températures

Généralement, les systèmes géothermiques de basse température se divisent en deux grandes catégories :

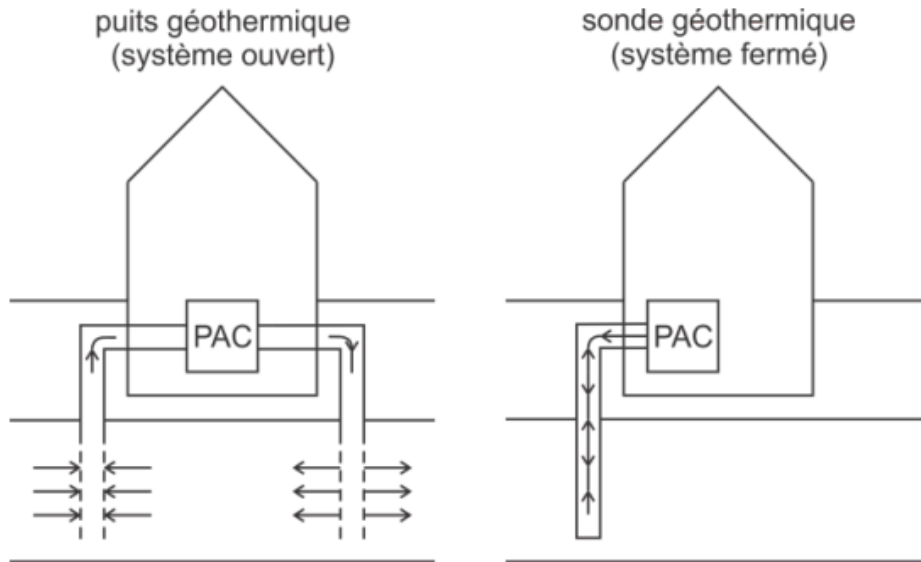


FIGURE 2.5 – Système ouvert et fermé (Source : [8])

- **Les systèmes ouverts :** Dans le cas des systèmes ouverts (voir figure [2.6]), deux puits d'eau souterraine sont réalisés dans le sol. L'un est un puit d'extraction qui permet de puiser l'eau dont sera extraite la chaleur. L'autre est un puit de réinjection qui sert à renvoyer l'eau refroidie dans le sol. L'eau se réchauffera ensuite et pourra être à nouveau utilisée pour chauffer le bâtiment durant l'hiver. Le système peut également être utilisé pour refroidir le bâtiment en été. La chaleur extraite du bâtiment est alors réinjectée dans l'eau du sol. Ces systèmes sont également appelés systèmes de stockage chaud/froid (SCF) ou aquifer thermal energy storage (ATES).[4]

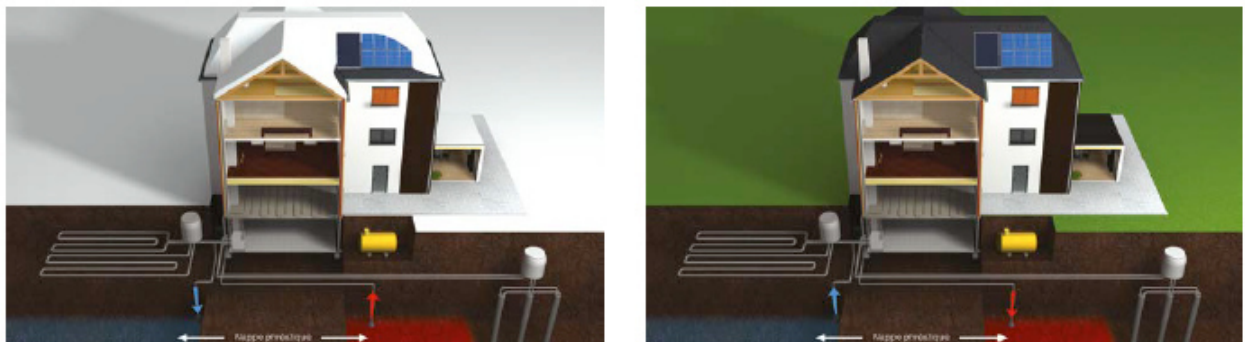


FIGURE 2.6 – Système ouvert durant la période de chauffe/refroidissement (Source : [4])

- **Les systèmes fermés :** Alors que l'eau souterraine est le vecteur énergétique dans les systèmes ouverts, cette fonction est reprise dans les systèmes fermés par un autre fluide caloporteur (généralement un mélange d'eau et d'antigel) qui s'écoule dans un réseau souterrain de canalisations appelées 'échangeurs de chaleur'.

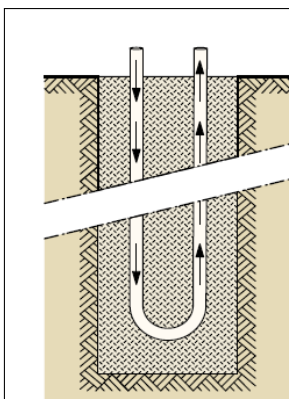
### 2.2.3 La géothermie basse température en système fermé

Les échangeurs horizontaux :



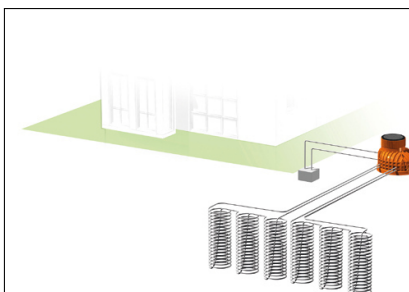
Les échangeurs géothermiques horizontaux sont constitués de boucles en matière synthétique horizontales enfouies à une profondeur de 1,2 à 2 m

Les échangeurs verticaux en U :



Des forages de 15 à 20 cm de diamètre sont réalisés dans le sol jusqu'à une profondeur courante de 100 à 120 m. Ceux-ci accueillent des tuyaux synthétiques en forme de U (voir figure) dans lesquels s'écoulera un liquide (généralement un mélange d'eau et d'antigel) qui échangera l'énergie avec le sous-sol.

Les échangeurs spirales :



L'échangeur géothermique spiralé (voir figure) est généralement mis en oeuvre à une profondeur maximale de 3 mètres, mais il est toutefois possible d'augmenter ce chiffre en attachant différents échangeurs les uns aux autres. Le rendement de ce système se situe entre celui des échangeurs géothermiques horizontaux et celui des échangeurs de chaleur verticaux en U.

### 2.2.4 Intégration d'un système géothermique dans un bâtiment

Pour qu'un système géothermique échange de l'énergie avec le sous-sol, nous avons besoin des trois composantes suivantes :

- Une pompe à chaleur (PAC) [2.2.5] pour augmenter ou diminuer la température.
- La boucle sol.
- La boucle bâtiment.

La boucle sol consiste à faire circuler en circuit fermé un fluide, qui est souvent de l'eau avec un antigel, dans un réseau de tubes qui est acheminé à la pompe à chaleur PAC. Ensuite, la PAC transfère à son tour cette chaleur puisée dans la boucle sol vers le bâtiment à chauffer en augmentant sa température ( en cas de chauffage) ou la PAC injecte la chaleur en provenance du bâtiment vers la boucle sol en diminuant le niveau de température ( en cas de refroidissement).

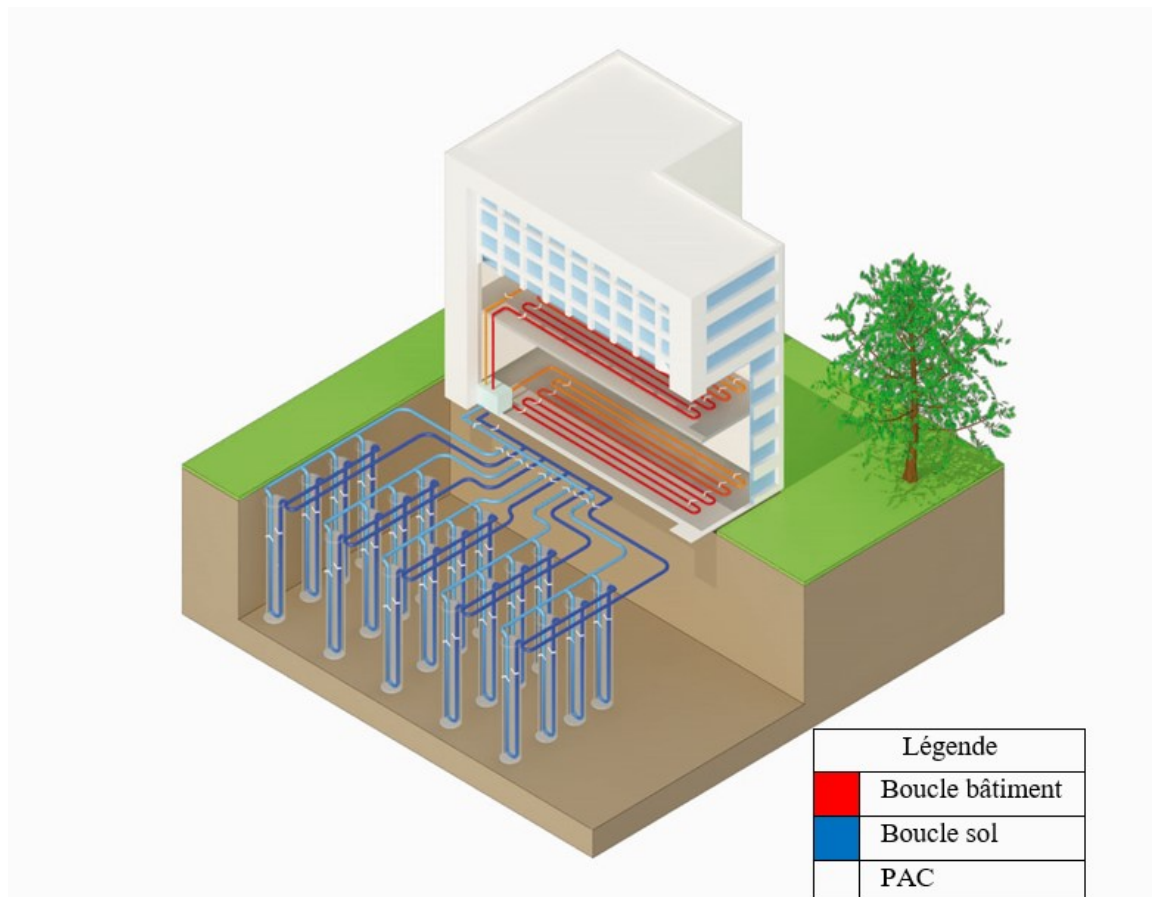


FIGURE 2.7 – Composition d'une installation géothermique. (Source :ADEME et BRGM)

### 2.2.5 Pompe à chaleur

La pompe à chaleur est considérée comme le coeur d'une installation géothermique. Elle permet de capter l'énergie du sous-sol et de la transférer au système de chauffage ou l'inverse autrement dit elle permet aussi de capter l'énergie du bâtiment pour la transférer vers le sous-sol.

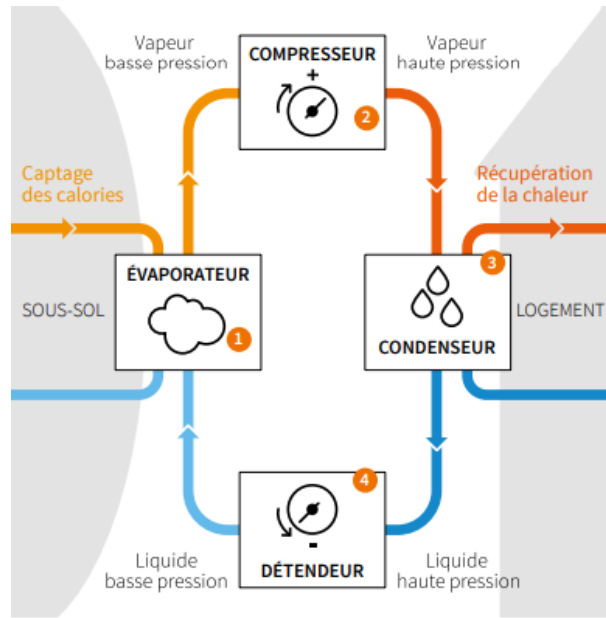


FIGURE 2.8 – Cycle thermodynamique d'une PAC Source : (Source : [9])

1. Évaporation : Le fluide frigorigène est évaporé à basse pression et à basse température, en utilisant l'énergie de la source de chaleur.
2. Compression : La vapeur du fluide frigorigène est comprimée à une pression supérieure au moyen du compresseur, ce qui entraîne une élévation de la température.
3. Condensation : La vapeur du fluide frigorigène à haute pression est condensée à haute température puis la chaleur dissipée dans l'émetteur.
4. Détente : Le fluide frigorigène liquide est détendu depuis une pression élevée à une pression basse. Il s'en suit une chute de la température, et le cycle recommence.

La performance de la pompe à chaleur est définie par le coefficient de performance (COP). Il exprime le rapport entre l'énergie thermique fournie par la pompe à chaleur,  $E_{cal}$  [kWh], (pour chauffer ou refroidir le bâtiment) et l'énergie (généralement électrique),  $E_{elec}$  [kWh], fournie au système pour faire fonctionner la pompe à chaleur et nécessaire au fonctionnement du compresseur.

Avec une installation de qualité et correctement dimensionnée, le sous-sol fournit environ 80% de l'énergie thermique à la sortie de la pompe à chaleur. Le 20% restant est fourni à la pompe à chaleur sous forme d'électricité, qui correspond à un COP qui vaut 4.

### 2.2.6 Intégration d'un système géothermique dans un réseau de chaleur basse température

Un réseau de chaleur à basse température consiste à échanger de chaleur et de froid entre des bâtiments connectés au réseau thermique via le système d'émission. Le réseau est conçu comme une boucle fermée qui réutilise l'énergie autant que possible : les bâtiments chauffés fournissent du froid au système qui est transmis par la pompe à chaleur à la boucle du sol, tandis que les bâtiments refroidis transmettent leur chaleur excédentaire au réseau via la pompe à chaleur. Nous pourrions le voir comme un réseau circulaire.

Les boucles géothermiques jouent un rôle de stabilisateur de la température du réseau. Puisque les besoins en chaud et en froid des différents bâtiments ne sont jamais parfaitement équilibrés, par échange de chaleur avec le sous-sol, les boucles géothermiques alimentent le réseau de chaleur avec une température relativement constante. Le sous-sol amène donc une inertie importante au réseau de chaleur afin d'éviter des fluctuations de température trop importante dans le réseau en cas de fortes demandes énergétiques des bâtiments.

## 2.3 Paramètres thermiques du sol

La quantité d'énergie ou la puissance qui peut être extraite du sol par unité temps et la vitesse à laquelle le sol récupère la température repose sur plusieurs facteurs détaillés par la suite et qui sont :

- Conductivité thermique
- Capacité thermique
- Diffusivité thermique

### 2.3.1 Conductivité thermique du sol :

La Conductivité thermique ( $\lambda$ ) [ $W/(mK)$ ] est un flux thermique qui, en régime stationnaire, passe à travers le matériau, par unité de longueur et par degré de différence de température dans ce matériau.

L'équation de conduction thermique, également appelée équation de Fourier s'écrit :

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (2.1)$$

Avec

$\vec{q}$  le vecteur densité de flux de chaleur en [ $W/m^2$ ].

$\nabla T$  le gradient de température [ $K/m$ ].

La conductivité thermique du sol dépend de la composition minéralogique, de la porosité, de la teneur en eau et de la température. Ainsi, elle diminuera en présence d'une porosité croissante (volume de pores), mais augmentera si les pores sont saturés d'eau.

La Conductivité thermique du sol a un impact important sur le dimensionnement d'un champ de forage géothermique.

En effet, une conductivité thermique importante signifie que l'énergie est rapidement transportée vers l'échangeur géothermique.

La conductivité thermique moyenne d'un massif de sol, constitué de plusieurs couches traversées par un échangeur géothermique, peut-être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\lambda = \frac{\sum \lambda_i \cdot D_i}{\sum D_i} \quad (2.2)$$

Où  $D_i$  est l'épaisseur de la couche  $i$ .

La conductivité thermique peut être déterminée à une certaine profondeur de forage au moyen d'un test de réponse thermique, d'essais laboratoires ou par le biais d'abaques.

### Test de réponse thermique

Le TRT est une opération préliminaire au dimensionnement d'un champ de sondes. Il se compose d'une série de mesures qui s'étalent sur plusieurs jours ([12]), il vise à estimer les propriétés thermiques des terrains traversés par une sonde géothermique verticale.

— Concept :

Le concept du test est basé sur la réponse du sous-sol après l'injection d'une puissance thermique au droit d'une sonde d'essai en mesurant la température de l'eau entrant et sortant de la sonde.

Une première phase consiste à faire circuler un fluide dans la sonde sans chauffage. La mesure de la température du fluide à la sortie de la boucle permet de déterminer la température initiale du sous-sol.

Une seconde phase consiste à injecter de façon constante de la chaleur dans le fluide circulant dans la sonde. La différence de température du fluide mesurée en continu à l'entrée et à la sortie de la boucle permet de déterminer la conductivité thermique du sous-sol et la résistance de la sonde.



— Dispositif de test :

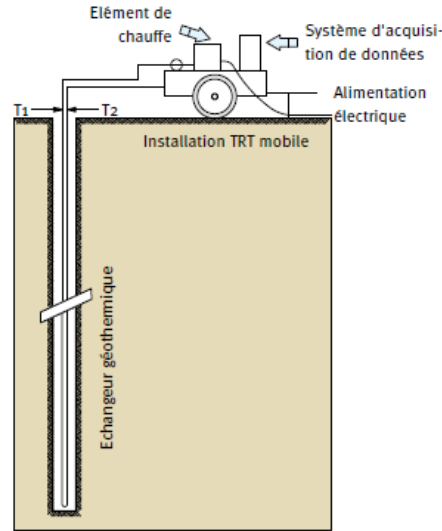


FIGURE 2.9 – Configuration d'essai d'un Test de réponse thermique (Source : [4])

— Résultats :

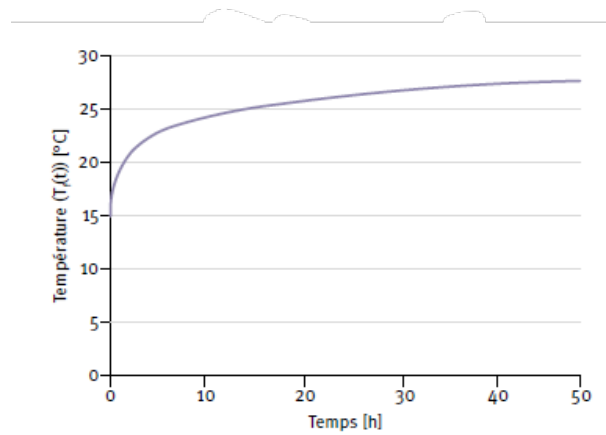


FIGURE 2.10 – Exemple fictif des résultats d'un TRT. (Source : [4])

La courbe a l'équation suivante :

$$T_f(t) = T_0 + k \cdot \ln(t) + m \quad (2.3)$$

Avec  $k$  est la pente de l'évolution de la température selon le logarithme népérien du temps et vaut

$$k = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot H}$$

L'évolution de la température est liée à l'inertie thermique du matériau.

Il existe aussi le E-TRT qui permet de faire une mesure local, où l'énergie thermique est fournie par un câble de cuivre, qui est placé le long de la sonde et connecté à une source d'énergie. À partir de la tension fournie et du courant électrique, l'énergie thermique émise vers le sol peut être calculée. On peut ainsi en déduire un profil de conductivité thermique tout le long du forage.

Contrairement au TRT classique qui donne une valeur moyenne de la conductivité sur l'ensemble de la longueur du forage.

### Essais laboratoire

Plusieurs essais peuvent être réalisés au laboratoire afin de déterminer la conductivité thermique du sol, nous pourrions citer les essais suivants :

- Thermal needle probe (Sonde thermique à aiguille) :

Cette méthode est largement appliquée pour les échantillons de sol et de roche tendre. Théoriquement, on mesure l'élévation de température dans un milieu homogène infini due à une source linéaire infinie. L'essai consiste à introduire dans l'échantillon du sol une aiguille qui injecte un flux de chaleur (par effet joule) et mesure l'élévation de température à la surface de l'aiguille. La connaissance de la vitesse d'élévation de la température et la puissance thermique d'entrée permet de déduire la conductivité thermique du sol (ASTM D 5334-00, 2000). En fait il s'agit d'un TRT miniature puisqu'on injecte un flux de chaleur et on mesure un  $\Delta T$ .

- The guarded-hot-plate ( Test de la double plaque) :

La surface verticale de l'échantillon est protégée par un matériau isolant. Ensuite, une puissance  $Q$  connue est appliquée à la plaque chauffante plaque chaude tandis que des thermocouples enregistrent la différence de température à travers l'échantillon, Une fois l'état d'équilibre atteint, la conductivité thermique est dérivée.

### Abaques

Afin d'évaluer la conductivité thermiques, Il existe des tableaux qui reprennent les valeurs de conductivité thermique selon le type de la roche.

Le tableau est présenté dans l'Annexe [B].

### 2.3.2 Capacité thermique :

La capacité thermique ( $c$ ) [J/K] est la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température du médium d'un degré.

On parle souvent de la capacité thermique massique ou spécifique ( $c_p$ ) [J/(kg.K)] qui exprime la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter d'un degré (avec une pression constante) la température d'un médium présentant une masse unitaire.

On parle aussi de la capacité thermique volumique ( $\rho c_p$ ) [ $J/(m^3 K)$ ] est également utilisée à de nombreuses reprises (volume constant). Il s'agit de la quantité de chaleur [J] devant être ajoutée à un médium présentant un volume unitaire [ $m^3$ ] pour élever sa température d'un degré [K]. Dans la plupart des cas, il est acceptable de la calculer à partir de la porosité ( $n$ ) et le degré de saturation du sol ( $S_r$ ) [13] par la formule suivante :

$$c_{sol} = c_{grains} \cdot (1 - n) + c_{eau} \cdot n \cdot S_r + c_{air} \cdot (1 - S_r) \cdot n \approx c_{grains} \cdot (1 - n) + c_{eau} \cdot n \cdot S_r \quad (2.4)$$

### 2.3.3 Diffusivité thermique :

La diffusivité thermique ( $\alpha$ ) [ $m^2/s$ ] peut être calculée comme suit :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad (2.5)$$

Le résultat constitue en quelque sorte une mesure de l'inertie thermique d'un matériau et un paramètre essentiel pour la caractérisation du transport thermique transitoire. Une faible conductivité thermique diminue la diffusivité thermique et, par conséquent, la vitesse à laquelle l'objet se réchauffe ou se refroidit.

La diffusivité thermique diminue si une quantité plus importante d'énergie (chaleur) doit être ajoutée au corps pour modifier sa température (et donc pour une valeur plus élevée de la capacité thermique volumique).

## 2.4 Dimensionnement des systèmes géothermiques

Comme dans ce travail de fin d'étude, nous nous limiterons à des systèmes géothermiques fermés et plus précisément composés d'échangeurs verticaux, nous expliquerons la raison au fur et à mesure dans les chapitres qui suivent.

Nous pourrions utiliser la norme néerlandaise Iso 73 [14] pour concevoir notre champ de sondes géothermiques. Cette méthode de conception nous permet d'évaluer une longueur totale préliminaire des sondes en se basant sur la charge thermique qui sera extraite ou fournie au sol et la capacité de chauffage de la pompe à chaleur en tenant en compte le coefficient de performance de la pompe à chaleur ainsi que les propriétés thermiques du sol. Cette longueur ne dépend pas de plusieurs paramètres qui seront pris en compte via des facteurs correcteurs, pour finalement obtenir la longueur totale des sondes géothermiques totale.

Nous synthétisons dans l'organigramme figure [2.11] la méthodologie pour avoir une idée sur la procédure, que nous détaillerons dans les lignes qui suit.

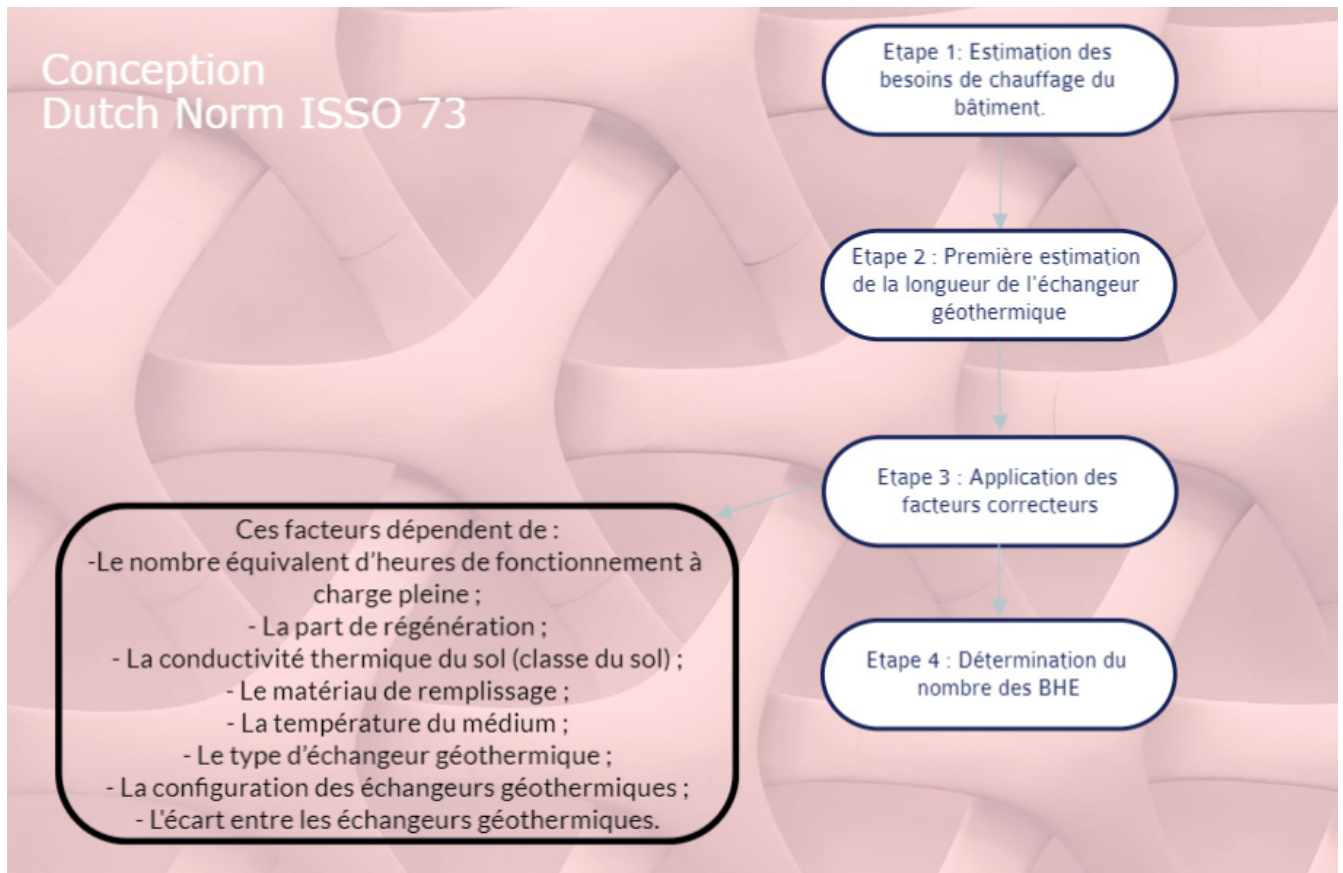


FIGURE 2.11 – Organigramme de la méthode de conception à l'aide de la norme ISSO 73

### 2.4.1 Première étape : Détermination des besoins thermiques

La tout première étape consiste à évaluer les besoins en chaleur  $[Q_{besoin}]$  pour le chauffage des bâtiment ainsi que la puissance nécessaire  $[P_{heating}]$

### 2.4.2 Introduction de la pompe à chaleur et calcul de la puissance d'extraction

La puissance maximale devant être extraite est calculée en introduisant le coefficient de performance de la pompe à chaleur qui va nous permettre de déterminer la quantité de chaleur qui sera extraite du sol :

$$P_{ground} = \frac{P_{heating}}{COP} \cdot (COP - 1) \quad (2.6)$$

où :

$P_{ground}$  = la capacité d'évaporation de la pompe à chaleur  $[W]$

$P_{heating}$  = la capacité de chauffage de la pompe à chaleur  $[W \text{ ou } kW]$

COP = Coefficient de performance de la pompe à chaleur

Dans le cas de refroidissement, l'équation [2.6] devient :

$$P_{\text{ground}} = \frac{P_{\text{heating}}}{COP} \cdot (COP + 1) \quad (2.7)$$

### 2.4.3 Deuxième étape : Première estimation de la longueur de l'échangeur géothermique

Nous pourrions à priori faire une première estimation des échangeurs géothermiques.

$$L = \frac{P_{\text{ground}}}{P_{\text{spécifique}}} \quad (2.8)$$

où  $P_{\text{spécifique}}$  = la puissance spécifique d'extraction [W/m] (Voir figure [2.12])

Ensuite la puissance d'extraction spécifique qui dépend de la régénération du sol et du nombre d'heures de fonctionnement de la pompe à chaleur à charge pleine, ce nombre d'heures peut-être aussi calculé à l'aide de l'équation [2.9].

$$t = \frac{Q_{\text{besoin}}}{P_{\text{heating}}} \quad (2.9)$$

Avec  $Q_{\text{besoin}}$  les besoins en chaud.

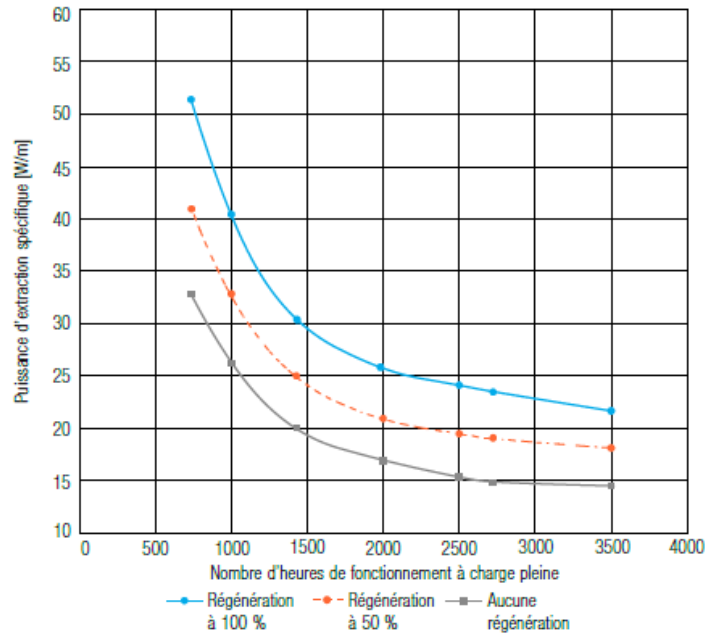


FIGURE 2.12 – Relation entre le nombre d'heures de fonctionnement à charge pleine, la régénération et la puissance d'extraction spécifique (Source : [4] )

### 2.4.4 Troisième étape : Application des facteurs correcteurs

Comme la première longueur des échangeurs est calculée en ne tenant compte que des puissances et en négligeant plusieurs paramètres, il est recommandé par la suite de venir corriger cette longueur totale sur la base d'une série de paramètres.

#### Facteurs de correction relatif au sol

Ces facteurs de correction tiennent en compte :

- La conductivité thermique du sol.
- Le matériau de remplissage :  
l'espace entre le forage et les sondes est comblé par un matériau. Ceci permet d'assurer un bon contact thermique entre la sonde et le terrain.
- La température du médium :  
La valeur de conception de la température du médium est définie comme la moyenne des températures d'entrée et de sortie du fluide. Plus la différence entre la valeur de conception de la température du médium et la température du forage est grande, plus le potentiel de la capacité d'extraction d'énergie augmente.
- Le type d'échangeur géothermique :  
Toutes les sondes géothermiques sont formées par des tubes formant un simple-U ou un double-U.
- La configuration des échangeurs géothermiques.
- L'écart entre les échangeurs géothermiques :  
La distance entre les puits dans le cas de stockage de chaleur est généralement comprise entre 4 et 6 m

Dans l'Annexe [A] , il a été repris les tables et les courbes qui permettent d'obtenir ces facteurs de correction.

### 2.4.5 Détermination du nombre des sondes géothermiques

Après la multiplication de la longueur des sondes totales par les facteurs de correction respectif nous obtenons la nouvelle longueur corrigée que nous divisons par la profondeur maximale du forage pour obtenir le nombre de sondes.

$$N_{BHE} = \frac{L_{corrected}}{L_{BHE}} \quad (2.10)$$

Pour une installation standard la profondeur des forages peut varier de 30 à 200 m.

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, il a été présenté d'une manière globale la géothermie, son histoire et les statistiques, pour passer ensuite aux systèmes géothermiques et détailler les différents types et les catégories.

Ensuite, nous avons présenté aussi les différents paramètres thermique du sol utiles pour notre étude de préfaisabilité, ainsi que les moyens pour déterminer la conductivité thermique du sol.

Finalement, nous avons exposé la norme pour le prédimensionnement d'un champ de sondes verticales que nous allons mettre en pratique dans les deux chapitres [5] et [6].

# Chapitre 3

## Cadre du projet

Étant donné que la quantité de chaleur qui pourrait être extraite du milieu souterrain dépend de plusieurs paramètres et variables caractéristiques de la zone concernée, ce chapitre passe en revue une investigation géologique et hydrogéologique dans la zone étudiée.

Cette partie est basé sur plusieurs ressources, les cartes hydrogéologies [15] et le Cahiers du Sart-Tilman, ainsi que les résultats des investigations géologiques réalisés sur le même site dans le cadre des travaux de recherche de G. Radiati ([16]) afin de déterminer les propriétés thermiques du sol.

### 3.1 Cadre géographique

Nous commençons par contextualiser géographiquement la zone qui sera étudiée par la suite. La zone d'étude est située dans la région wallonne au Sud de la ville de Liège, au Sud-Ouest du centre du village Sart-Tilman. plus particulièrement dans l'emprise du campus du Sart-Tilman situé au quartier Polytech (Voir figure [3.1]).



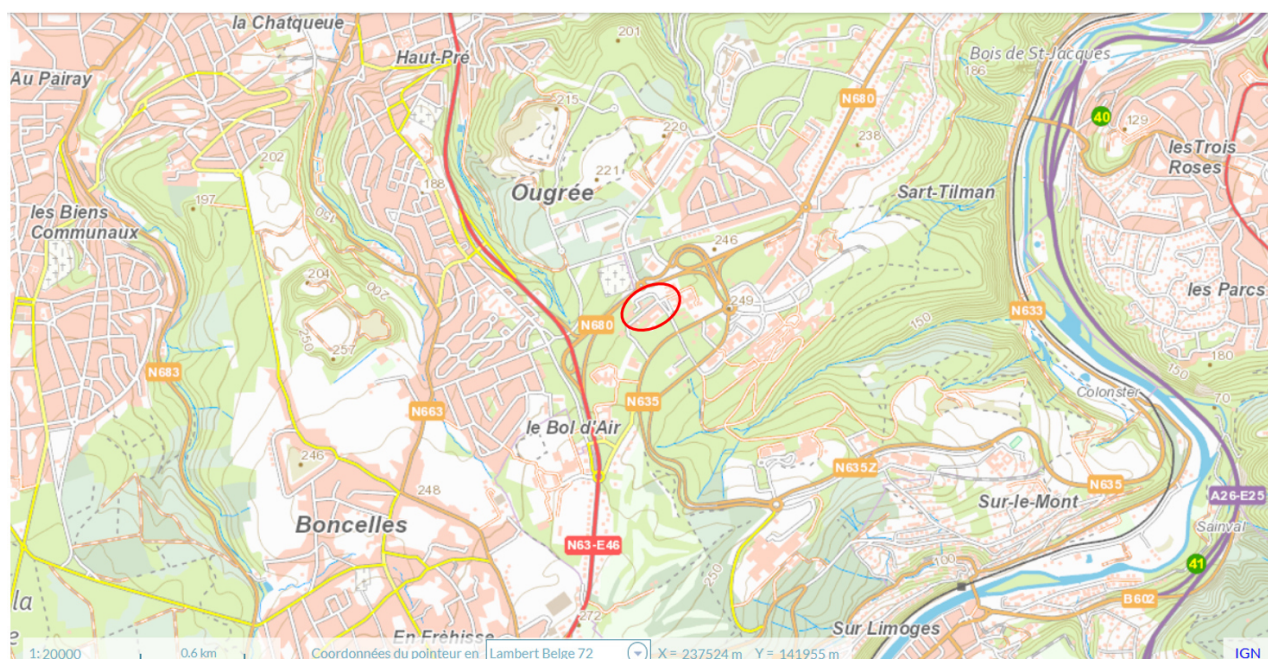


FIGURE 3.1 – Extrait de la carte IGN - 1/20 000ème (Source : [17])

### 3.1.1 L'emprise du projet

Le site est composé de plusieurs bâtiments qui appartiennent à l’Uliège dont nous pourrons voir la disposition sur la figure [3.2].

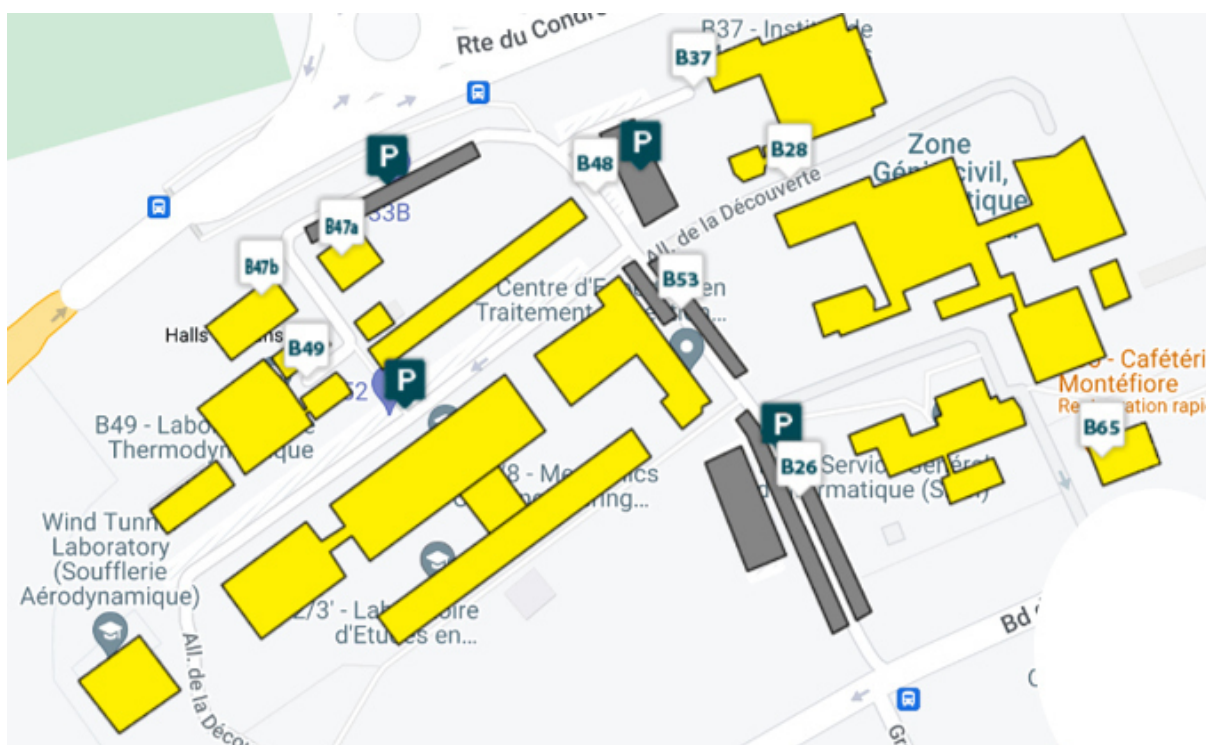


FIGURE 3.2 – Les bâtiments

- B52 : Mécanique et Génie civil
- B53 : Aquapôle
- B28 : Institut Montefiore (B28)
- B47 : Hall de Transit
- B48 : Laboratoire d'Hydrodynamique - Bassin de Carènes
- B49 : Institut de Thermodynamique
- B65 : Cafétéria Polytech
- B37 : Institut de Mathématiques
- B26 : Service Général d'Informatique (SEGI)

### 3.1.2 Historique des bâtiments

D'après les anciennes photographies aériennes disponibles sur le Géoportail de la Wallonie, les bâtiments B28, B37, B48, B47, B26 et B49 ont été construits entre 1971 et 1994 ( voir figure [3.3] et figure [3.4]). Dans les années 2000, le bâtiment B52 a été construit. Le B65 a été construit après l'année 2009. Avant l'implantation des bâtiments, la zone était boisée.



FIGURE 3.3 – Photo aérienne prise en 1971



FIGURE 3.4 – Photo aérienne prise en 1994



FIGURE 3.5 – Photo aérienne prise en 2001



FIGURE 3.6 – Photo aérienne prise en 2009





FIGURE 3.7 – Photo aérienne prise en 2016    FIGURE 3.8 – Photo aérienne prise en 2021

Nous nous intéressons à l’historique des bâtiments car leurs besoins énergétiques peuvent être proportionnellement lié à leur ancienneté.

### 3.1.3 Surface des bâtiments

Nous reprenons la surface de plancher utile de chaque bâtiment (Voir tableau [3.1]).

Bâtiment	Surface [ $m^2$ ]
B52	28 252
B48	1 365
B28	12 806
B37	6 130
B53	3 339
B26	1 629
B65	380
B47 et B49	3 706

TABLE 3.1 – Les surfaces des bâtiments

## 3.2 Cadre géologique

D’après la carte géologique du Sart-Tilman [3.9] et la coupe géologique (voir Figure [3.10], la zone d’étude se place à l’affleurement des sable oligocène<sup>1</sup> dans les 8-10 premiers mètres de profondeur recouvrant une couche d’Emsien 2-3 Assise inférieure<sup>2</sup> qui passe par une assise de transition entre l’Emsien inférieur et l’Emsien moyen et supérieur suivi par une couche de l’Emsien 1.

En raison d’existante de plusieurs voiries sur le site, il est fort probable d’identifier une couche de remblais d’aménagement en surface.

1. Sables avec un niveau graveleux parfois dédoublé contenant des cailloux de quartz et de silex.

2. Composé d’un grand pourcentage de grès, mélangé avec du grès schisteux, schistes gréseux et du schistes d’une couleur lie de Vin

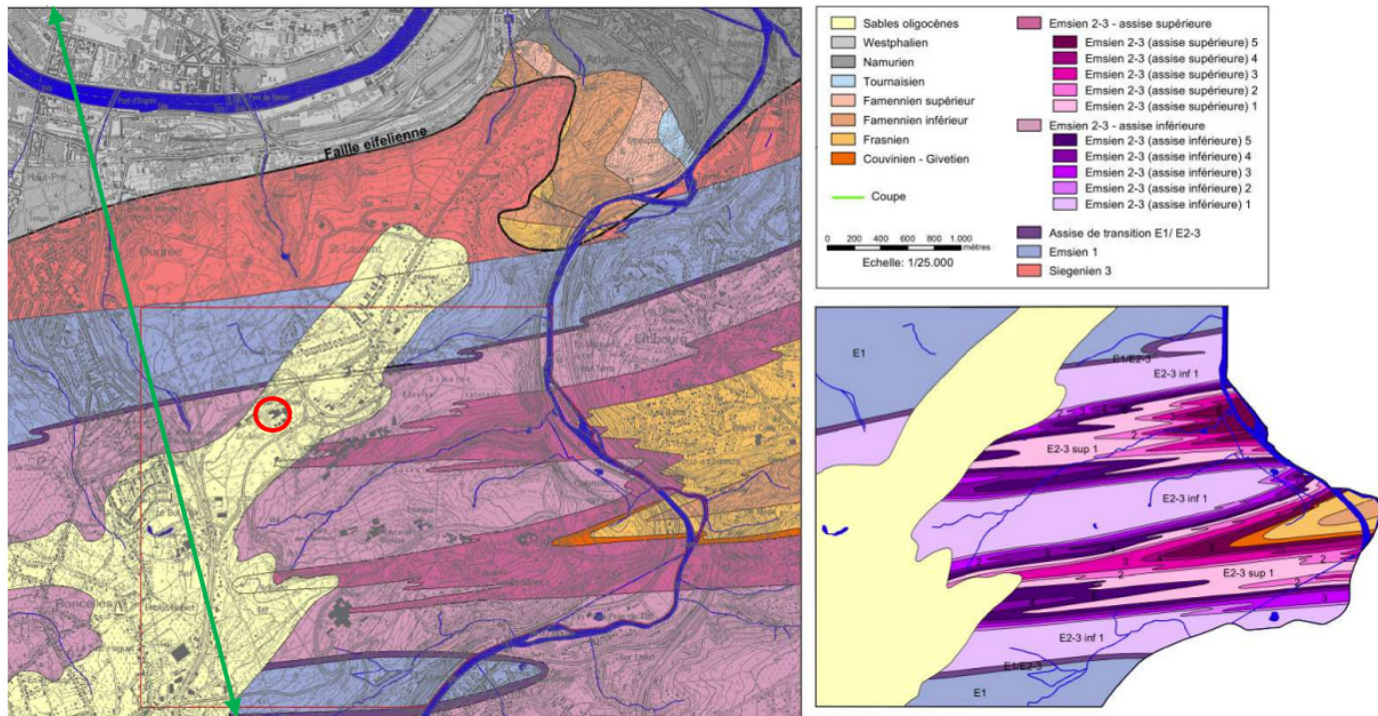


FIGURE 3.9 – Carte géologique du Sart-Tilman (Source : [15])

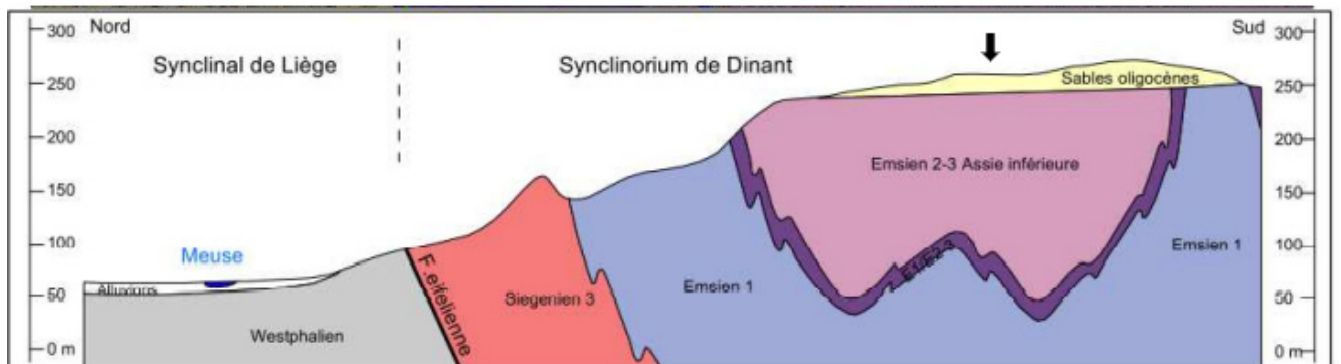


FIGURE 3.10 – Coupe géologique (Adapté de : [15])

### 3.3 Cadre hydrogéologique

Selon la figure [3.9], dans la zone du Sart-Tilman il existe un aquifère des sables de l'Oligocène qui contient des nappes perchées. D'après la notice, la réserve de ces nappes dépend de leur extension et de leur puissance. Lorsque les terrains à côté sont suffisamment perméables, la nappe des sables participe à l'alimentation des nappes de ces terrains (Source : [15]).

La porosité totale est comprise entre 33 et 60% avec une moyenne de 47%, et une conductivité hydraulique comprise entre  $7 \times 10^{-5}$  et  $1 \times 10^{-7}$  m/s (Monjoie, 1970).



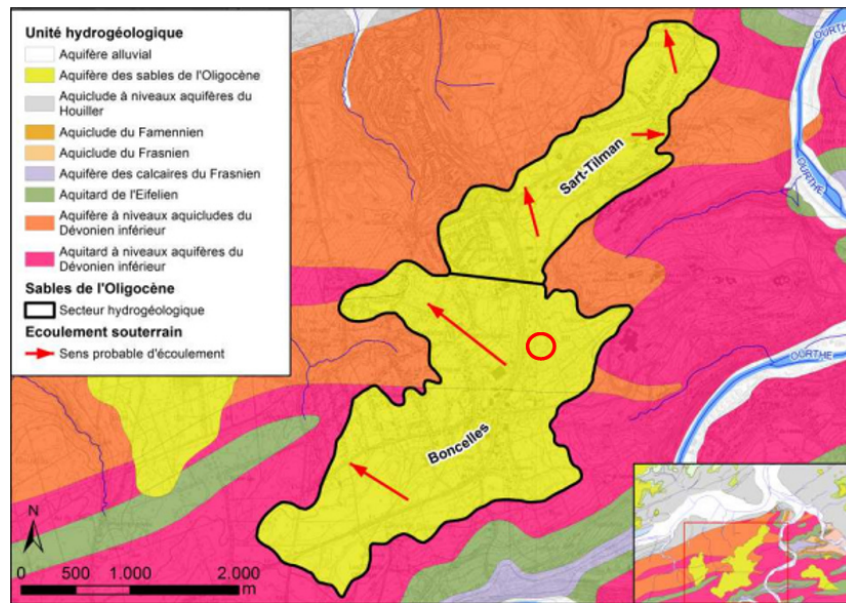


FIGURE 3.11 – Cadre hydrogéologique (Source :[15])

Tout ceci reste insuffisant pour déterminer les propriétés thermiques de notre sous-sol. Par conséquent, dans ce qui suit nous aurons recours à la thèse de doctorat de G. Radioti [16] vu qu'elle présente des données de terrain d'une grande utilité.

### 3.4 Relevés géologiques et géothermiques [16]

De façon à pouvoir répondre aux objectifs fixés, 4 forages géologiques ont été réalisés (Voir figure[3.12]), d'une profondeur qui varie entre 86 et 95 m, pour relever la nature des terrains en réalisant des diagraphies Gamma-Ray et scanner de forage, et en prélevant des échantillons pour les essais laboratoires.

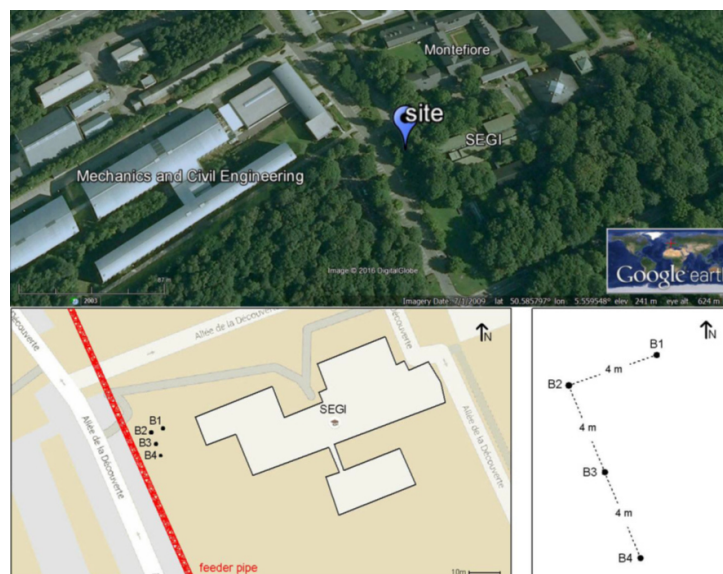


FIGURE 3.12 – Implantation des forages réalisés (Source :[16])

### 3.4.1 Forages géologiques

Les paramètres (Vitesse d'avancement, pression d'injection...) des quatres forages réalisés permettent d'identifier de façon interprétative les couches lithologiques suivantes :

- Sables et gravier.
- Grés fracturé.
- Une alternation entre Grés schisteux et Grés Limoneux.

Ces résultats confirment bien la lithologie proposée par la carte géologique [3.9].

### 3.4.2 Diagraphie de forage

Ensuite, un scanner de forage a été descendu dans les quatre forages afin d'aboutir à des images continues à haute résolution qui montrent la géologie et les caractéristiques des fractures, ainsi que le temps de parcours acoustique et les données d'amplitude ont été enregistrés. Sur la base des données de diagraphie du forage, une caractérisation détaillée des fractures (position, ouverture, orientation, angle de pendage) a été obtenue.

La distribution des fractures ouvertes de plus de 5 cm de large pour les quatre forages, basée sur l'interprétation des diagraphies, est présentée dans la Figure [3.13]. D'après ces données, les fractures varient considérablement en nombre et en emplacement dans les quatre forages, malgré la faible distance qui les sépare. Un forage est plus fracturé que d'autres, d'autres sont moins fracturés.

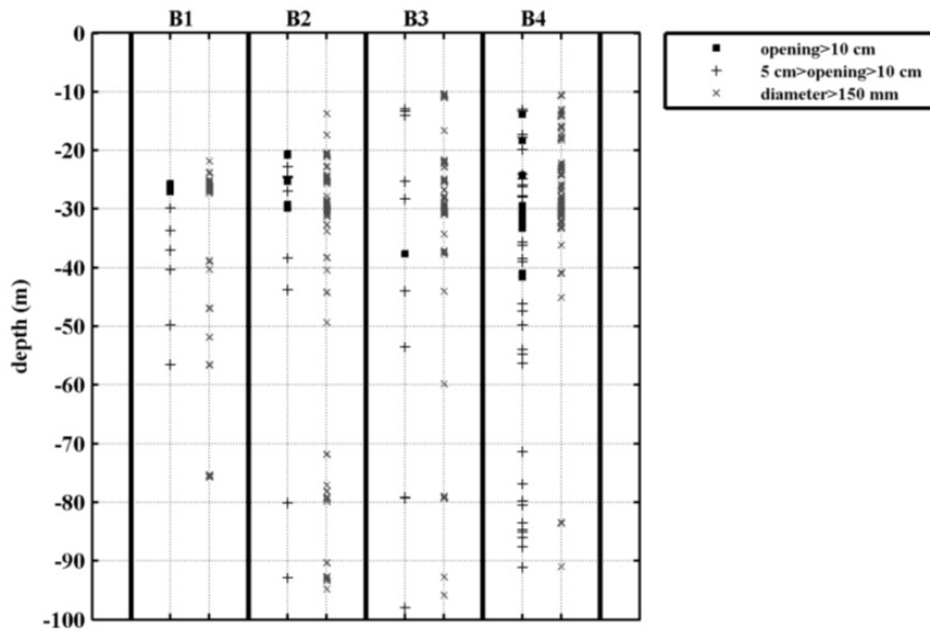


FIGURE 3.13 – Fractures (Source :[16])

Nous constatons qu'entre 10 et 35 m la roche représente des fractures distribuées d'une façon aléatoire, et varient entre un forage à un autre avec des pendages dans tous les sens. de plus, le remplissage de ces fractures est très variable. Il sera donc très difficile voire même impossible d'estimer ses caractéristiques thermiques. c'est pour cette raison que nous nous intéressons à identifier les caractéristique du rocher sain ( à partir de 35m) dans la suite.

### 3.4.3 Gamma-Ray essai

Comme indiqué ci-dessus Le substratum rocheux se compose principalement d'une suite consécutif du grès et grès schisteux avec de la siltite. Afin de pouvoir délimiter ces couches, G. Radioti a fait recours à la diagraphie Gamma Ray.

Le principe de la diagraphie gamma-ray consiste à mesurer la radioactivité naturelle des sols traversés. Dans notre cas les valeurs élevées des rayons gamma ( $>80$  cps) indiquent des couches de schistes tandis que les valeurs faibles ( $<80$  cps) indiquent des couches de grès. Les résultat sont présentées dans la figure suivante [3.14].

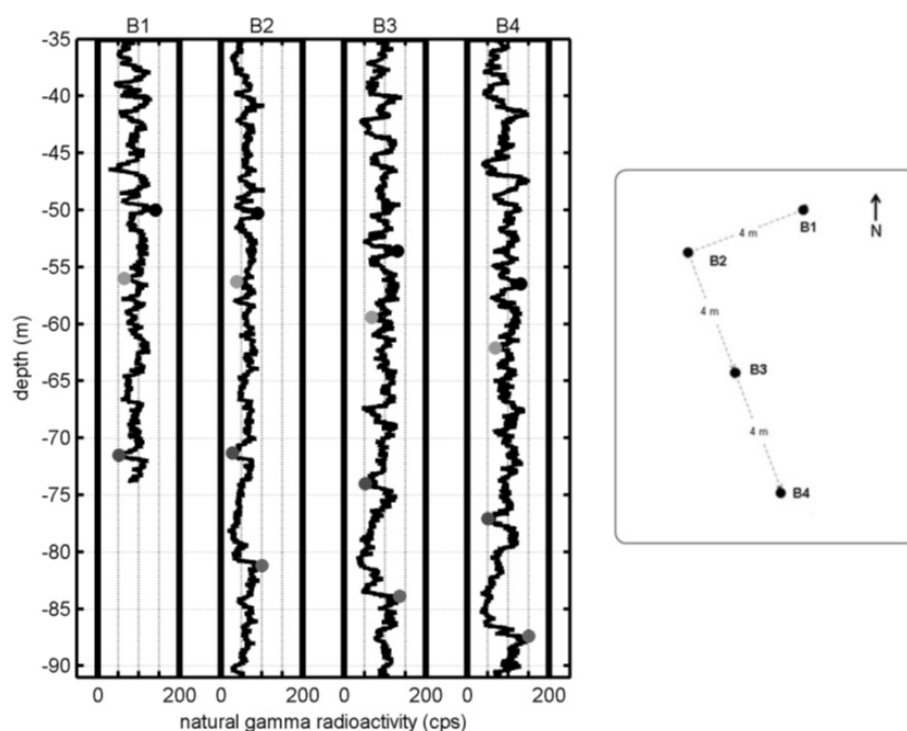


FIGURE 3.14 – Résultats Gamma-ray pour les 4 forages (Source : [16])

Plusieurs pics ont été observé dans les graphes des quatre forages avec un décalage d'un forage à l'autre dû au pendage des couches , en observant les quatre graphes nous constatons que les résultats sont homogènes cela signifie qu'il s'agit bien des limites de couches et non pas des passages ponctuels ou fracture dans le grès.

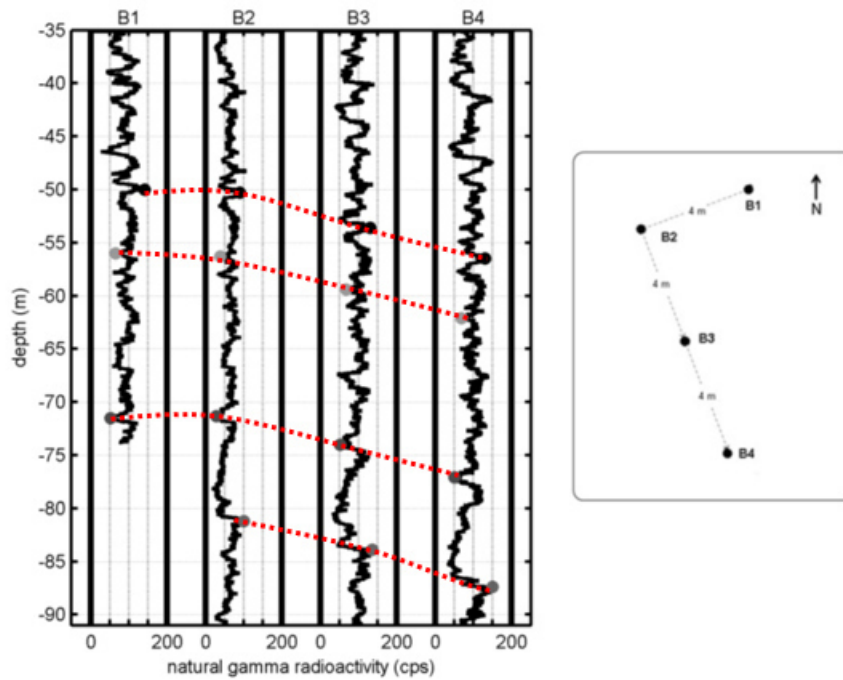


FIGURE 3.15 – Résultats Gamma-ray pour les 4 forages (Adapté de [16])

D'une façon interprétative G. Radioti a déduit la suite lithologique suivante :

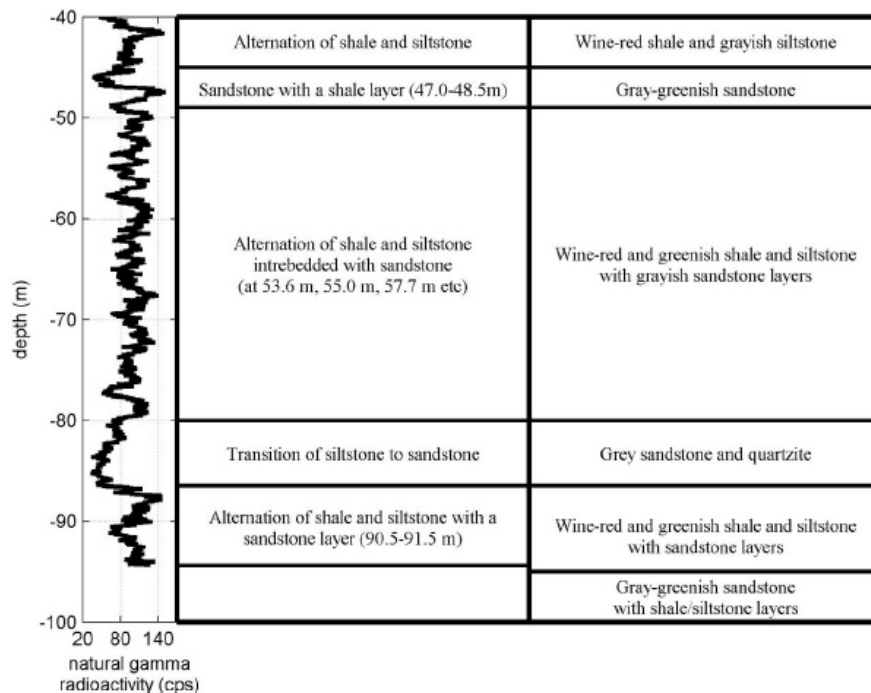


FIGURE 3.16 – Interprétation géologique des résultats de l'essai Gamma-Ray (Source :[16])



Le substratum rocheux est donc composé de siltite et de schiste argileux intercalés avec des couches de grès, dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à quelques mètres ( $<5$  m), ainsi que les autres parties des forages sont dominées par des couches de grès de plus de 5 m d'épaisseur.

### 3.4.4 Essai laboratoire

Après délimitation des couches, les échantillons prélevés ont été assignés selon l'intervalle de profondeur. Si des couches successives avaient la même conductivité thermique ils ont été fusionnées en une seule couche. Ensuite, la conductivité thermique moyenne de chaque couche a été calculée.

La conductivité thermique de 21 échantillons pour le forage (B3) et 25 échantillons pour l'autre forage (B4) a été mesurée au laboratoire en appliquant la technique de la sonde à aiguille [2.3.1].

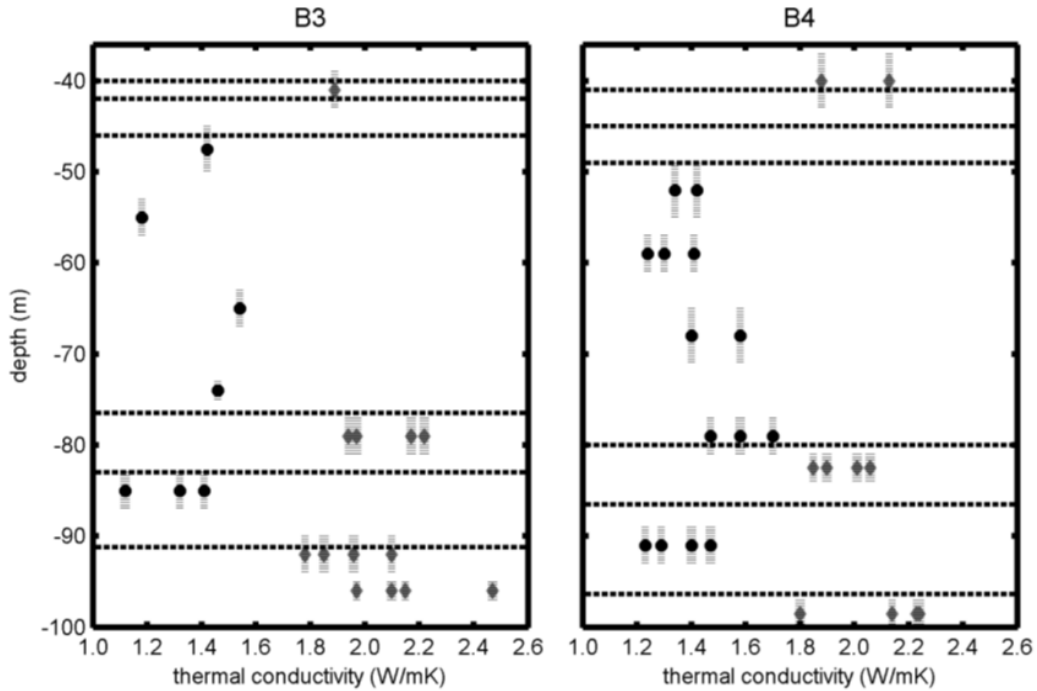


FIGURE 3.17 – Conductivité thermique mesurée des échantillons (Source :[16])

La figure [3.17] montre la conductivité thermique qui a été mesurée au niveau de deux forages alignés qui sont distants de 4 m (B3 et B4). Il a été observé que les valeurs de conductivité thermique élevées, indiquées par une couleur grise, correspondent principalement à des couches de grès (avec une radio-activité faible). Les valeurs de conductivité thermique faibles, indiquées par des cercles de couleur noire, correspondent principalement à des couches de schistes (une radioactivité élevée). Le grès est principalement composé de quartz et de feldspath, tandis que le schiste et le siltstone contiennent une fraction argileuse importante. La conductivité thermique du quartz est d'environ  $\lambda_{quartz} = 7,7W/mK$ , est beaucoup plus élevée que celle des minéraux non quartz,  $\lambda_{non-quartz} = 1.5 - 5.0W/mK$ .

. Par conséquent, la conductivité thermique du grès est élevée par rapport à la conductivité thermique du schiste. La transition d'une formation à l'autre peut dès lors être identifiée par les mesures de conductivité thermique des échantillons.

Finalement, les résultats des essais en laboratoire ont permis de mesurer la conductivité moyenne du grès qui est de l'ordre de 2 W/mK et du schistes qui est de l'ordre de 1,4 W/mK. Étant donné que les couches de schistes représentent environ 66 % de la longueur des forages, tandis que les couches de grès sain n'en couvrent que 33 %, la conductivité thermique moyenne in situ basée sur les mesures au laboratoire est égale à 1,6 W/mK (moyenne arithmétique pondérée).

## 3.5 Propriétés thermiques du sol

### 3.5.1 Température du sol non perturbé

La température a été mesurée pendant une période de deux ans dans l'un des forages [16], pourtant plus nous allons en profondeur, nous remarquons que les températures mesurées semblent invariables dans le temps au cours de la période de deux ans (Voir figure [3.18]).

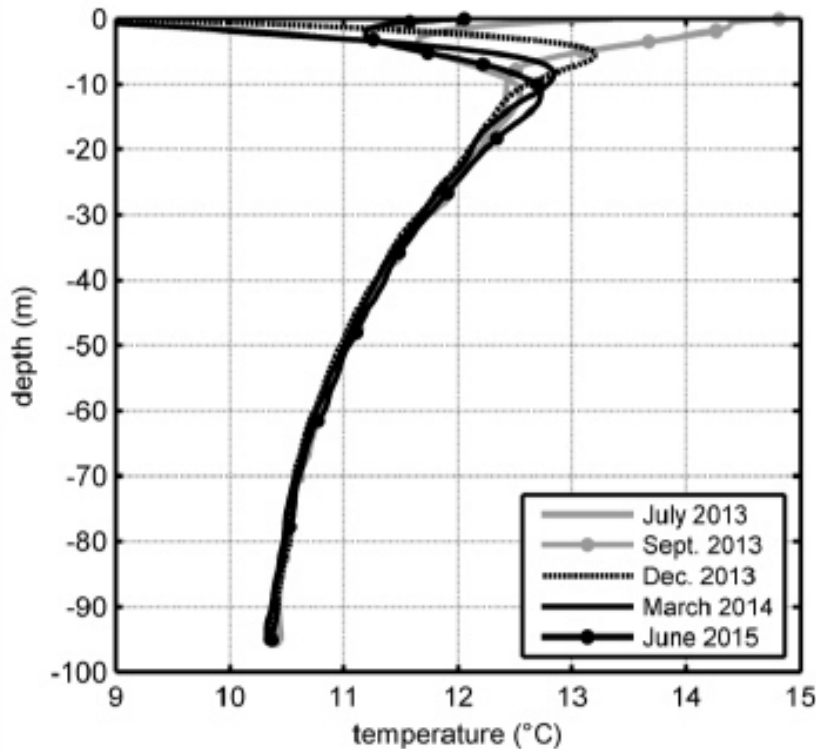


FIGURE 3.18 – Température mesurée (Source :[16])

La température diminue en profondeur à un taux moyen d'environ 0,25 °C/10 m et la température moyenne en profondeur de cette zone est de 11,0°C.

Normalement ce genre d'anomalie peut être expliqué par l'influence de l'urbanisation par contre le site considéré n'appartient pas à une zone urbaine, ceci a été démontré par la proximité du feeder<sup>3</sup> et le bâtiment de la SEGI, qui a dû augmenter la température du sol (Radioti, 2016). Pour la suite nous allons considérer une température initiale du sol de 11.0°C.

### 3.5.2 Conductivité thermique

Comme il a été réalisé un test de réponse thermique dans le site, la conductivité moyenne est de  $2.88 \mp 0.16$  W/mk, et qui est 45% fois plus grande que celle déterminée au laboratoire qui est d'une valeur de 1,6 W/mK. Ceci a été expliqué par le fait que la conductivité mesurée en laboratoire ne tient pas compte les échanges thermiques induites par les flux d'eau circulant dans les fissures. Ces écoulements d'eau induisent donc une conductivité effective plus élevée que la conductivité intrinsèque de la roche.

### 3.5.3 Capacité thermique

La capacité thermique volumétrique a été prise égale à  $2300 \text{ kJ/m}^3\text{K}$ , sur la base des valeurs de la littérature pour les types de roches in situ [18].

## 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu étudier le site et présenter les différents résultats des essais réalisés dans le cadre des travaux de recherche de G. Radioti.

Nous pouvons donc retenir que :

- Le sol est constitué du sable et gravier sur environ 10 mètres recouvrant du grès altéré puis un substratum rocheux constitué d'une alternance entre le grès et le grès schisteux.
- Le substratum rocheux a une conductivité thermique moyenne, basée sur les mesure laboratoires, qui vaut 1,6 W/mK.
- La conductivité thermique moyenne déterminée à l'aide du TRT (test de réponse thermique) est de  $2.88 \mp 0.16$  W/mK.
- La conductivité thermique in-situ est plus réaliste vu qu'elle prend en compte l'hétérogénéité du sol et les échanges thermiques induites par les flux d'eau circulant dans les fissures.
- Le sol a une température non perturbé de 11°C.

Dès lors, le site étudié offre un important potentiel pour les exploitations en un système géothermique fermé.

L'adoption d'un système ouvert nécessitera des investigations plus poussées sur le terrain (de nombreux forages d'exploration, analyses stratigraphiques, pompage et essais spécifiques...) qui demandent plus du temps et de ressources financières.

---

3. Réseau de chaleur faisant circuler de l'eau en boucle fermée.

# Chapitre 4

## Evaluation des besoins énergétiques

Après avoir déterminé les paramètres thermiques de la zone étudiée. Ce chapitre sera dédié à évaluer les besoins énergétiques en chauffage des bâtiments de la zone du quartier Polytech.

Il est nécessaire de mentionner que nous nous limiterons à évaluer les besoins de l'année comprenant la période du 13 Octobre 2021 au 13 Octobre 2022.

### 4.1 La notion des degrés-jours

La notion des degrés-jours consiste à additionner, jour après jour, la différence de la température moyenne standardisée à l'intérieur du bâtiment et la température extérieure moyenne. La température moyenne standardisée vaut  $16,5^{\circ}\text{C}$  dans notre cas.

Cette notion va nous permettre d'évaluer et de comparer les besoins en chauffage de différents bâtiments ou d'un même bâtiment à différentes périodes de temps, vu que la consommation de chauffage est liée à la différence de température entre l'environnement intérieur et extérieur du bâtiment.

Dans notre cas, nous allons nous servir de cette notion pour justifier les consommations en chauffage qui ont été évaluées, ainsi que nous allons aussi nous en servir afin de voir où se situe l'année qu'on avait choisi pour notre dimensionnement par rapport aux autres années.

## CHAPITRE 4. EVALUATION DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES

Année	Mois	DJ
2021	Octobre	154
	Novembre	300
	Décembre	340
2022	Janvier	375
	Février	277
	Mars	246
	Avril	193
	Mai	64
	Juin	13
	Juillet	0
	Août	0
	Septembre	77
	Octobre	73
Total		2112

TABLE 4.1 – Les degrés-jours mensuels année 2021-2022

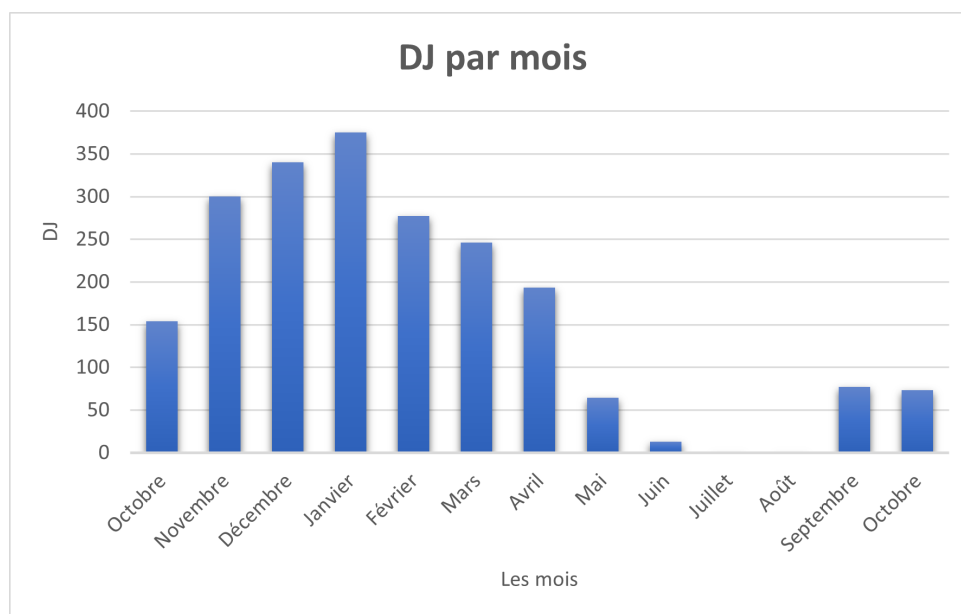


FIGURE 4.1 – Les degrés-jours mensuels année 2021-2022

La figure [4.2] représente les degrés-jours des 12 dernières années<sup>1</sup>, afin de comparer les années de chauffe entre elles.

1. Une année commence par le mois d'octobre et se termine en octobre

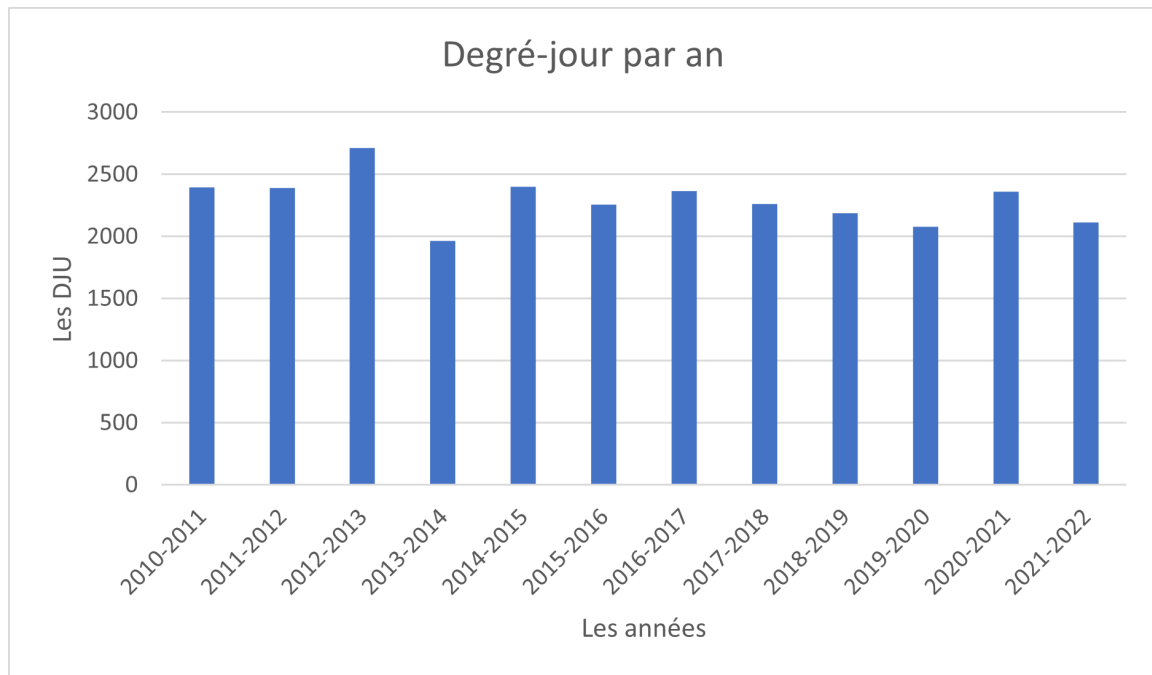


FIGURE 4.2 – Les degrés-jours annuels pendant les 12 dernières années.

Comme l'année 2021-2022 n'est pas l'année la plus froide d'après l'histogramme [4.2], pourtant la différence entre les années en terme des degrés-jours annuel n'est pas flagrante.

Dans la partie dimensionnement, dans le chapitre [5] et [6], nous prendrons en compte le fait que l'année 2021-2022 n'est pas la plus froide pour voir son influence sur notre dimensionnement.

## 4.2 La collecte et le traitement des données

Pour évaluer les besoins énergétiques de chaque bâtiment de toute la zone du quartier Polytech, comme première étape il a fallu collecter les données des consommations auprès du service de l'ARI<sup>2</sup>.

Les données sont encodées dans la base des données et accessibles sur le logiciel *HEI-DISQL* (Voir Annexe [C] ) sous forme d'énergie, de température d'entrée et de sortie, dans certains cas fois nous pourrons aussi avoir le débit et la puissance, ça dépend du compteur utilisé dans chaque bâtiment.

Pour la majorité des bâtiments, les enregistrements se font toutes les 1 ou 5 minutes ceci dépend aussi du compteur utilisé, ce qui rend la lecture des données un peu difficile. Nous avons aussi dans certains cas des compteurs qui prennent des enregistrements que quand l'énergie s'incrémente donc il est indispensable dans les deux cas d'uniformiser le pas de temps afin d'avoir une bonne lecture et visualisation des données. Le pas de temps, généralement choisi, est de 5 minutes.

2. L'Administration des Ressources Immobilières

## CHAPITRE 4. EVALUATION DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES

Après la collecte des données, vient la partie du pré-traitement ou la préparation de ces données à l'importation lors de laquelle nous filtrons les données en ne sélectionnant que les enregistrements de la période qui nous intéresse pour pouvoir les mettre dans les tables *Excel*. Le filtre temporaire a été important et indispensable parce que le logiciel *Excel* a une limite de lignes qu'on ne peut pas dépasser.

Ensuite, les tables des données sont exportées sous des fichiers *Excel* où nous éliminons les valeurs aberrantes pour avoir finalement des données propres que nous pourrions traiter.

Le traitement a été réalisé avec *Python* à l'aide de la bibliothèque *Pandas*<sup>3</sup> qui nous a permis via des algorithmes à manipuler les données en faisant des analyses temporelles pour uniformiser le pas de temps pour sortir finalement des données qu'on pouvait interpréter et utiliser éventuellement pour la suite.

Les données sorties sont finalement lisibles et converties sous forme de graphique et tableaux de valeurs.

### 4.3 Les besoins en chauffage

Le fruit de la partie du traitement des données énergétiques est bien les besoins en chauffage de chaque bâtiment. Ces besoins ont été sortis mensuellement pour avoir une vision globale sur les consommations. Nous avons aussi sorti ces consommations par heure qui va nous servir par la suite pour le dimensionnement. Nous avons aussi pu sortir les différentes puissances avec un pas de temps uniformisé également.

Dans cette section, nous allons présenter le travail réalisé sur le bâtiment "B52", ensuite la même procédure sera appliquée pour le reste des bâtiments du campus.

#### 4.3.1 Bâtiment B52 :

La Figure [4.3] nous montre que les besoins mensuels tendent à augmenter en atteignant un pic pendant le mois de Janvier 2022 pour redescendre jusqu'à tendre vers zéro pendant le mois de juillet et août.

Nous pourrions aussi remarquer que l'histogramme des besoins mensuels a la même forme que l'histogramme des degrés-jours (Voir figure [4.1]).

---

3. est une bibliothèque écrite pour le langage de programmation Python permettant la manipulation et l'analyse des données. Elle propose en particulier des structures de données et des opérations de manipulation de tableaux numériques et de séries temporelles.

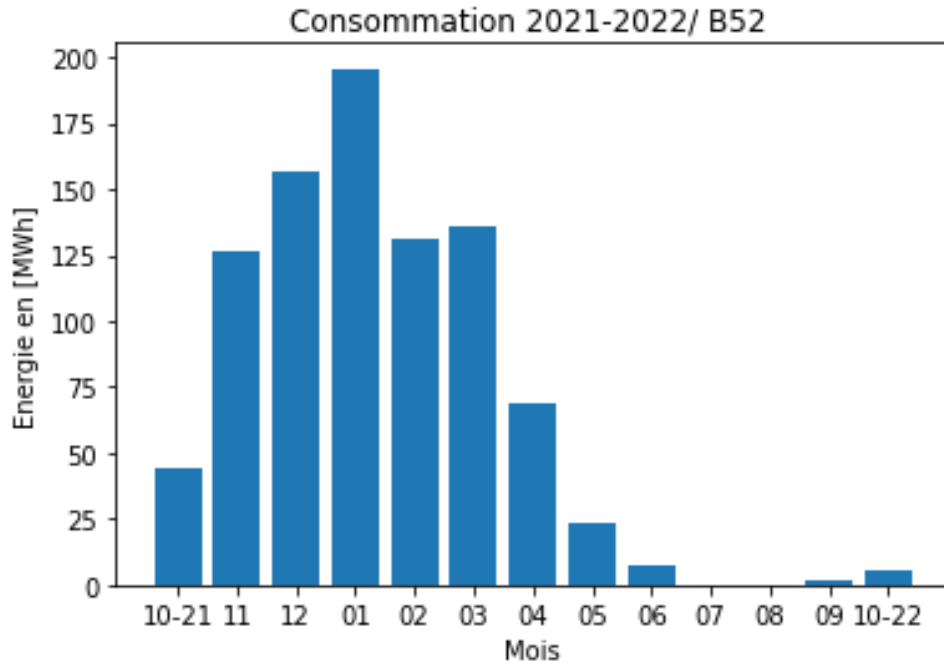


FIGURE 4.3 – Les besoins mensuels du B52 de la période du 13 octobre 2021 au 13 octobre 2022

### Puissance de crête

D’après les figures [4.4] et [4.5], nous remarquons que les appels de puissances thermiques d’un bâtiment ne sont jamais linéaires. En hiver, les grosses puissances thermiques appelées lors des périodes les plus froides ne sont que très rarement appelées au cours d’une année vu que les pics de demandes apparaissent que quand il y a une période de froid extrême ou quand le bâtiment est mis en température après un arrêt (La relance du système). Tandis que les faibles puissances sont plus fréquemment appelées et c’est les puissances fournies pour maintenir la température du bâtiment le long de la journée.

Pour pouvoir évaluer la puissance qui sera extraite ou réinjectée dans le sol [ $P_{ground}$ ], nous devons déterminer la puissance qui doit être fournie par notre pompe à chaleur [ $P_{heating}$ ].

Puisque nous avons la consommation d’énergie, nous pourrions désormais calculer les puissances dont nous avons besoin afin de desservir les besoins du bâtiment.



## CHAPITRE 4. EVALUATION DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES

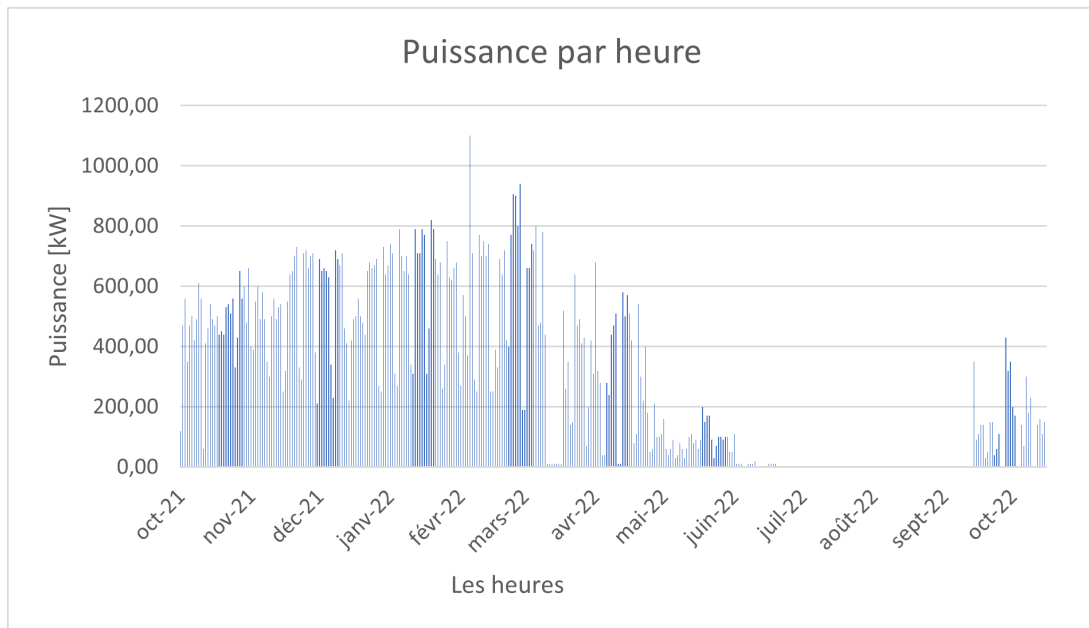


FIGURE 4.4 – La puissance par heure

Sur la figure [4.4], nous remarquons que nous avons des pics à des horaires spécifiques mais qui ne seront pas dimensionnantes, car une faible puissance fonctionnera longtemps et de façon continue, alors qu'une grande puissance fonctionnera moins longtemps et de façon plus discontinue.

Par conséquent dans l'étape qui suit nous allons évaluer les puissances journalières (Voir figure [4.5]), que devrait avoir la pompe à chaleur pour répondre aux besoins journaliers en supposant qu'elle fonctionne 24h/24, qui est calculée en divisant la consommation journalière, exprimée en kWh, par 24h. Ceci nous donne déjà une idée préalable sur la puissance qui pourrait être dimensionnante qui est d'une valeur de 415 kW.

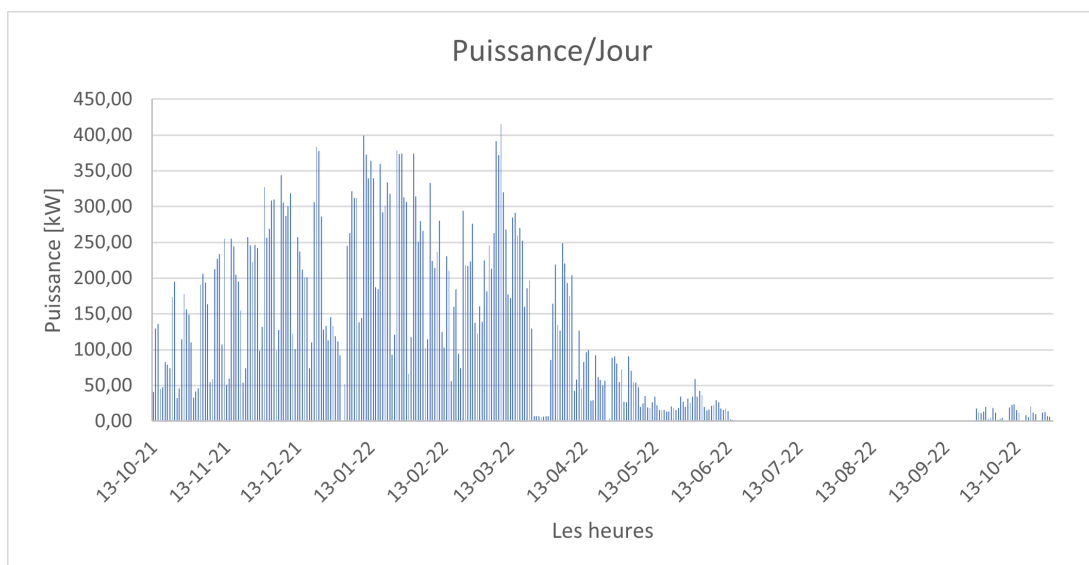


FIGURE 4.5 – La puissance par jour

## Courbe monotone

Les monotones de demande de chaleur représentent l'organisation par ordre décroissant des demandes de chaleur horaires. Cette courbe va nous aider pour traduire une image du profil énergétique du bâtiment. Nous allons par la suite, dessiner notre courbe monotone de chaleur.

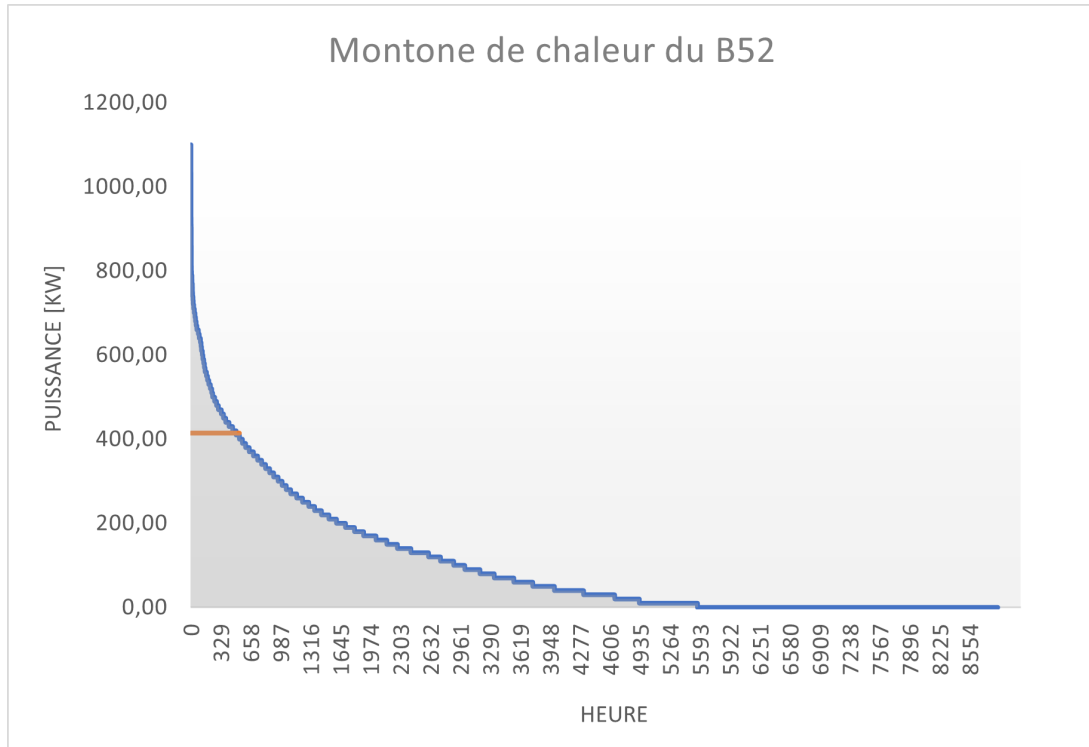


FIGURE 4.6 – La courbe monotone de chaleur par heure

Comme nous pourrions le détecter que sur la figure [4.6] que la plus grande puissance est d'une valeur proche de 1100 kW et qui est une valeur sur une période d'une heure. Par conséquent, nous allons alors dans notre cas prévoir un système bivalent combinant une pompe à chaleur géothermique et une unité plus conventionnelle (Une chaudière à gaz par exemple). De cette manière, la pompe à chaleur géothermique couvre les besoins de base tout au long de l'année et l'unité supplémentaire apporte le complément nécessaire pour les besoins de pointe.

La figure [4.7] est coupée en deux parties, concernant la zone colorée en vert nous allons adopter un système bivalent où nous ferons fonctionner un système d'appoint pour remplir les puissances au-delà de 415 kW. Tandis que la zone grisée, c'est notre système géothermique qui fonctionnera.

L'écrêtage de la monotone de chaleur à une valeur correspondant à la puissance journalière maximale (415 kW dans notre cas) signifie que la pompe à chaleur serait capable de répondre à l'ensemble des besoins de chaleur sur un pas de temps de 24h. Néanmoins, pour une réactivité plus importante du système (c'est à dire pour répondre à des demandes instantanées en période de grand froid, sur un pas de temps inférieur à 24h), un élément d'appoint doit être prévu.

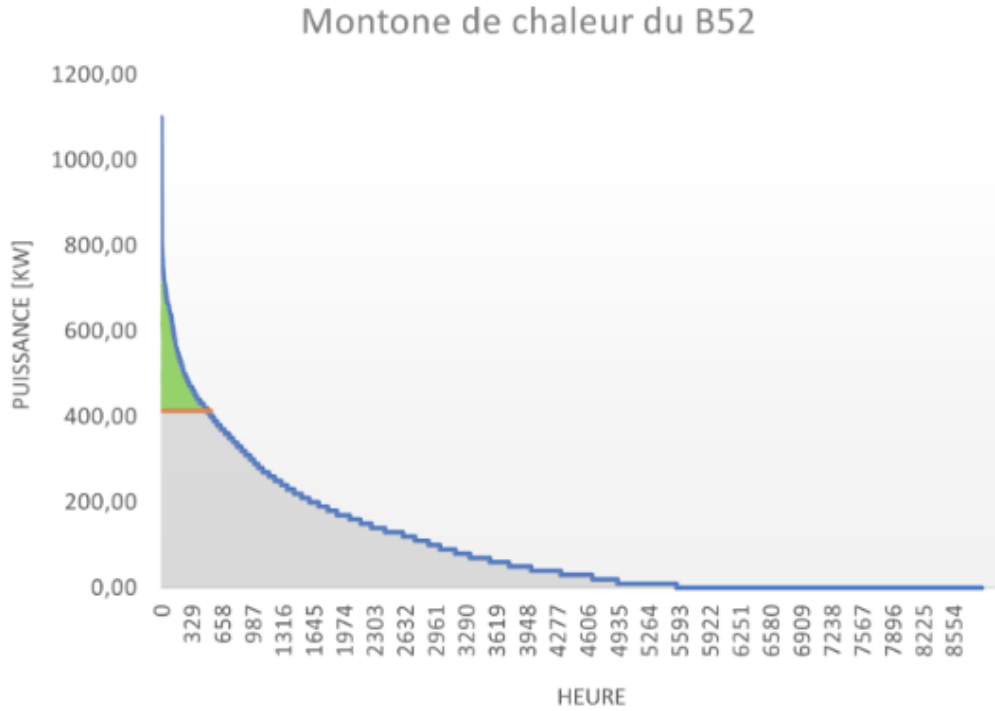


FIGURE 4.7 – La courbe monotone de chaleur par heure

Nous pourrions aussi évaluer le pourcentage des besoins qui seront couvertes par la pompe à chaleur géothermique.

$$Q_{\text{besoin}} = 898,074 \text{ MWh.}$$

$$Q_{\text{géothermie}} = 838.296 \text{ MWh.}$$

$$\text{Pourcentage} = \frac{Q_{\text{géothermie}}}{Q_{\text{besoin}}} = 93,34\% \quad (4.1)$$

Dès lors, afin d'éviter de surdimensionner la pompe à chaleur, un système bivalent est à prévoir avec une couverture d'environ 93% par le système géothermique et 7% peut-être couverte par un autre système lors des heures de pointe.

### 4.3.2 Les autres bâtiments

De la même manière, nous sortons les besoins des autres bâtiments du Campus, nous présentons dans cette sous-section les consommations annuels par mois, Nous nous limitons également à la période octobre 2021 à octobre 2022.

Nous pourrions également faire la remarque que la forme des histogrammes ressemblent à celui des degrés-jours.

## CHAPITRE 4. EVALUATION DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES

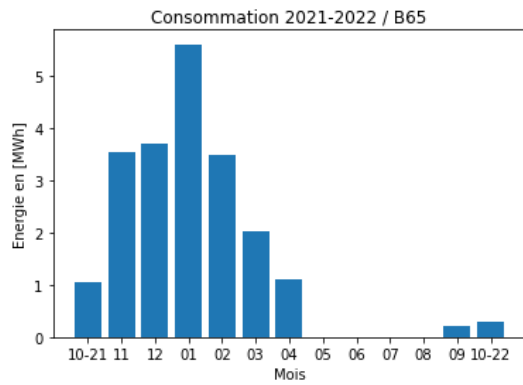


FIGURE 4.8 – Les besoins mensuels du B65

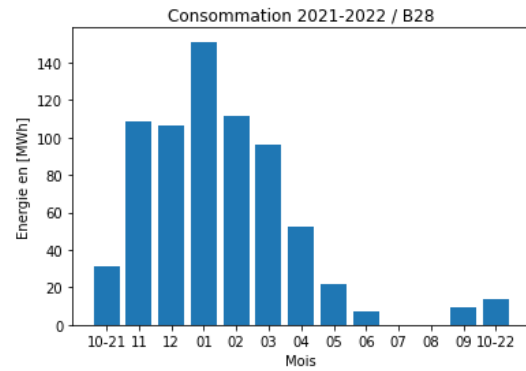


FIGURE 4.9 – Les besoins mensuels du B28

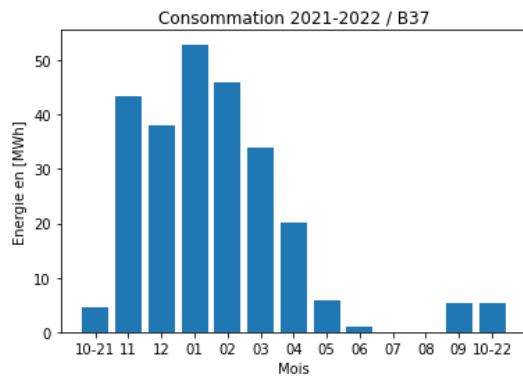


FIGURE 4.10 – Les besoins mensuels du B37

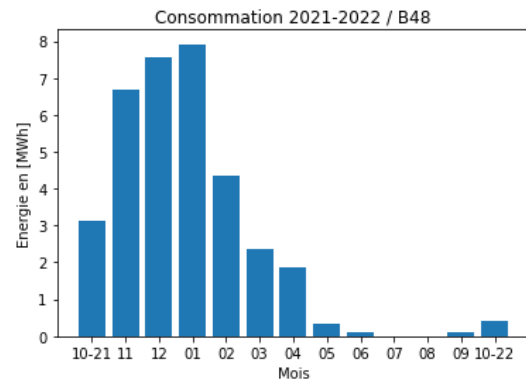


FIGURE 4.11 – Les besoins mensuels du B48

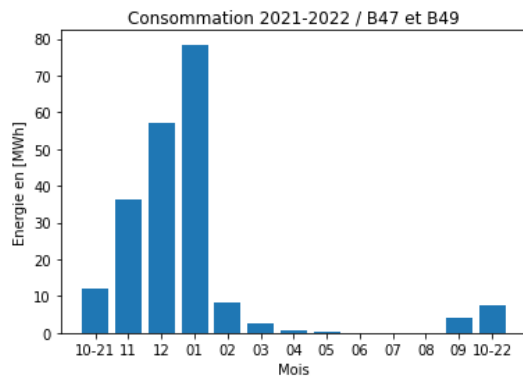


FIGURE 4.12 – Les besoins mensuels du B47 et du B49

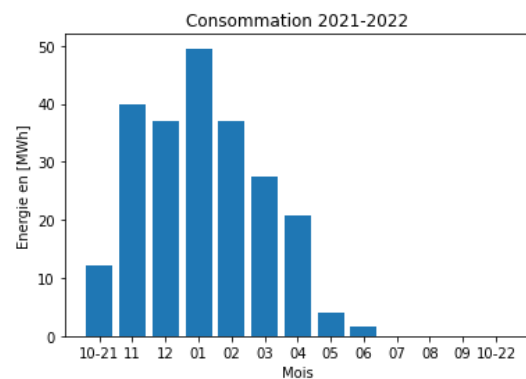


FIGURE 4.13 – Les besoins mensuels du B53

## CHAPITRE 4. EVALUATION DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES

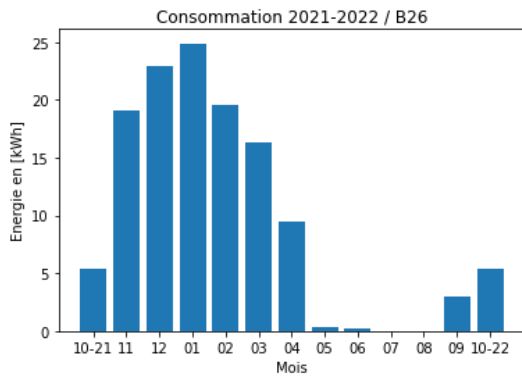


FIGURE 4.14 – Les besoins mensuels du B26

Les consommations sont différentes et dépendent de surface du bâtiment, de sa fonctionnalité ainsi que son ancienneté.

Nous pourrions déjà remarquer que des bâtiments sont moins énergivores que d'autres et ceci est bien lié à la surface et le fonctionnement de chaque bâtiment.

### Courbe monotone

Nous traçons les courbes monotones pour les autres bâtiments afin de déterminer les puissances qui doivent être fournies par la pompe à chaleur géothermique.

Nous aurons besoin de ces puissances dans le chapitre [6] où nous allons effectuer une comparaison entre l'adoption d'un réseau géothermique bouclée sur tous les bâtiments et un réseau géothermique individuel pour chaque bâtiment indépendamment des autres.

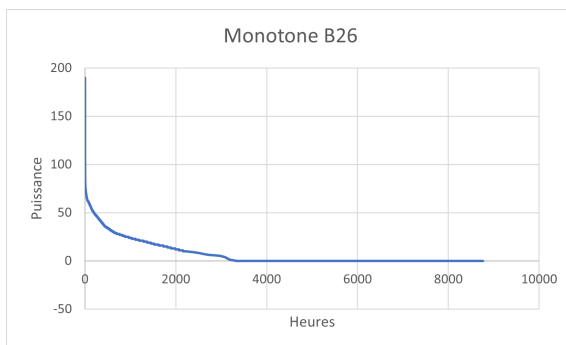


FIGURE 4.15 – La courbe monotone de chaleur B26.

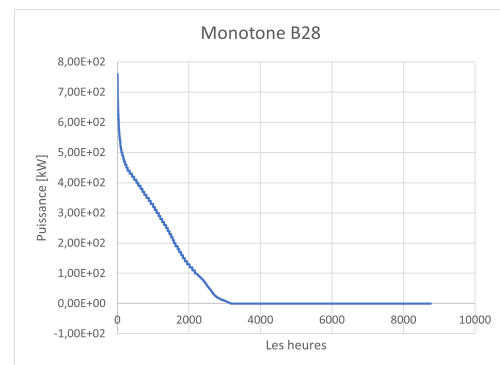


FIGURE 4.16 – La courbe monotone de chaleur B28.

## CHAPITRE 4. EVALUATION DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES

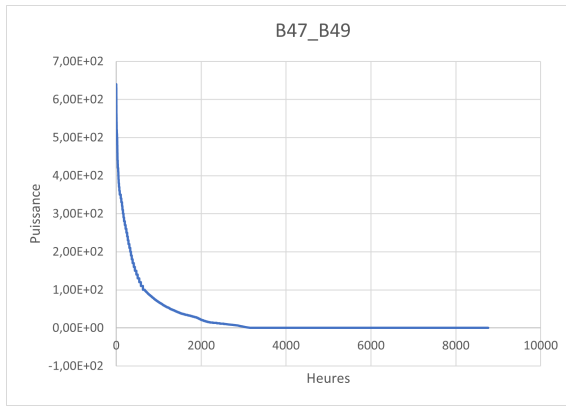


FIGURE 4.17 – La courbe monotone de chaleur B47 et B49.

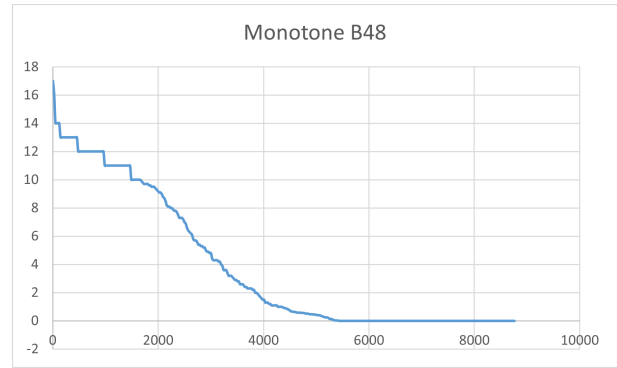


FIGURE 4.18 – La courbe monotone de chaleur B48.

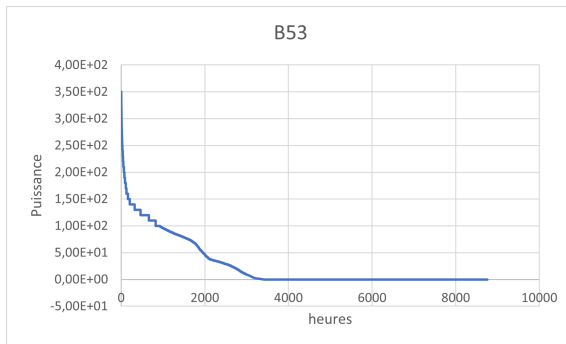


FIGURE 4.19 – La courbe monotone de chaleur B53.

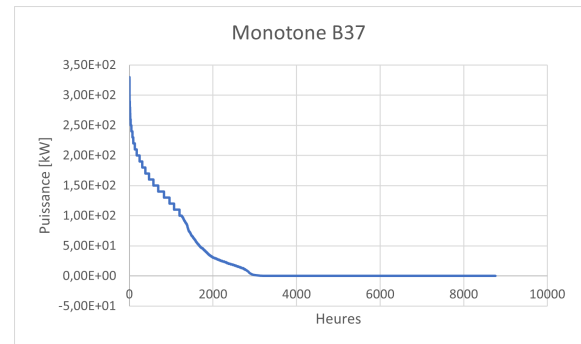


FIGURE 4.20 – La courbe monotone de chaleur B37.

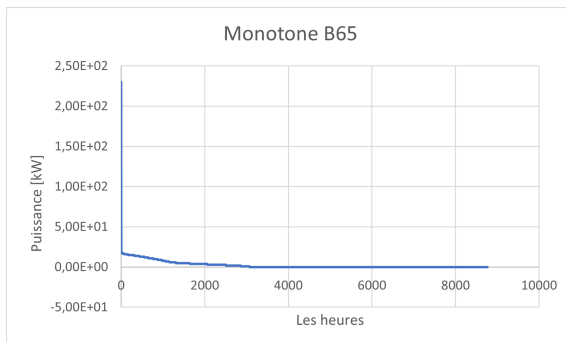


FIGURE 4.21 – La courbe monotone de chaleur B65.

Nous pourrions remarquer que la courbe monotone du B65 (Voir figure [4.21]) descend vers des valeurs au dessous de 100 après deux valeurs de pic, ceci peut-être dû à une erreur d'enregistrement et qui fait de ces deux premières valeurs non représentatives.

### 4.3.3 Comparaison des consommations des bâtiments aux normes

Des statistiques ont été réalisées en 2008 en Région Wallonne par rapport aux consommations d'énergie du secteur domestique [19]. Nous utilisons ce document pour juger l'énergivoracité des bâtiments du campus.

Nous utilisons dans cette section le tableau qui présente les surfaces des bâtiments [3.1].

En se basant sur les besoins annuels de chaque bâtiment et les superficies, nous pourrions les comparer aux besoins des bâtiments similaires dans la région Wallonne.

Bâtiment	Besoins [kWh/an]	Besoins spécifiques [kWh/an/m <sup>2</sup> ]
B52	894 590	31,66
B48	34 877	25,55
B28	710 868	55,51
B37	256 863	41,90
B53	229 621	68,76
B26	129 139	79,27
B65	21 011	55,29
B47 et B49	244 201	65,89

TABLE 4.2 – Les consommations spécifiques pour la période octobre 2021 à octobre 2022

#### Résultats :

Pour juger l'énergivoracité des bâtiments, nous utilisons le graphe qui reprend la base des données des consommations de l'année 2008. Nous plaçons sur le graphe en point "rouge" nos bâtiments en se basant sur les superficies ( $m^2$ ) et les consommations (GWh) pour voir leur appartenance à la zone des consommations moyens.

Nous pourrions remarquer que la majorité des bâtiments rentrent bien dans la fourchette des consommations moyens.

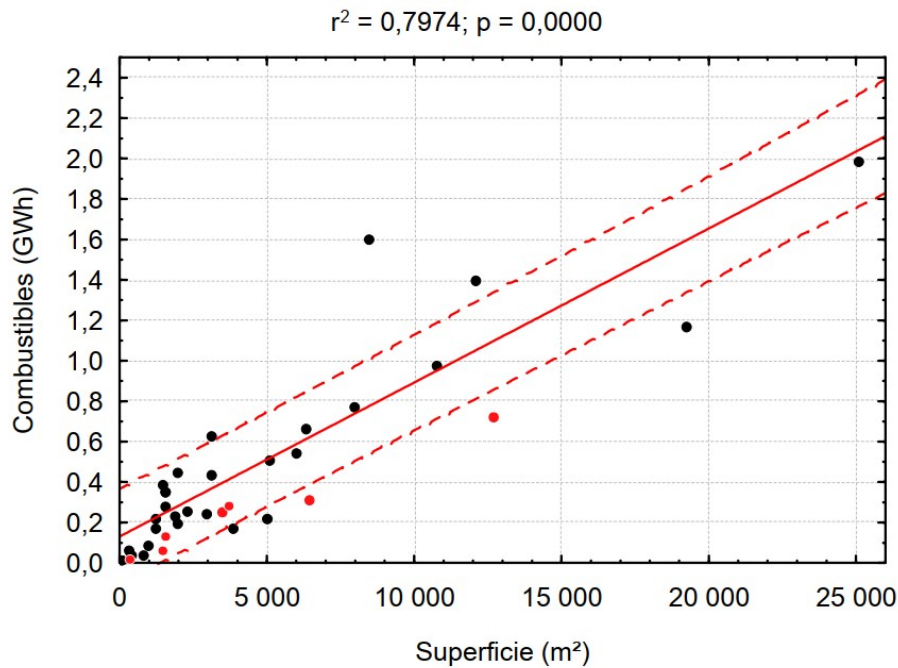


FIGURE 4.22 – Comparaison aux consommations de combustibles des bureaux publics HT en 2008- Adapté de [19]

Aussi d'après les statistiques, les consommations spécifiques moyens en chauffage sont d'environ  $151 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ , d'après [19].

#### 4.3.4 Le réseau

Dans cette sous-section, nous évaluerons les besoins en chaleur de l'ensemble des bâtiments du quartier Polytech concerné par le réseau de chaleur. La procédure de l'évaluation des besoins est la même que pour le bâtiment B52.

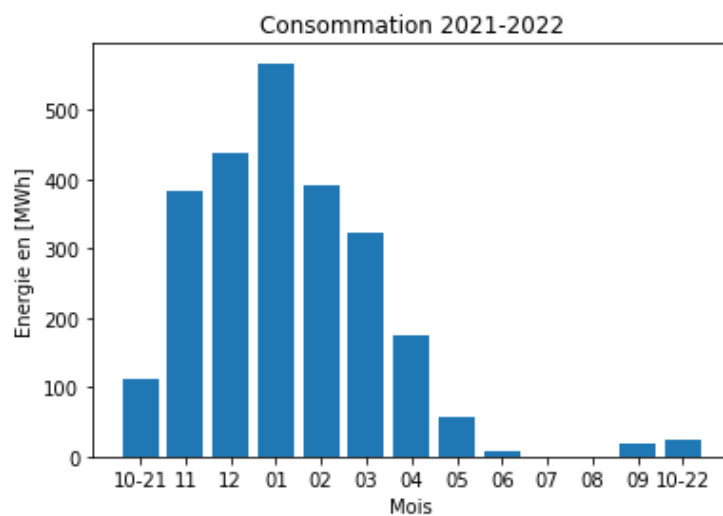


FIGURE 4.23 – Les besoins mensuels du réseau



### Courbe monotone

Nous nous servirons encore des courbes monotones afin de déterminer les puissances de crête, la figure [4.24] montre la courbe monotone de chaleur du réseau des puissances horaires.

Afin d’esquisser la monotone réseau de puissance par heure [4.24], nous avons organiser par ordre décroissant les demandes de chaleur horaires.

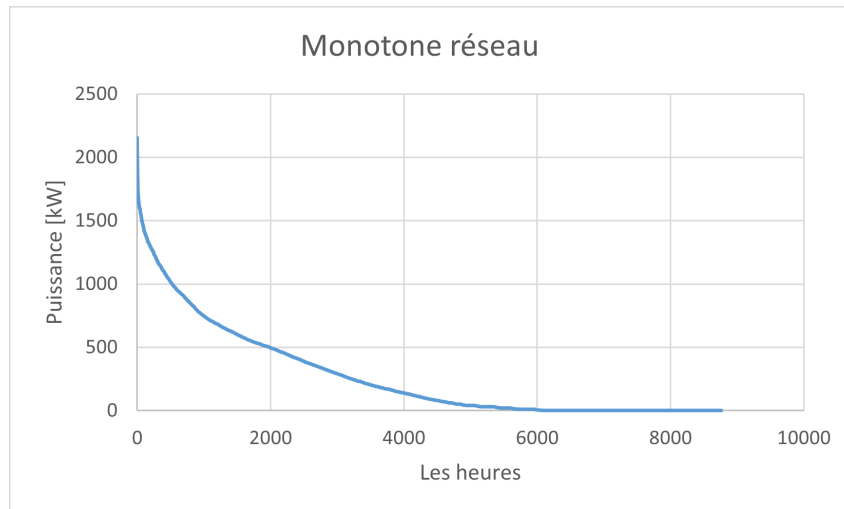


FIGURE 4.24 – La courbe monotone de chaleur du réseau par heure

Comme nous faisons de l’écrtage à une valeur qui correspond à la puissance journalière maximale, nous dessinons la courbe motonone de chaleur du réseau journalière afin de déterminer la puissance maximale que la pompe à chaleur est capable de fournir sur un pas de temps de 24h.

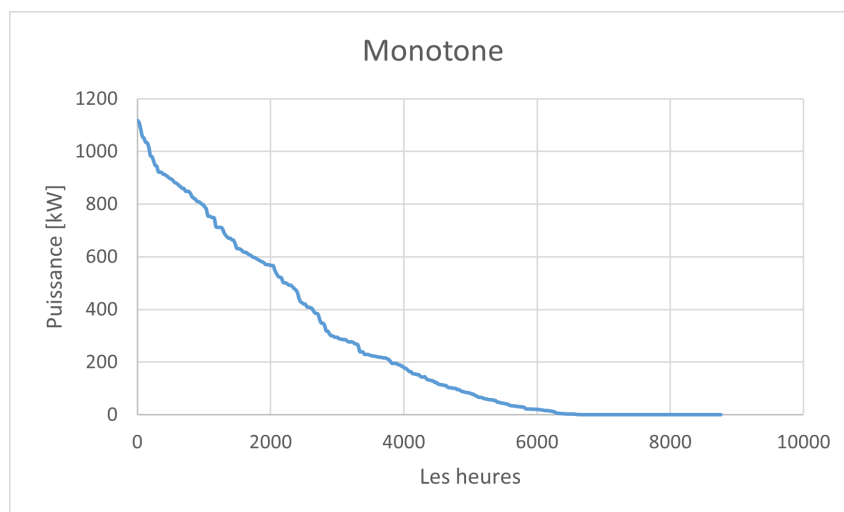


FIGURE 4.25 – La courbe monotone de chaleur du réseau journalière

## CHAPITRE 4. EVALUATION DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES

La figure [4.26] peut être coupée en deux parties, la partie grisée représente les besoins qui seront remplis par la pompe à chaleur géothermique tandis que la zone colorée en vert représente les puissances qui seront donner par un système d'appoint pour répondre aux demandes sur une période d'une heure en période de grand froid.

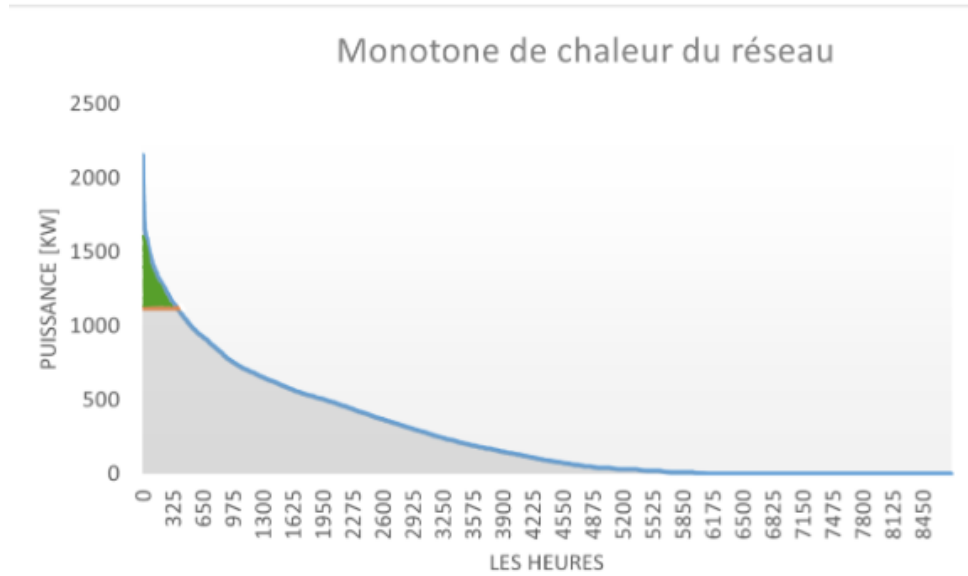


FIGURE 4.26 – La courbe monotone de chaleur du réseau journalière

Nous pourrions éventuellement évaluer le pourcentage des besoins qui seront couvertes par la pompe à chaleur géothermique.

$$Q_{\text{besoin}} = 2386,40 \text{ MWh.}$$

$$Q_{\text{géothermie}} = 2299,07 \text{ MWh.}$$

$$\text{Pourcentage} = \frac{Q_{\text{géothermie}}}{Q_{\text{besoin}}} = 96,34\% \quad (4.2)$$

Dès lors, un système bivalent est à prévoir avec un taux de couverture d'environ 96% par le système géothermique et 4% peut-être couverte par un autre système lors des heures de pointe.

### 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, il a été présenté les besoins en chauffage de chaque bâtiment ainsi que tout le réseau.

Nous avons évoqué la notion des degrés-jours afin de positionner l'année choisie pour l'évaluation des besoins en chaleur.

La courbe monotone nous a permis d'évaluer les puissances de crête et d'évaluer aussi la puissance qui sera couverte par le système géothermique.

Ensuite, pour ne pas surdimensionner la pompe à chaleur géothermique il est envisageable de combiner la pompe à chaleur géothermique avec un système d'appoint via un système bivalent, en écrêtant la monotone de chaleur à la puissance journalière maximale.

Jusqu'à présent, nous avons toutes les données dont nous avons besoin pour faire un dimensionnement préliminaire des sondes géothermiques en circuit fermé.

# Chapitre 5

## Dimensionnement d'un champ de sondes pour le bâtiment B52

Comme nous avons déterminé nos besoins thermiques dans le chapitre précédent [4], dans ce chapitre nous passerons au pré-dimensionnement de notre champ de sondes géothermiques en circuit fermé.

En fonction des besoins en chauffage des différents bâtiments, l'objectif de ce chapitre est l'évaluation de la longueur de sondes nécessaire afin de fournir les besoins énergétiques requis sans épuiser de manière excessive le réservoir de chaleur du sol.

Nous allons dimensionner le système géothermique de l'un des bâtiments, qui est le B52, ensuite nous pourrons étendre notre système au réseau de chaleur incluant l'ensemble des bâtiments du quartier Polytech dans le chapitre [6].

Pour ce faire nous allons utiliser la norme néerlandaise, déjà présentée dans la section [2.4] du chapitre [2].

### 5.1 Prédimensionnement selon la norme hollandaise ISSO 73 :

Nous avons préalablement déterminé les besoins en chaud total dans le chapitre précédent [4]. Concernant le prédimensionnement du champ des sondes, nous tiendrons compte du fait que le système est bivalent et nous réaliserons la conception selon les besoins qui seront remplis par la géothermie et non pas la totalité des besoins.

**Les besoins en chaud :**

$$Q_{\text{besoin}} = 836,442 \text{ MW}$$

— **Détermination de la puissance d'extraction spécifique :**

La pompe à chaleur a une puissance de 415 kW, un COP qui vaut 4. Pour déterminer la puissance qui sera extraite du sol, nous utilisons l'équation [2.6].

$$P_{ground} = \frac{415 \times 3}{4} = 311,25 \text{ kW}$$

Nous calculons le temps de fonctionnement de la pompe à chaleur :

$$t_f = \frac{Q_{besoin} \times 10^3}{415} = 2020 \text{ heures/an}$$

Nous utilisons la figure [2.12] pour déterminer la puissance d'extraction spécifique, comme notre système est considéré qu'il ne produit que la chaleur et il ne fait pas de régénération  $P_{spécifique} = 17 \text{ W/m}$ .

— **La longueur totale préliminaire :**

Nous déterminons la longueur totale à l'aide de l'équation [2.8].

$$L_{totale} = \frac{311 \times 10^3}{17} = 18308,82 \text{ m.}$$

— **Facteurs de correction :**

La longueur totale ( $L_{totale}$ ) calculée est ensuite corrigée en plusieurs étapes à l'aide de certains facteurs de correction qui ont été déjà évoqué au chapitre [2]. Les tableaux et les graphes utilisés pour les corrections sont présentés dans l'Annexe [A].

**La conductivité thermique du sol**

$$\lambda = 2,88 \text{ W/mK} \rightarrow C_{sol} = 0,81$$

**Le matériau de remplissage**

$$\lambda = 1,2 \text{ W/mK} \rightarrow C_{mat} = 1$$

C'est le sable qui a été choisi comme matériau de remplissage.

**La température minimum du sol**

$$T_{min} = 4^\circ \text{C} \rightarrow C_{Tmin} = 1,53$$

**Le type d'échangeur géothermique**

$$\text{Double U} \rightarrow C_{sonde} = 0.82$$

### La configuration des échangeurs géothermiques

Disposition en grille régulière  $\rightarrow C_{disp} = 1.3$

### L'écart entre les échangeurs géothermiques

Inter-distance = 5 m  $\rightarrow C_{dist} = 1$

La longueur de sonde corrigée vaut alors :

$$L_{corrigé} = L_{totale} C_{sol} C_{mat} C_{Tmin} C_{sonde} C_{disp} C_{dist} = 24187,67 \text{ m}$$

— Nombre de sondes :

Nous utilisons l'équation [2.10], nous obtenons un nombre de sondes qui vaut 201 sondes.

$$N_{BHE} = \frac{24187,67}{120} = 201 \text{ sondes.}$$

## 5.2 Emplacement des sondes

Sur la figure [5.1], les rectangles rouges représentent la zone choisie pour implanter les sondes géothermiques, la surface d'implantation est assez grande pour placer les sondes tout en respectant une distance de 5 m entre les forages.

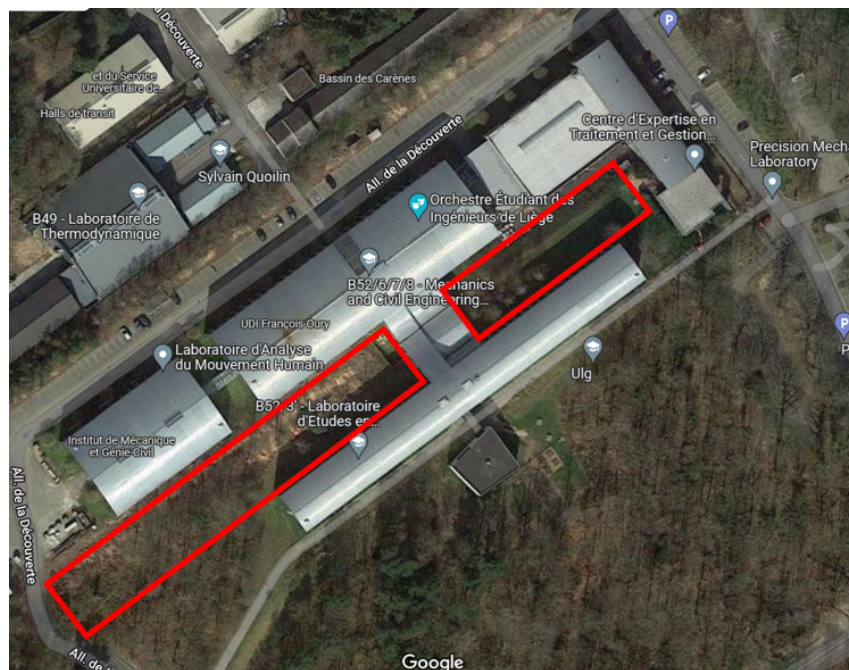


FIGURE 5.1 – Localisation des sondes

Aussi le choix des emplacements a été réalisé d'une manière à ce que le champ de sondes ne soient pas très loin du bâtiment mais assez loin des fondations des bâtiments d'au moins 2 mètres.

## 5.3 Modélisation

Pour la modélisation du champ de sondes géothermiques, nous avons opté pour un modèle qui nous permet de visualiser la réponse thermique du sous-sol. Ce modèle analytique est décrit dans l'article [20] et [21], il est intégré dans un script *MATLAB* où les paramètres nécessaires doivent être définis. Le modèle analytique est conçu pour modéliser le champ de température pour des échangeurs de chaleur de forage (BHE) installés verticalement pour des systèmes de pompe à chaleur géothermique (GSHP) à extraction de chaleur fonctionnant de manière discontinue dans un milieu poreux (le sol).

Ce modèle est basé sur "line source model", qui est normalement valable pour une charge thermique constante par mètre de longueur, qui a été amélioré par l'intégration dans le temps via un produit de convolution, pour être utilisable dans le cas d'une charge thermique intermittente.

### 5.3.1 Choix des paramètres d'entrées

Dans un premier temps, le champ de sondes est simulé sur la base des paramètres tels que décrit dans le tableau [5.1].

L'ensemble des paramètres de simulation sont déterminés précédemment, à l'exception de la conductivité thermique du fluide caloporteur et du matériau de remplissage qui ont été choisis selon des valeurs usuellement rencontrées.

Paramètre	Valeur	Unité
Température du sol non perturbé	11	°C
Conductivité thermique	2,88	W/mK
Capacité thermique	$2,3 \cdot 10^6$	$J/m^3K$
Longueur des sondes	24188	m
Profondeur des sondes	120	m
Type de sondes	Double U	-
Nombre de sondes	201	-
Rayon de la sonde	0,0762	m
Conductivité thermique du fluide caloporteur	0,48	W/mK
Conductivité thermique du matériau de remplissage	1,6	W/mK

TABLE 5.1 – Les paramètres d'entrée pour la modélisation

### 5.3.2 Modélisation sur une année

En premier lieu, nous modélisons notre système géothermique sur toute la période considérée dans l'évaluation des consommations du bâtiment (Octobre 2021- Octobre 2022).

#### Observation à un point au milieu :

Pour mieux observer la réponse thermique le long d'une sonde, nous prenons un point d'observation au milieu du champ des sondes.

##### Observation à un point au milieu : Groupe 1 des sondes

Nous observons d'après la figure [5.2] une légère diminution de la température à la fin de l'année de  $T = 2^\circ\text{C}$ , nous pourrions désormais faire l'hypothèse que la température du sol va diminuer de la même manière si nous nous projetons sur 10 ans. Cette diminution est dû à une utilisation conséquente du chauffage vis à vis de la taille du champ de sondes. Par conséquent, ceci va diminuer la température du sous-sol non perturbé ( $T_0 = 11^\circ\text{C}$ ) et causer le refroidissement du sous-sol vu qu'on ne fait pas de régénération pour la recharger. A priori, nous pourrions déjà réfléchir à faire du refroidissement pendant l'été afin d'offrir un équilibre au système.

Nous pourrions aussi constater que la température du sol diminue jusqu'à environ  $T = 5^\circ\text{C}$  durant la période la plus froide de l'année (la période où nous avons un pic de demande), ce qui peut être tolérable parce qu'après cette période froide la température remonte, sans générer un conséquent emmagasinement de déficit de température au fil des mois. Également, la température ne diminue pas jusqu'à  $0^\circ\text{C}$ , ce qui est réconfortant car une température très basse peut engendrer un gel de sondes et du sous-sol.

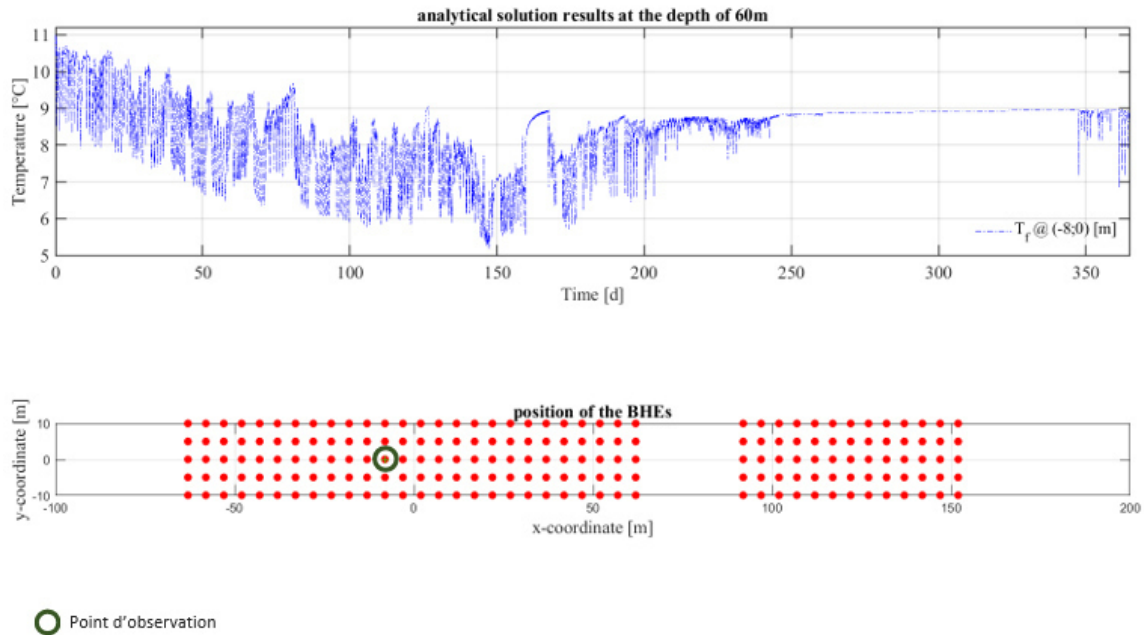


FIGURE 5.2 – Distribution de la température tout au long de l'année : en cas d'un point au milieu du premier groupe des sondes



## CHAPITRE 5. DIMENSIONNEMENT D'UN CHAMP DE SONDAS POUR LE BÂTIMENT B52

### Observation à un point au milieu : Groupe 2 des sondes

A un point d'observation au milieu des sondes dans le deuxième groupe de l'autre côté du B52, nous obtenons le même graphique que celui-là [5.2], ce qui fait que nous pourrions l'interpréter aussi de la même manière.

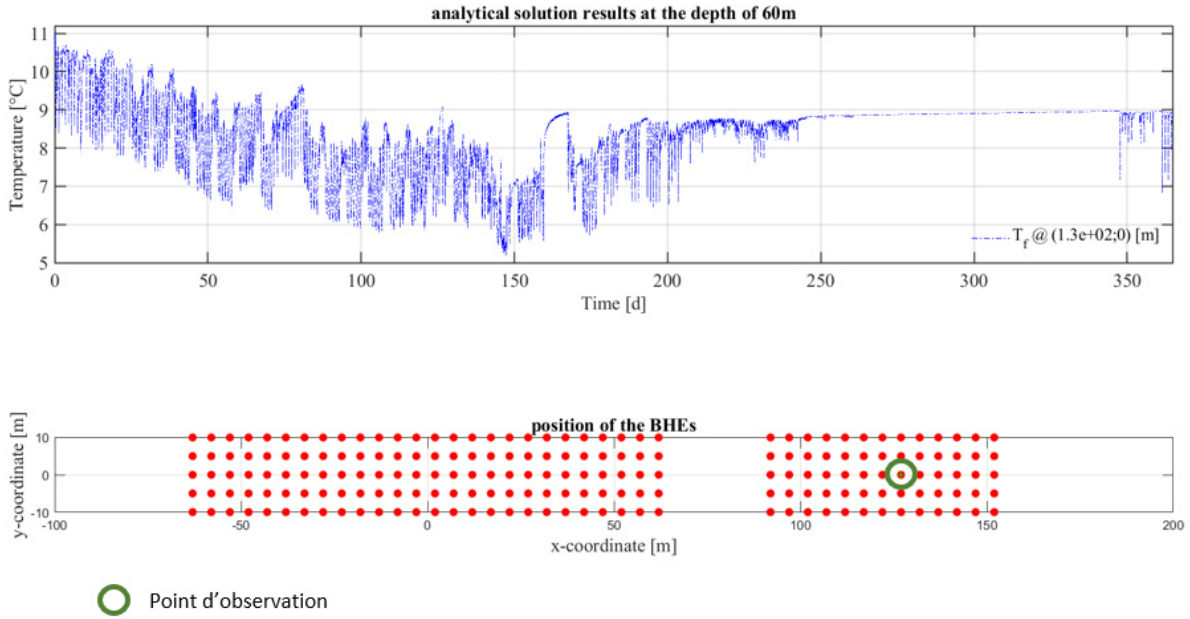


FIGURE 5.3 – Distribution de la température tout au long de l'année : en cas d'un point au milieu du deuxième groupe des sondes

### Observation à un point au coin

Nous choisissons un point d'observation aux coins du champ des sondes, l'un du côté des sondes du groupe 1 et l'autre du côté des sondes du groupe 2. A un point d'observation au coin du champ de sondes, nous observons une diminution de  $5,5^{\circ}\text{C}$  durant la période la plus froide de l'année. A la fin du cycle, la température est d'une valeur de  $T = 10^{\circ}\text{C}$  c'est à dire elle descend que de  $T = 1^{\circ}\text{C}$ , ceci peut-être expliquer par le fait qu'il y a moins d'interférence des sondes géothermiques à un point au coin du champ qu'à un point au milieu.

## CHAPITRE 5. DIMENSIONNEMENT D'UN CHAMP DE SONDES POUR LE BÂTIMENT B52

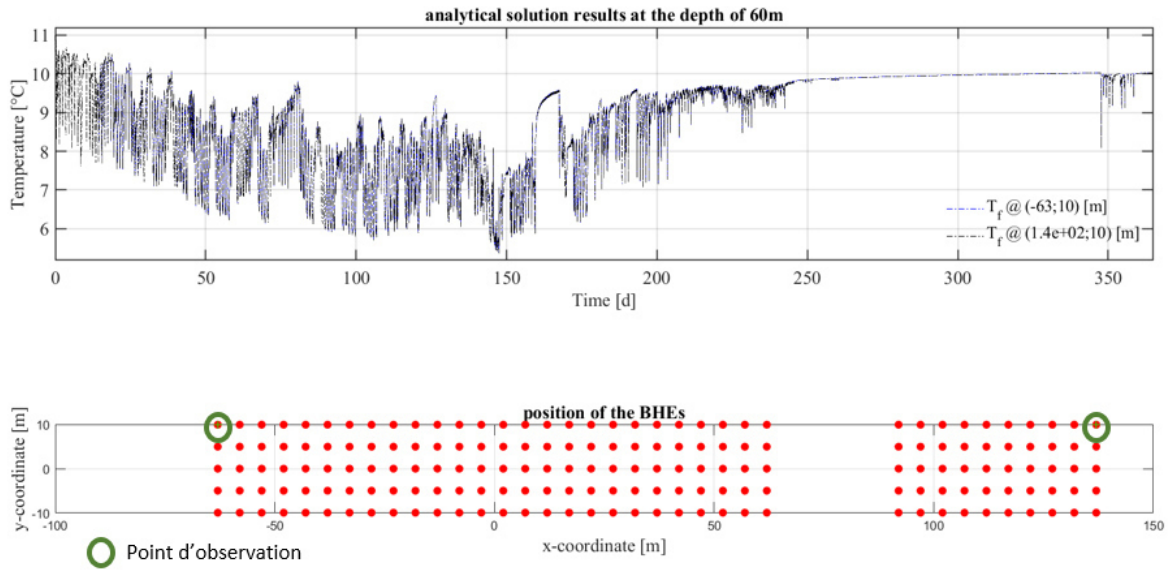


FIGURE 5.4 – Distribution de la température tout au long de l'année : en cas d'un point au coin du champ des sondes

Nous pourrions aussi faire la remarque que les deux sondes ont le même comportement vu que les deux graphes de la distribution de la température sont bien superposés.

### Observation à un point à l'extérieur

Nous prenons un point d'observation plus loin du champ de sondes pour voir l'influence des sondes sur le sol environnant. Nous observons d'après la figure [5.5] qu'il n'y a aucune influence du champ de sondes géothermiques à une distance de 25m plus loin.

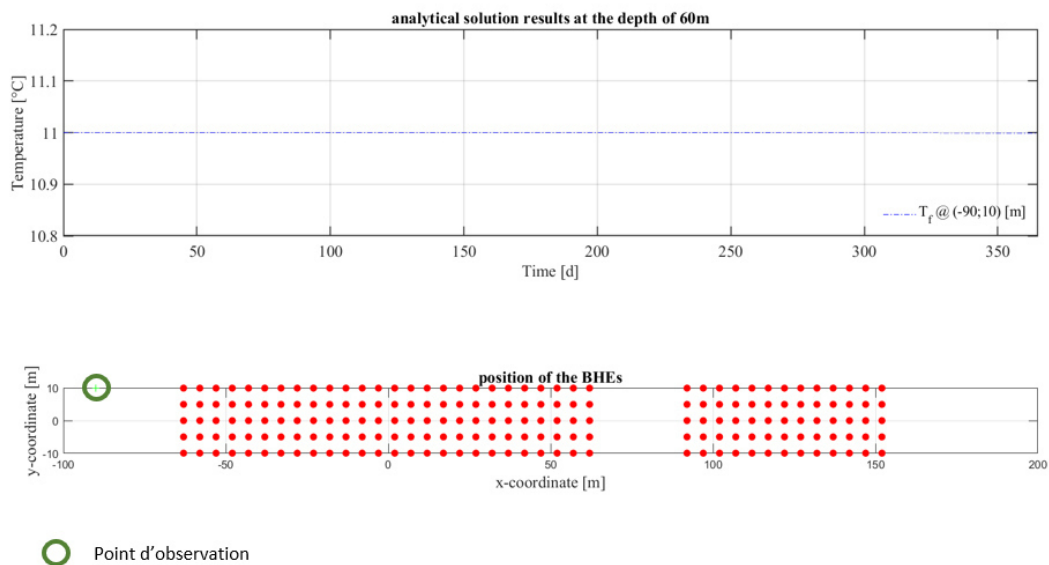


FIGURE 5.5 – Distribution de la température tout au long de l'année : en cas d'un point à l'extérieur

## 5.4 Modélisation sur 10 ans

Il est beaucoup plus réaliste de modéliser notre champ de sondes sur dix ans que sur une année pour voir le fonctionnement de notre système sur plusieurs années et vérifier s'il peut toujours remplir les besoins en chauffage tout au long de sa période de fonctionnement. Dans la section [5.3.2], il a été déjà évoqué que nous aurons une perte conséquente de la température après 10ans, et c'est bien le cas sur la figure [5.6].

Il est alors nécessaire de faire du refroidissement durant l'été et d'injecter de la chaleur au sol afin de recharger le sol et d'offrir un équilibre et de la durabilité au champ de sondes.

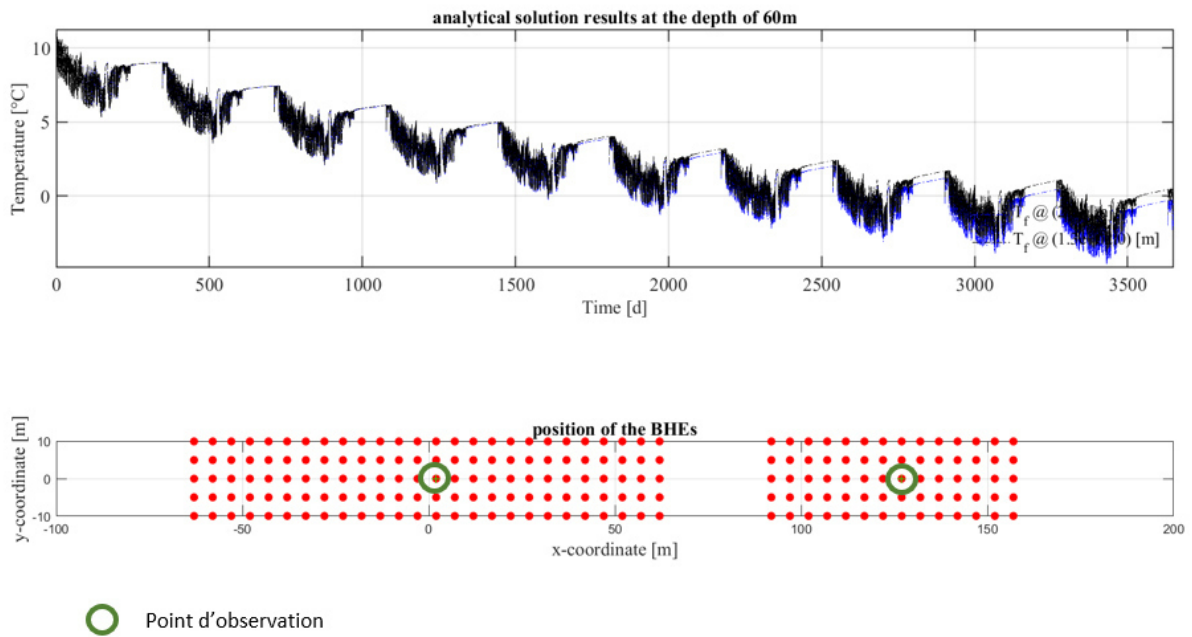


FIGURE 5.6 – Distribution de la température tout au long de 10 ans

## 5.5 Analyse de sensibilité

Cette analyse de sensibilité peut révéler la possibilité d'optimiser et d'exploiter un champ de sondes géothermiques dans le but d'économiser sans subir de pertes d'efficacité.

Cette analyse sera basé sur la manipulation de certains paramètres tels que la profondeur des sondes et le nombre de sondes.

### 5.5.1 Pourcentage des sondes géothermiques

Dans cette sous-section, nous tenons à évaluer les conséquences de la réduction des BHE sur la température du sol.

### 5.5.1.1 20% des sondes en moins :

Nous diminuons le nombre de sondes géothermiques de 20%, ce qui nous fait 40 sondes en moins, pour voir son influence sur la distribution de la température.

Première observation est au niveau de la température minimale à laquelle nous descendons qui est de  $T = 4^{\circ}\text{C}$ , ce qui est normal vu que la charge thermique est liée aux nombres de sondes et plus le nombre de sondes est petit plus la charge thermique est grande.

La température à la fin du cycle est aux alentours de  $T = 8,3^{\circ}\text{C}$ , nous perdons encore plus dans ce cas de figure.

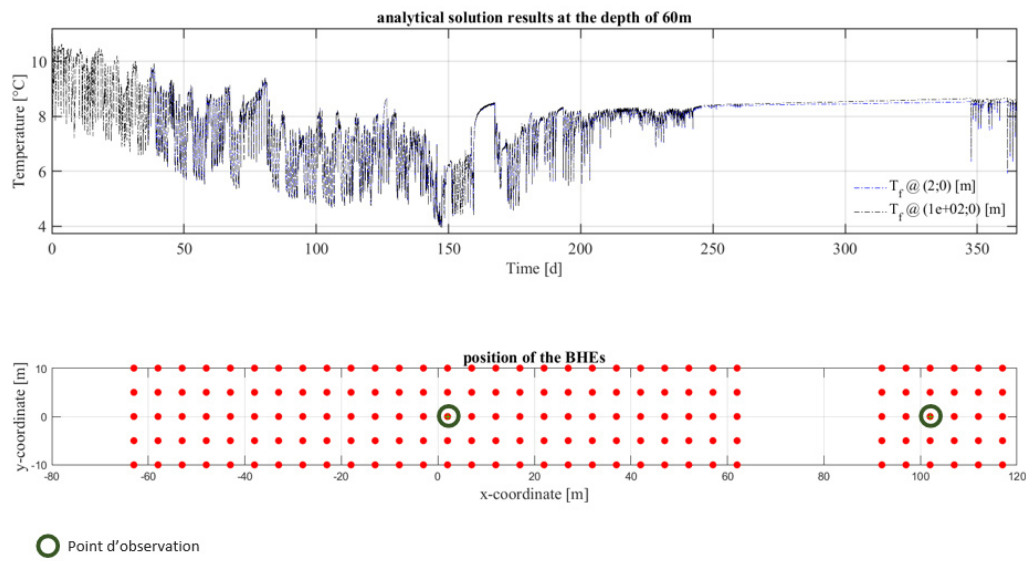


FIGURE 5.7 – Distribution de la température en réduisant le nombre de sondes par 20%

### 5.5.1.2 10% des sondes en moins :

Nous réduisons le nombre de sondes de 10% ce qui nous fait 20 sondes en moins et nous observons l'influence de cela sur la distribution de la température.

La température minimale est d'environ  $T = 5^{\circ}\text{C}$ , et la température à la fin du cycle est d'environ  $T = 9^{\circ}\text{C}$ , nous perdons environ  $T = 2^{\circ}\text{C}$ . Il est envisageable de réduire le nombre de sondes de 10% couplé à de la ré-injection durant l'été.

## CHAPITRE 5. DIMENSIONNEMENT D'UN CHAMP DE SONDES POUR LE BÂTIMENT B52

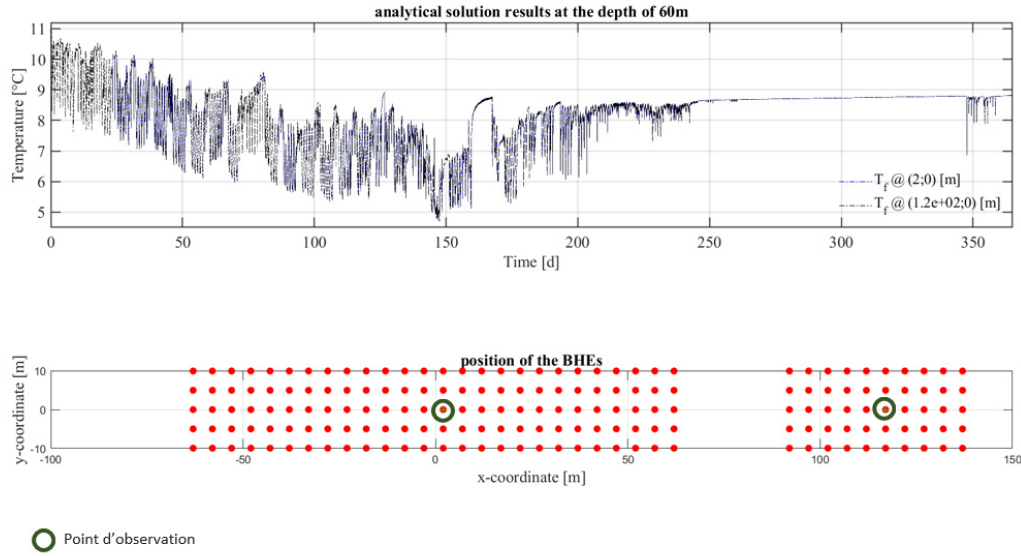


FIGURE 5.8 – Distribution de la température en réduisant le nombre de sondes par 10%

### 5.5.2 Année plus froide

Étant donné que l'année 2021-2022 n'est pas l'année la plus froide sur les dix dernières années d'après [4.1]. Nous allons dès lors estimer les besoins d'une année plus froide en multipliant par un facteur de 1,2 afin de les majorer de 20%. Ceci reste une hypothèse prudente de l'estimation des besoins d'une année plus froide.

La température minimale, durant la période de pic de demande, est de 4°C d'après la figure [5.9], à la fin du cycle la température est de  $T = 8,4^{\circ}\text{C}$  qui n'est pas beaucoup différente de la perte de température en cas de l'année choisie pour le dimensionnement mais qui peut être conséquente sur 10 ans.

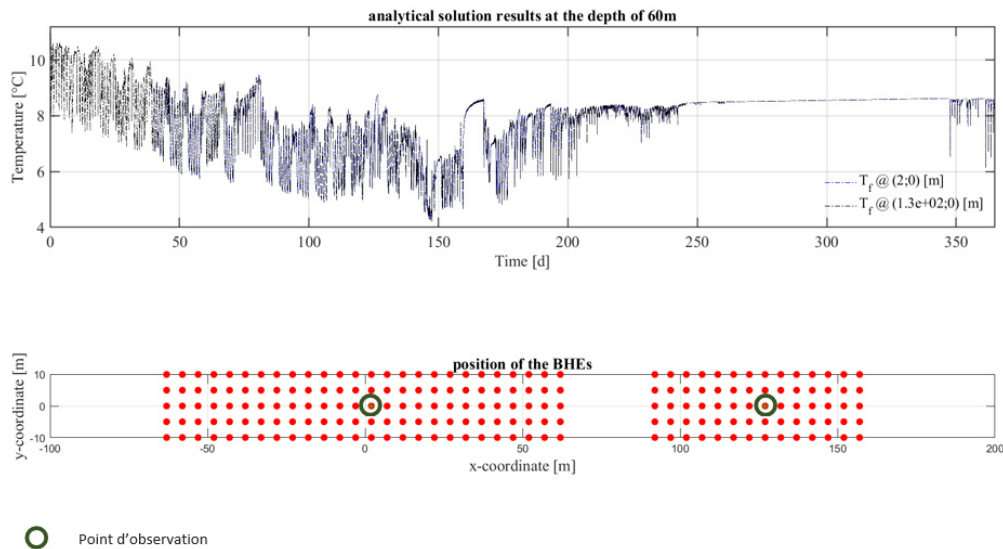


FIGURE 5.9 – Distribution de la température durant une année plus froide

### 5.5.3 Profondeur des sondes

Puisque dans le cas d'un système fermé à basse température, la profondeur maximale est d'environ 300 m, nous décidons d'augmenter la profondeur des sondes à 250m.

L'augmentation de la profondeur des sondes va nous permettre de mieux exploiter la chaleur dans le sous-sol. Après avoir augmenté la profondeur jusqu'à 250 m, nous calculons le nombre de sondes.

$$N_{BHE} = \frac{18305,82}{250} = 97 \text{ sondes.}$$

D'après la figure [5.10], la température minimale est de  $T = 5,7^\circ\text{C}$  durant la période la plus froide.

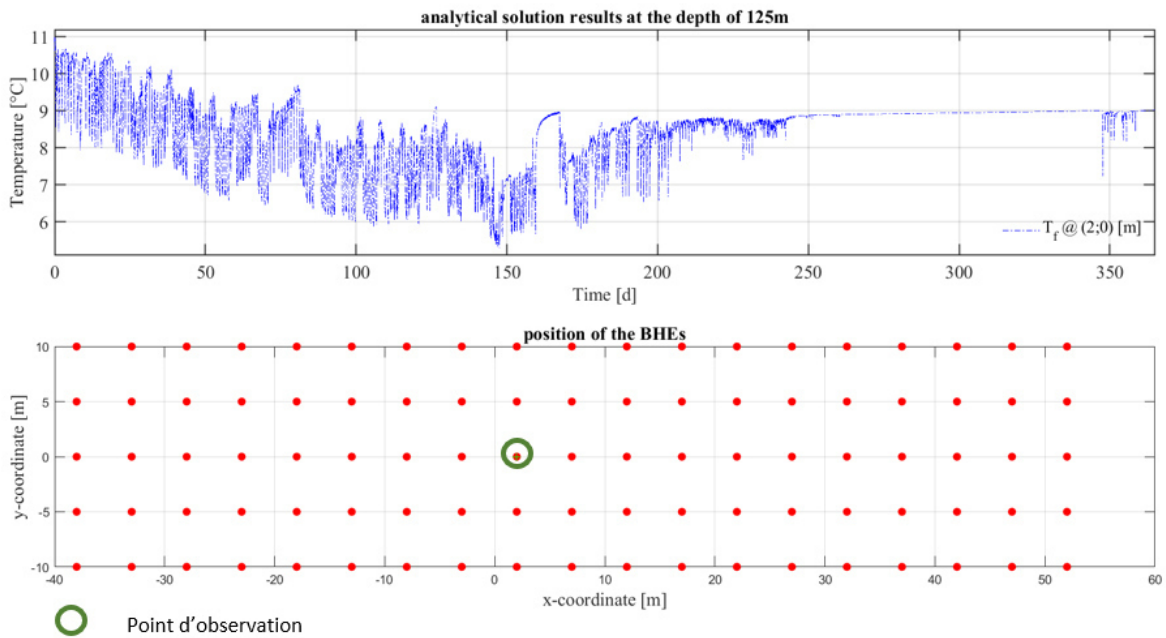


FIGURE 5.10 – Distribution de la température en cas d'une profondeur de 250m

Nous constatons qu'en augmentant la profondeur des sondes, nous pourrions en premier lieu réduire le nombre de sondes. Dans ce cas nous avons 64 sondes en moins.

Pourtant pour faire des forages d'une profondeur de 250 m, ceci peut-être coûteux et pas très rentable. En plus, les forages qui ont été réalisés précédemment sur site ne dépassent pas 100m.

### 5.5.4 Système monovalent

Comme le système a été dimensionné comme étant bivalent pour éviter de sur-dimensionner la pompe à chaleur géothermique, dans ce cas, il a été supposé que seulement la pompe à chaleur géothermique qui va remplir tous les besoins du bâtiment et il n'y aura aucun système d'appoint supplémentaire.



## CHAPITRE 5. DIMENSIONNEMENT D'UN CHAMP DE SONDES POUR LE BÂTIMENT B52

Nous faisons plus d'écrêtage, les besoins en chaud deviennent alors

$$Q_{besoin} = 898,30 \text{ MW}$$

Si nous comparons la figure [5.11] par rapport aux précédentes, la première remarque que nous pourrions faire est que pendant la période la plus froide de l'année nous descendons jusqu'à  $T = 3^\circ\text{C}$  ainsi que la température finale après la fin d'un cycle est d'environ  $T = 8^\circ\text{C}$  ce qui est attendu vu qu'on va extraire plus de chaleur pour répondre à de grands besoins durant la période froide.

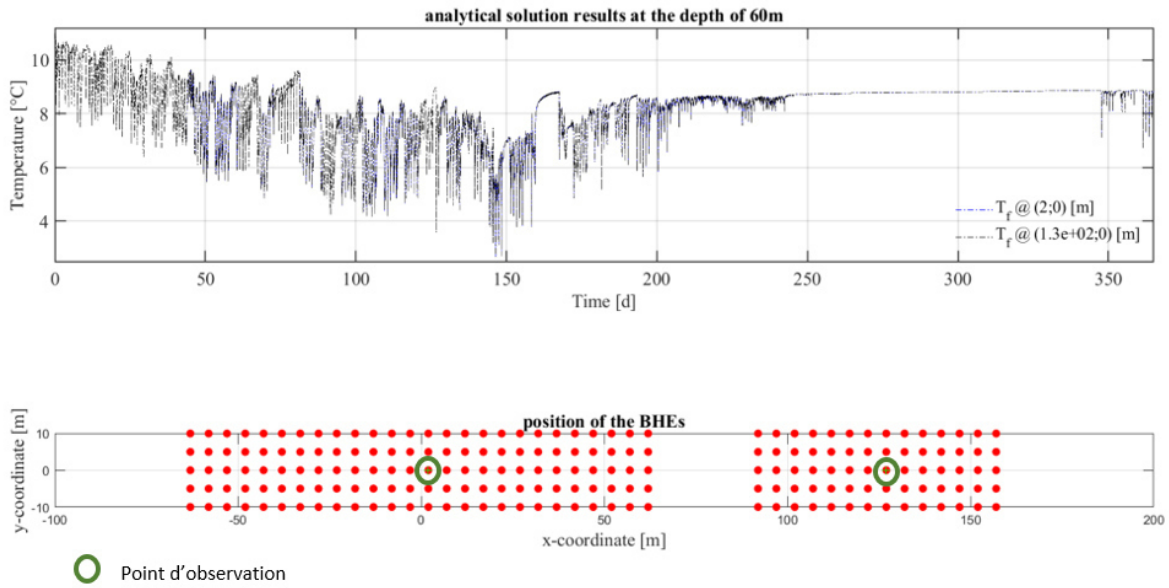


FIGURE 5.11 – Distribution de la température en cas de système monovalent

### 5.5.5 Re-injection de la chaleur en été

La ré-injection de la chaleur pendant l'été ou la régénération du champ de sondes géothermiques va nous permettre d'avoir un système plus équilibré et nous pourrions aussi réduire le nombre de sondes nécessaires pour répondre à la demande.

Il n'est pas possible d'évaluer ou d'estimer des besoins énergétiques pour le refroidissement des bâtiments vu que ça nécessite la connaissance d'une série de caractéristiques des bâtiments, dès nous considérerons que les apports en chaud et en froid par le système de sondes géothermique sont équilibrés sur un cycle annuel.

Donc nous faisons de la régénération à 100%, autrement dit nous injectons dans le sol, pendant l'été, la même quantité de chaleur extraite durant l'hiver.

$$Q_{besoin-chaud} = Q_{besoin-froid}$$

La ré-injection de la chaleur dans le sol sera réaliser de Mai à Septembre selon des facteurs qui tiennent en compte du fait que par exemple en juillet le besoin en refroidissement est plus conséquent que le besoin en mai. Les facteurs de refroidissement sont distribués de la manière suivante :

## CHAPITRE 5. DIMENSIONNEMENT D'UN CHAMP DE SONDES POUR LE BÂTIMENT B52

- Mai  $\rightarrow 0,13$
- Juin  $\rightarrow 0,22$
- Juillet  $\rightarrow 0,28$
- Août  $\rightarrow 0,28$
- Septembre  $\rightarrow 0,09$

Puisque, nous faisons de la régénération du champ BHE à 100% d'après la figure [2.12] :

$$P_{spécifique} = 25 \text{ W/m.}$$

Dès lors, la longueur totale préliminaire [2.8] du champ des sondes vaut :

$$L_{totale} = \frac{311 \times 10^3}{25} = 12450 \text{ m.}$$

Après avoir corrigé la longueur totale des sondes à l'aide des facteurs correcteurs, la longueur totale corrigée vaut :

$$L_{corrigé} = 16447,62 \text{ m.}$$

La régénération du champ de sondes nous a permis d'avoir moins de sondes comme il est visible sur la figure [5.12].

$$N_{BHE} = \frac{16447,62}{120} = 137 \text{ sondes.}$$

D'après la figure [5.12], nous remarquons que nous descendons jusqu'à  $T = 4,5^\circ\text{C}$  pendant la première année pour que le système se stabilise à  $T = 5^\circ\text{C}$  pendant les années qui suivent.

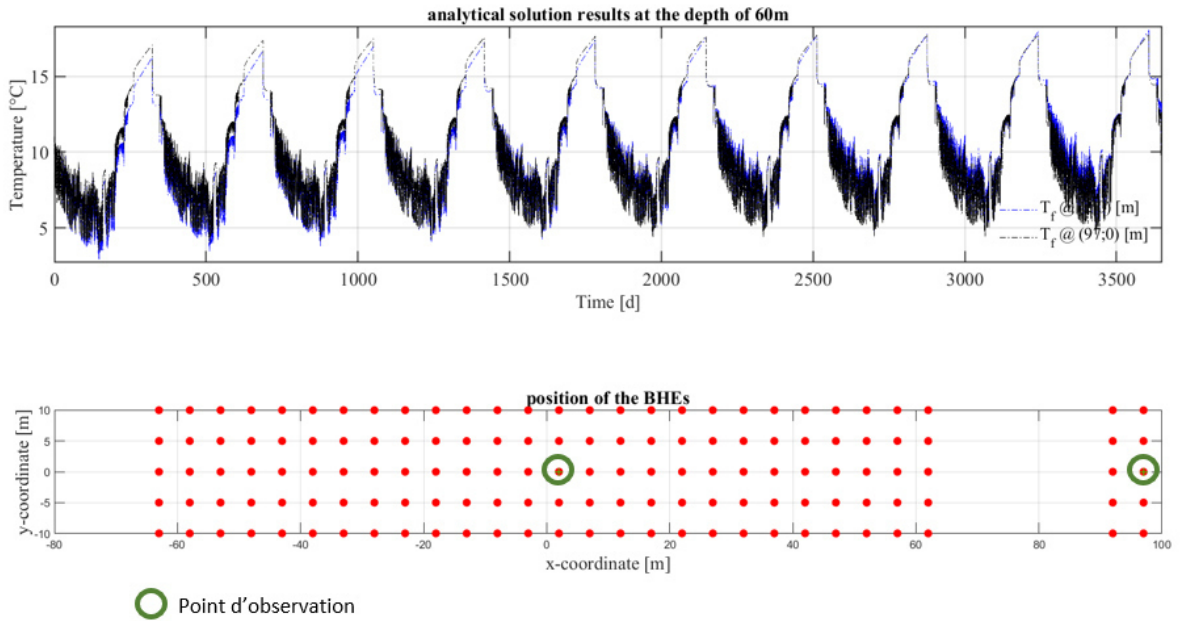


FIGURE 5.12 – Distribution de la température sur 10 ans après ré-injection



## CHAPITRE 5. DIMENSIONNEMENT D'UN CHAMP DE SONDES POUR LE BÂTIMENT B52

Puisque nous équilibrons le cycle annuel en égalant l'apport énergétique du sol en chaud et en froid sur un cycle annuel, il n'y a aucune dérive de la température du sol au fil des années d'utilisation d'après la figure [5.12].

Nous pourrions aussi modéliser sur une année, d'après la figure [5.13] la température diminue lors de la période de la forte demande jusqu'à ce qu'elle trouve un pallier en dessous duquel la température ne descend plus et puis remonte jusqu'à  $T = 15^\circ\text{C}$  lors de la recharge du sol pour revenir finalement à sa valeur initiale.

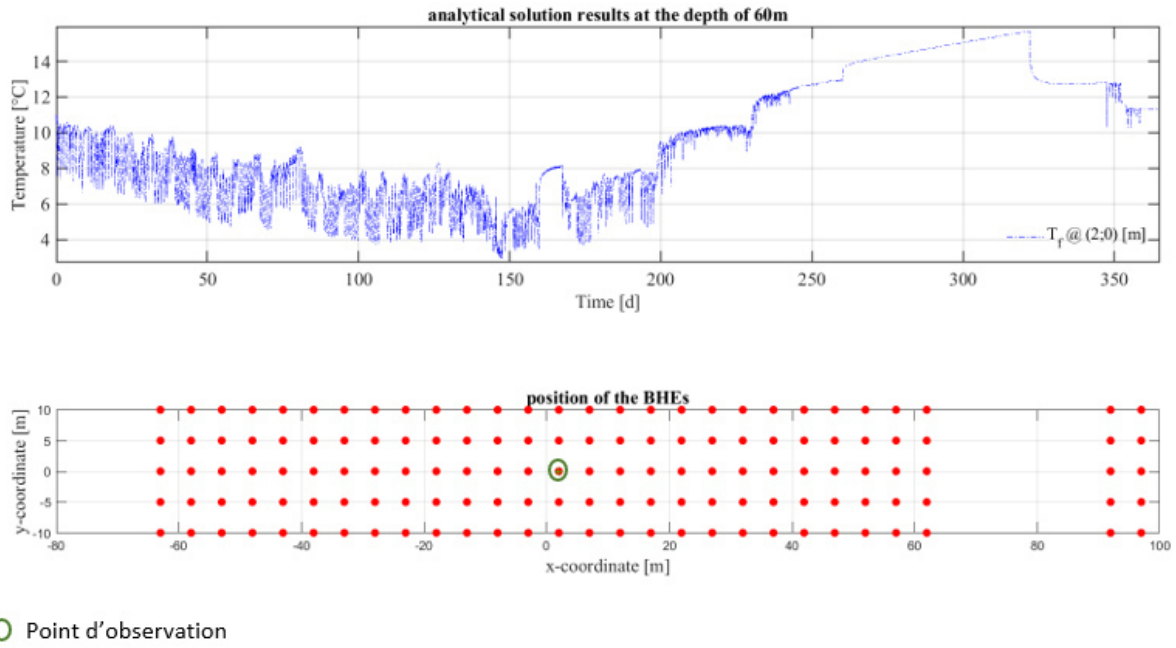


FIGURE 5.13 – Distribution de la température sur une année après ré-injection

Nous avons déjà évoqué dans cette partie [5.5.1] qu'il est possible de réduire le nombre de sondes de 10% quand nous faisons de la ré-injection.

Le température descend jusqu'à  $T = 4^\circ\text{C}$  pour remonter pendant la période de recharge du sol jusqu'à  $T = 15,5^\circ\text{C}$  pendant le mois de juillet et d'août pour se stabiliser à la fin du cycle à  $T_0 = 11^\circ\text{C}$ .

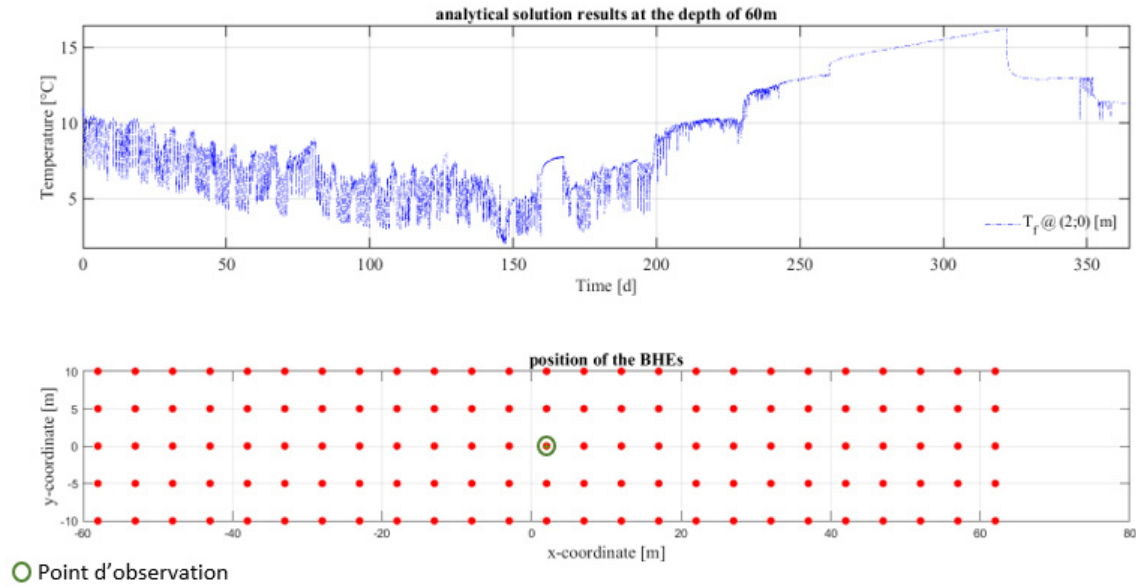


FIGURE 5.14 – Distribution de la température après ré-injection et réduction du nombre de sondes par 10%

## 5.6 Conclusion

Ce chapitre passe en revue le pré-dimensionnement du champ des sondes géothermiques à l'aide de la norme néerlandaise ISSO 73, qui conduit à 201 sondes sur 120m espacées de 5m.

La modélisation sur une année montre que le système permet de reprendre des pics de charge de 24h durant lesquelles la pompe géothermique fonctionne à plein régime, tout en conservant une température raisonnable du sol lors du cycle, pourtant ceci engendre un déficit de température qui s'accumule d'une année à une autre.

Ensuite, la modélisation à long terme réalisée pour un horizon temporel de 10 ans, a confirmé que l'utilisation d'un champ de sondes, pour extraire la chaleur du sol, a une grande influence sur l'abaissement de la température à long terme comme il a été déjà supposé lors de la modélisation sur une année.

Par conséquent, il a été proposé de faire de la ré-injection de la chaleur durant l'été afin d'offrir au système un équilibre et éviter d'épuiser le sol.

En parallèle, une analyse de sensibilité a été réalisé pour discuter l'influence de certains paramètres sur le système géothermique, tel que la profondeur des sondes et les besoins en chaleur.

Dans le chapitre qui suit, nous allons étendre notre système de sondes sur tout le réseau.

# Chapitre 6

## Dimensionnement d'un champ de sondes pour le réseau de chaleur

Dans ce chapitre, nous allons présenter le dimensionnement du champ de sondes pour tous les bâtiments du campus. Ce chapitre est une extension du chapitre précédent [5].

### 6.1 Prédimensionnement des sondes géothermiques

Dans cette première section, nous allons comparer entre la conception d'un système géothermique pour chaque bâtiment indépendamment des autres et la conception d'un système pour tout le réseau comprenant tous les bâtiments.

Nous utiliserons la norme néerlandaise pour le prédimensionnement déjà présenté dans le chapitre [2].

#### 6.1.1 Prédimensionnement pour chaque bâtiment du réseau

Les mêmes hypothèses ont été élaboré concernant les facteurs de correction pour les autres bâtiments du campus.

Bâtiment	$P_{ground}$ [kW]	$L_{totale}$ [m]	$L_{corrigé}$ [m]	Nombre de sondes
B52	311,25	18305,82	24187,67	201
B48	12,75	750	990,82	8
B28	255	15000	19816,41	165
B37	105	6176,47	8159,69	68
B53	97,5	5735,29	7576,86	63
B26	37,5	2205,88	2914,17	24
B65	13,5	794,11	1049,39	9
B47 et B49	180	10588,23	13988,05	117

TABLE 6.1 – Prédimensionnement des sondes pour chaque bâtiment

## CHAPITRE 6. DIMENSIONNEMENT D'UN CHAMP DE SONDES POUR LE RÉSEAU DE CHALEUR

Au total, il nous faut 655 sondes pour desservir tous les bâtiments du campus indépendamment des autres.

### 6.1.2 Prédimensionnement pour le réseau

En tenant compte de l'utilisation d'un système bivalent, les besoins écrêtés :

$$Q_{\text{besoin}} = 2307,55 \text{ MW}$$

$$P_{\text{ground}} = 837,75 \text{ kW}$$

Ce qui nous donne une longueur de sonde préliminaire totale qui vaut 49279,41 m.

La longueur corrigée après application des facteurs de correction vaut dès lors 65102,73 m.

Et en divisant la longueur corrigée par la puissance d'extraction, le nombre sondes est de 542 sondes.

Le calcul plus détaillé est présenté dans l'annexe [D].

### 6.1.3 Discussions

La première remarque c'est qu'en optant pour un réseau de chaleur qui boucle tous les bâtiments du campus, nous aurons 113 sondes en moins ce qui est prévu.

Nous pourrions justifier ceci par le fait que dans un réseau de chaleur les pics de demande en chaleur de chaque bâtiment n'apparaissent pas nécessairement exactement au même moment ce qui permet ainsi de lisser la courbe des besoins. En d'autres termes, le pic de puissance du réseau est inférieur à la somme des pics de puissance de chaque bâtiment.

## 6.2 Emplacement des sondes

Le choix de l'emplacement des sondes a été fait en essayant d'éviter les zones boisées et aussi nous avons opté pour des zones qui sont pas très loin des bâtiments et qui sont à au moins 2 m des fondations des bâtiments. Aussi il faut prévoir un grand espace pour pouvoir respecter la distance entre les sondes pour éviter qu'elles s'influencent mutuellement et que le sol puisse se régénérer.



FIGURE 6.1 – Distribution de la température tout au long de l'année

## 6.3 Modélisation

Nous utilisons le même script *MATLAB* pour effectuer la modélisation du champ de sondes et observer la réponse thermique du sous-sol.

### 6.3.1 Modélisation sur une année

La température descend jusqu'à  $T = 6,5^{\circ}\text{C}$  lors de la période la plus froide mais qui remonte après à  $9^{\circ}\text{C}$ . Également, la température ne diminue pas jusqu'à  $0^{\circ}\text{C}$ . Nous perdons  $T = 1,8^{\circ}\text{C}$  environ à la fin du cycle, ce qui peut être conséquent car nous aurons un déficit de température qui va s'accumuler à long terme. Nous pourrions désormais penser à faire de la ré-injection durant la période chaude de l'année pour recharger le sol.

## CHAPITRE 6. DIMENSIONNEMENT D'UN CHAMP DE SONDES POUR LE RÉSEAU DE CHALEUR

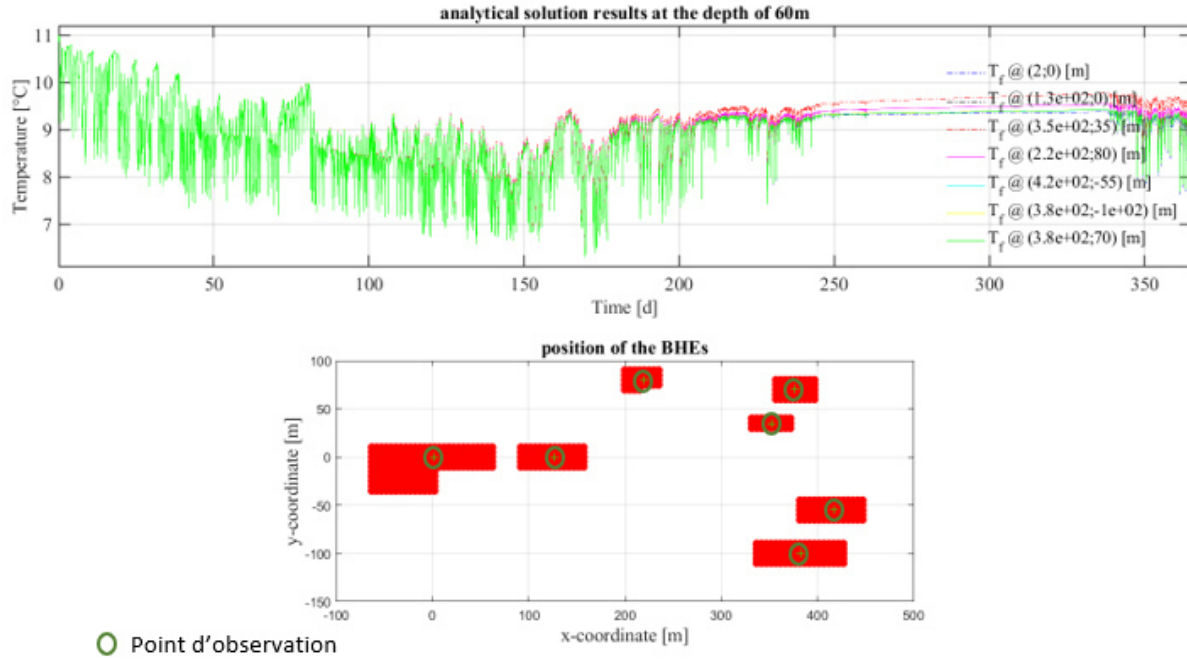


FIGURE 6.2 – Distribution de la température tout au long de l'année

### 6.3.2 Modélisation sur 10 ans

La modélisation à long terme d'un système des sondes géothermiques implique la prédiction de sa performance thermique sur la durée de vie prévue du système. Il est aussi intéressant de visualiser les interactions entre la boucle sol et la boucle bâtiment sur le long terme afin de prédire les performances du système.

Nous pourrions remarquer un déficit au niveau de la température qui s'accumule d'une année à une autre [6.3]. L'observation de cet emmagasinement de déficit a été déjà évoqué quand nous avons modélisé le champ de sondes sur une année vu que le sol n'est ni relaxé ni régénéré.



## CHAPITRE 6. DIMENSIONNEMENT D'UN CHAMP DE SONDES POUR LE RÉSEAU DE CHALEUR

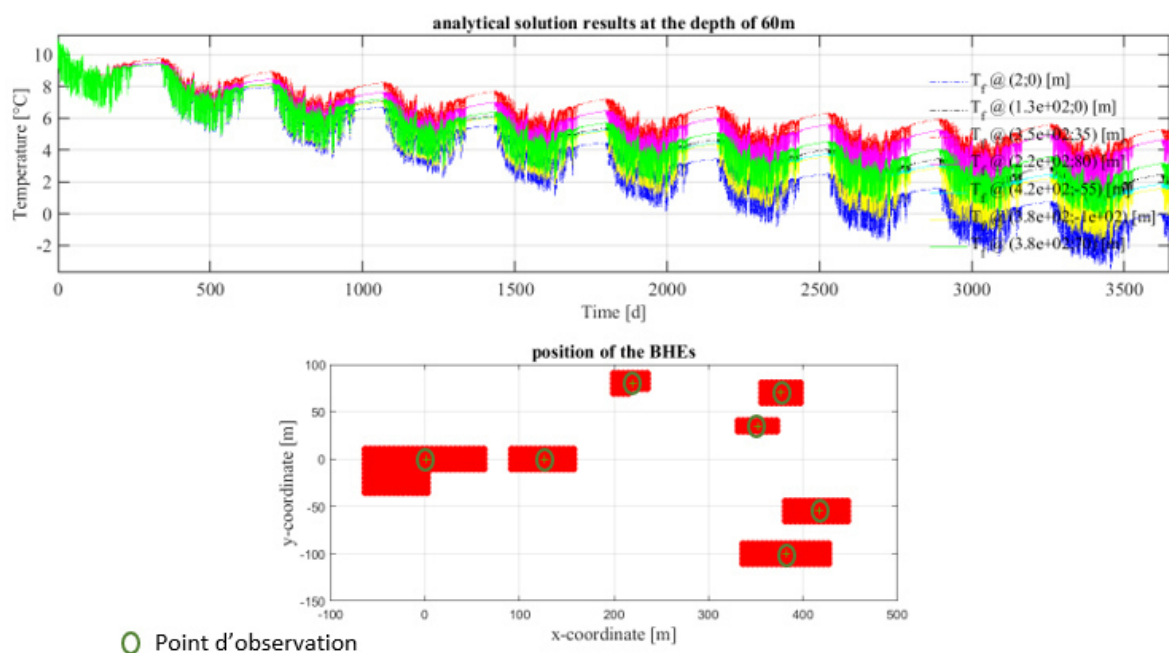


FIGURE 6.3 – Distribution de la température tout au long de 10 ans

Comme solution, il serait indispensable de faire de l'injection de calories dans le sol pour la régénération du sol et le rafraîchissement du bâtiment.

### 6.4 Analyse de sensibilité

Nous réalisons une analyse de sensibilité afin d'évaluer les effets de la modification des paramètres de conception du système (par exemple la profondeur des forages, le nombre des sondes...).

#### 6.4.1 10% de sondes en moins

En réduisant le nombre de sondes de 10%, la température minimale est de  $T=5^{\circ}\text{C}$  et qui remonte par la suite après le pic de demande. A la fin du cycle, la température est aux alentours de  $T=9^{\circ}\text{C}$ .

## CHAPITRE 6. DIMENSIONNEMENT D'UN CHAMP DE SONDES POUR LE RÉSEAU DE CHALEUR

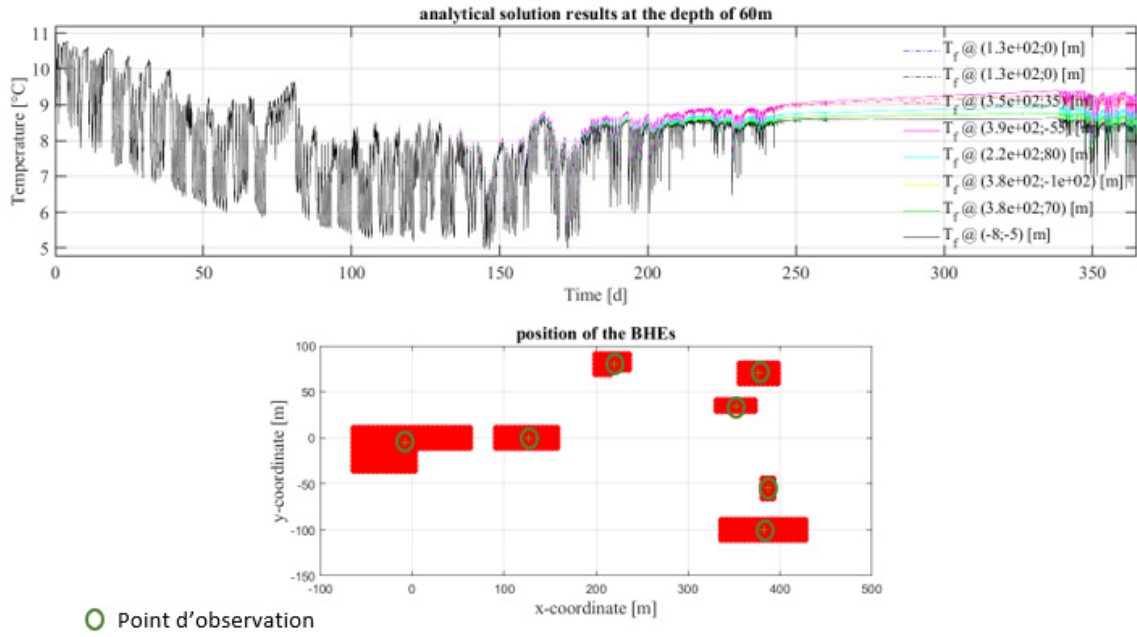


FIGURE 6.4 – Distribution de la température en réduisant le nombre de sondes par 10%

### 6.4.2 Système monovalent

En cas de système monovalent où seulement la pompe à chaleur géothermique fonctionnera, les besoins deviennent :

$$Q_{\text{besoin}} = 2512,47 \text{ MW}$$

Nous observons que la température minimale descend aux alentours  $T = 4^\circ\text{C}$  pendant les pics de demandes et à la fin du cycle la température est d'environ  $T = 8^\circ\text{C}$ .



## CHAPITRE 6. DIMENSIONNEMENT D'UN CHAMP DE SONDES POUR LE RÉSEAU DE CHALEUR

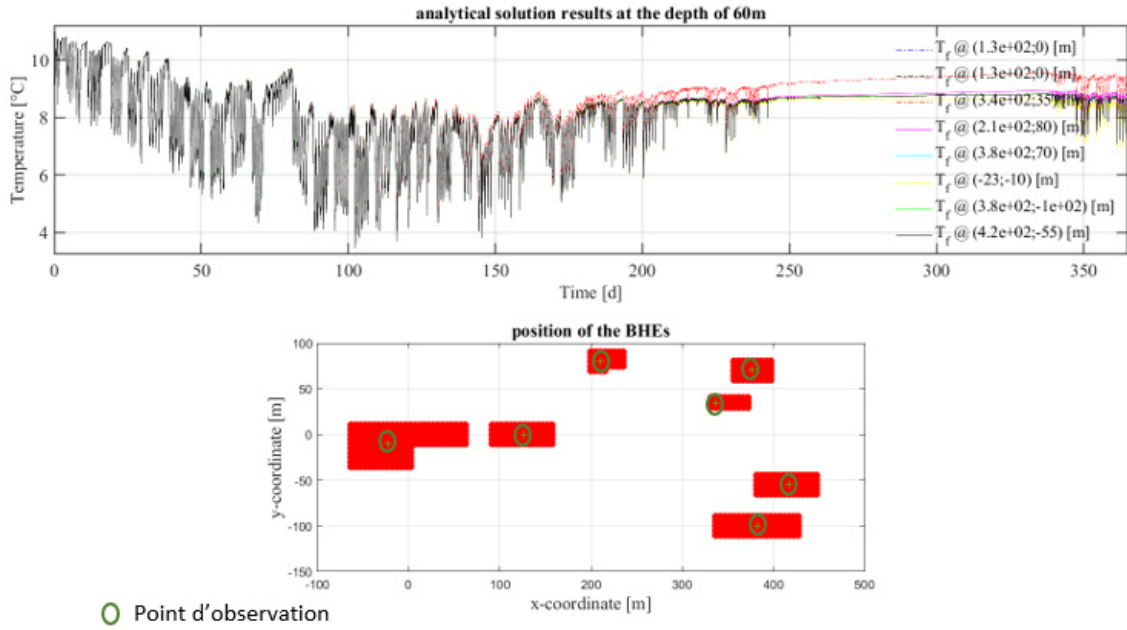


FIGURE 6.5 – Distribution de la température en cas d'un système monovalent

### 6.4.3 Année plus froide

Nous estimons les besoins d'une année plus froide que l'année considérée et nous majorons les besoins par 20%.

$$Q_{besoin} = 2769 \text{ MW}$$

En cas d'une année plus froide, le système semble bien fonctionner vu qu'à la fin du cycle la température est de  $T = 9^\circ\text{C}$ . Par contre, nous avons des pics de température, pendant l'hiver, de  $3,9^\circ\text{C}$  mais qui n'influencent pas après le fonctionnement vu que la température remonte et se stabilise après sur des températures moins conséquentes vu qu'il n'y a pas une grande demande.

## CHAPITRE 6. DIMENSIONNEMENT D'UN CHAMP DE SONDES POUR LE RÉSEAU DE CHALEUR

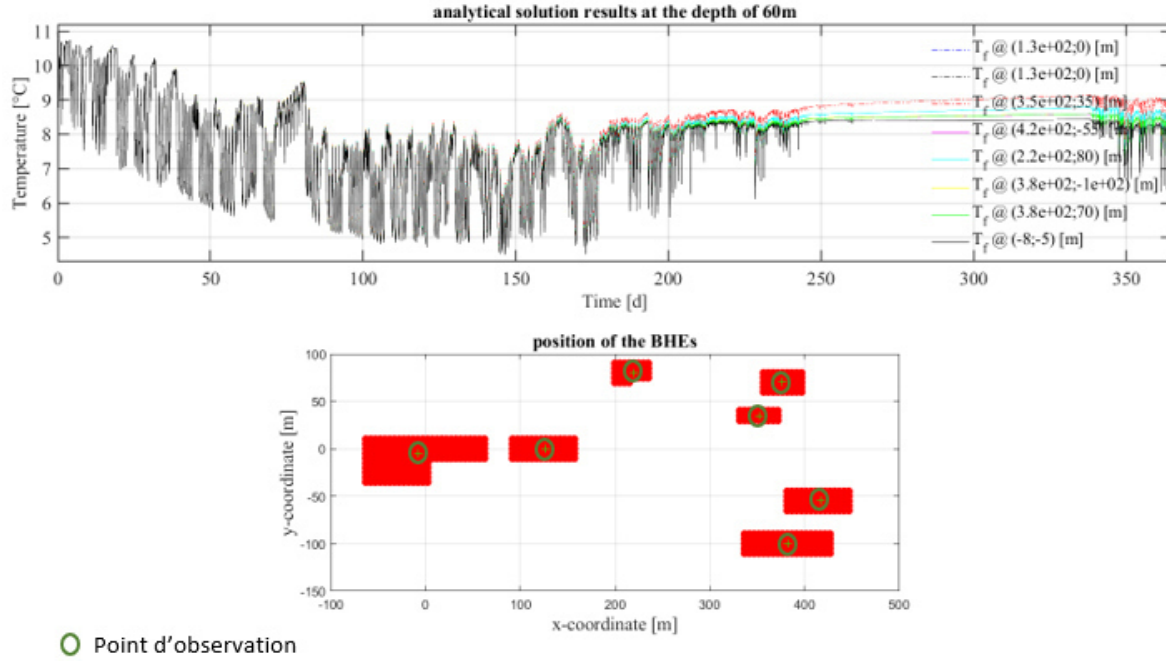


FIGURE 6.6 – Distribution de la température en cas d'une année plus froide

### 6.4.4 Profondeur des sondes

Nous augmentons la profondeur des forages jusqu'à 250 m, ce qui va réduire le nombre de sondes et nous aurons 282 sondes en moins.

$$N_{BHE} = \frac{65102,73}{250} = 260 \text{ sondes.}$$

L'augmentation de la profondeur des sondes nous a permis diminuer le nombre de sondes ainsi que la température minimale est de  $T = 5,9^{\circ}\text{C}$  pourtant le système est sous-dimensionné il serait intéressant d'augmenter le nombre de sondes pour descendre à des températures qui sont plus grandes que  $T = 6,5^{\circ}\text{C}$ , qui est la température minimale en cas d'une profondeur de 120 sondes.

## CHAPITRE 6. DIMENSIONNEMENT D'UN CHAMP DE SONDES POUR LE RÉSEAU DE CHALEUR

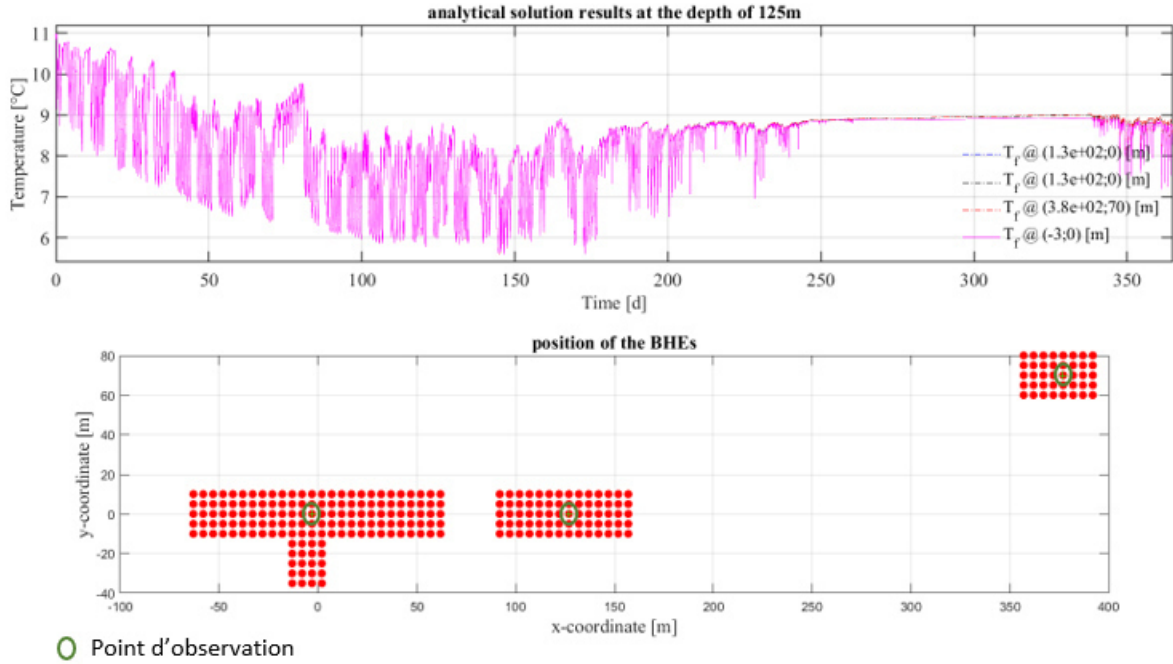


FIGURE 6.7 – Distribution de la température en cas d'une profondeur de 250m.

### 6.4.5 Ré-injection

Nous faisons de la ré-injection de la même manière que pour la bâtiment B52, en respectant le fait que

$$Q_{\text{besoin-chaueur}} = Q_{\text{besoin-froid}}$$

La ré-injection de la chaleur dans le sol sera réaliser de Mai à Septembre selon des facteurs qui tiennent en compte du fait que par exemple en juillet le besoin en refroidissement est plus conséquent que le besoin en mai. Les facteurs de refroidissement sont distribués de la manière suivante :

- Mai  $\rightarrow 0,13$
- Juin  $\rightarrow 0,22$
- Juillet  $\rightarrow 0,28$
- Août  $\rightarrow 0,28$
- Septembre  $\rightarrow 0,09$

Puisque, nous faisons de la régénération du champ BHE à 100% d'après la figure [2.12] :

$$P_{\text{spécifique}} = 25 \text{ W/m.}$$

Dès lors, la longueur totale préliminaire [2.8] du champ des sondes vaut :

$$L_{\text{totale}} = \frac{1117 \times 10^3}{25} = 33510 \text{ m}$$

## CHAPITRE 6. DIMENSIONNEMENT D'UN CHAMP DE SONDES POUR LE RÉSEAU DE CHALEUR

Après avoir corrigé la longueur totale des sondes à l'aide des facteurs correcteurs, la longueur totale corrigée vaut :

$$L_{\text{corrigé}} = 44269,85 \text{ m.}$$

La régénération du champ de sondes nous a permis d'avoir moins de sondes comme il est visible sur la figure [5.12].

$$N_{BHE} = \frac{44269,85}{120} = 369 \text{ sondes.}$$

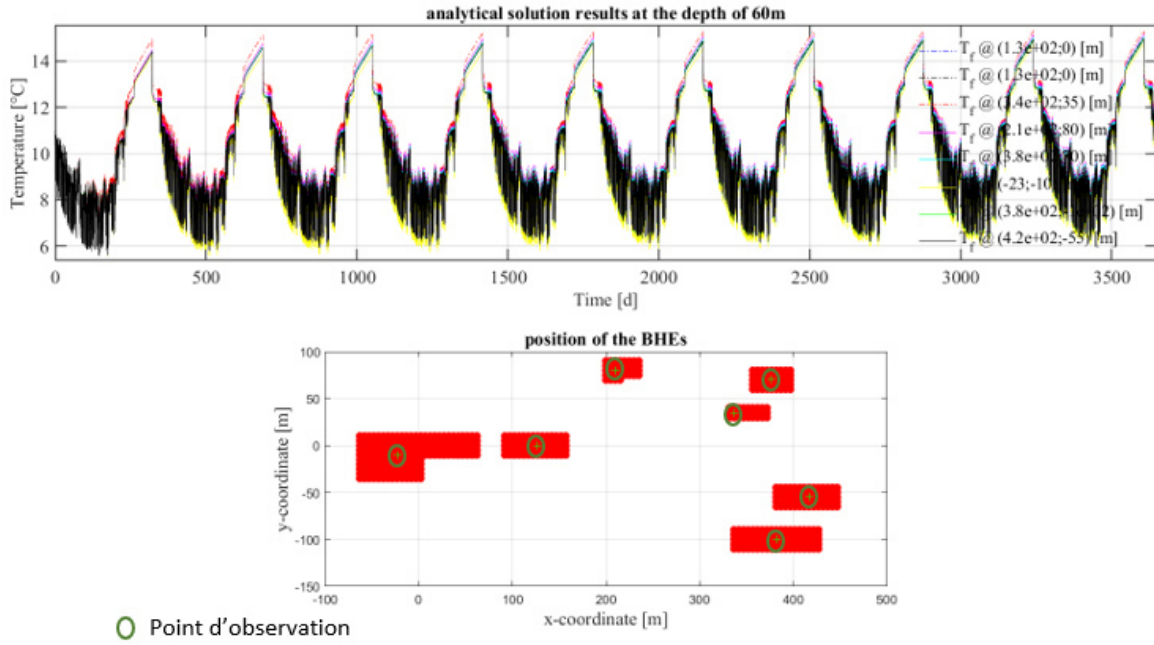


FIGURE 6.8 – Distribution de la température sur 10 ans après ré-injection

Nous pourrions aussi faire la modélisation sur une année, d'après la figure [6.9] la température du sol diminue lors de la période de pic jusqu'à trouver un pallier en dessous duquel la température ne descend plus et puis remonte lors de la recharge du sol jusqu'à 16°C pour revenir finalement à sa valeur initiale ( $T_0 = 11^\circ\text{C}$ ), il n'y a même pas ce degré de perdu.

## CHAPITRE 6. DIMENSIONNEMENT D'UN CHAMP DE SONDAS POUR LE RÉSEAU DE CHALEUR

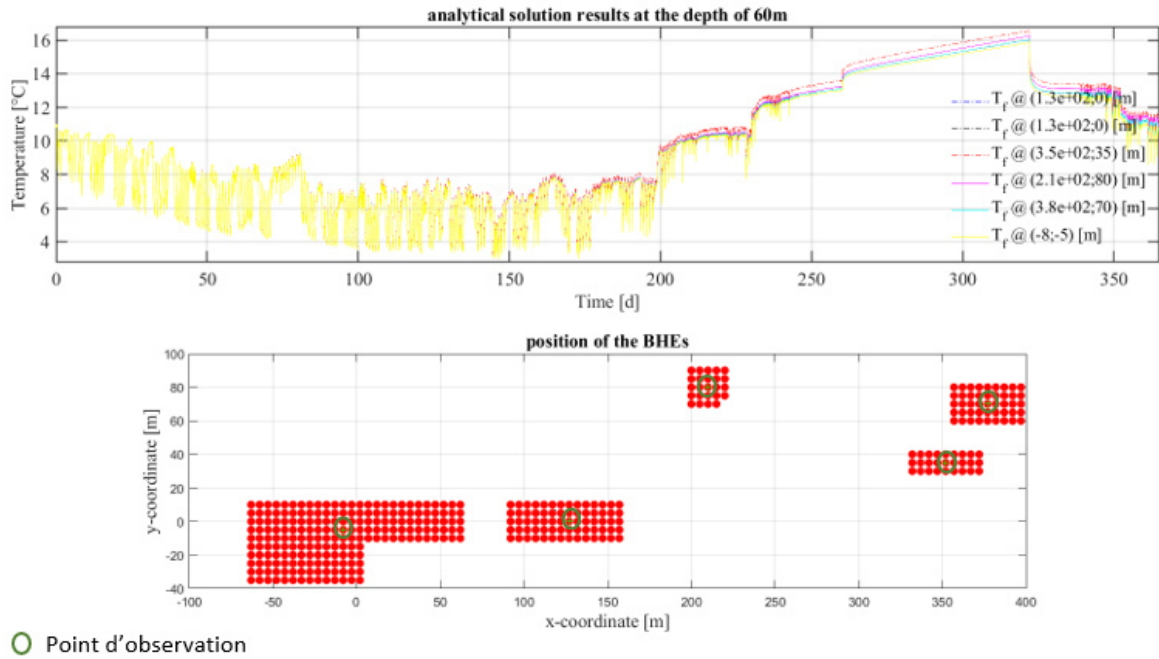


FIGURE 6.9 – Distribution de la température sur une année après ré-injection

### 6.5 Conclusion

Ce chapitre a été une extension du chapitre qui le précède, vu qu'il présente le prédimensionnement du champ de sondes dans tout le campus.

Le pré-dimensionnement d'un champ de sondes pour tout le réseau de chaleur, à l'aide de la norme néerlandaise ISSO 73, conduit à 542 sondes réparties aux alentours des bâtiments du campus.

A travers la modélisation du champ de sondes, nous avons constaté que le sol réagit, plus ou moins, de la même manière. Ainsi que nous avons encore eu recours à la ré-injection estivale afin de régénérer le sol pour pouvoir en extraire de la chaleur pendant l'hiver de l'année qui suit.

Une analyse de sensibilité a été réalisée également pour étudier l'influence de certains paramètres potentiels sur la réponse thermique du sol.

# Chapitre 7

## Conclusions et perspectives

Ce travail a visé une étude de pré-faisabilité d'un champ de sondes géothermiques fermé pour le campus d'Uliège au quartier Polytech, à travers plusieurs démarches.

Le cadre géologique du site étudié offre un important potentiel pour l'exploitation d'un système de pompe à chaleur géothermique couplé à des sondes verticales. Ce potentiel est justifiée par une conductivité thermique moyenne déterminée, à l'aide du test de réponse thermique, est de  $2,88 \pm 0,16 W/mK$ , ainsi que par une température non perturbée du sol d'environ  $11^{\circ}C$ .

L'évaluation des besoins en chauffage des bâtiments nous a permis de prédimensionner le champ de sondes géothermiques du réseau qui conduit à 542 sondes, liées aux pompes à chaleurs qui sont installées dans les bâtiments du campus afin d'adapter la température selon les besoins en chaud et en froid. Le taux de couverture de la pompe à chaleur est de 96% durant toute l'année, et en cas de forte demande le reste des besoins sera apporté par un système d'appoint via un système bivalent, vu qu'il n'est pas très judicieux de concevoir une pompe à chaleur pour couvrir la totalité des besoins d'un point de vue économique.

La modélisation de ce champ de sondes pour visualiser la réponse thermique du sol a permis de voir le fonctionnement du système à long terme et a mis en évidence le déséquilibre du système d'où la nécessité de faire de la ré-injection durant l'été afin de régénérer le sol et éviter de l'épuiser tout au long de son utilisation. Cette ré-injection met en valeur un autre avantage de la géothermie qui consiste à refroidir les bâtiments durant l'été.

Dans la partie pré-dimensionnement, nous avons fait une comparaison entre un champ de sondes pour chaque bâtiment du campus indépendamment des autres et un champ de sondes pour tous les bâtiment en les couplant, comme une boucle, au même réseau de chaleur. L'objectif de cette comparaison était d'apercevoir l'utilité des boucles géothermiques qui jouent un rôle stabilisateur dans un réseau, car les besoins en chaud et en froid des différents bâtiments ne sont jamais parfaitement mutualisés, par échange de chaleur avec le sous-sol. Les boucles géothermiques alimentent le réseau de chaleur avec une température relativement constante. Le sous-sol amène donc une inertie importante au réseau de chaleur afin d'éviter des fluctuations de température trop importante dans le réseau en

## CHAPITRE 7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

cas de fortes demandes énergétiques des bâtiments.

Enfin, nous pouvons noter que des études complémentaires telle qu'une étude économique et environnementale à travers la comparaison de l'émission du CO<sub>2</sub> issue des énergies fossiles, restent à mener afin de pousser l'étude de faisabilité.

# Bibliographie

- [1] l'ADEME et le BRGM. « La géothermie Quelles technologies pour quels usages ? » 2008, p. 5-6.
- [2] Durable ULIÈGE. « Le campus du Sart Tilman chauffé grâce à la cogénération biomasse ». URL : [https://www.durable.uliege.be/cms/c\\_10382858/fr/le-campus-du-sart-tilman-chauffe-grace-a-la-cogeneration-biomasse](https://www.durable.uliege.be/cms/c_10382858/fr/le-campus-du-sart-tilman-chauffe-grace-a-la-cogeneration-biomasse).
- [3] WIKIPEDIA. « Géothermie ». URL : <https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9othermie>.
- [4] SMARTGEOTHERM. « NOTE D'INFORMATION TECHNIQUE N 259 : Géothermie peu profonde Conception et mise en oeuvre de systèmes avec échangeurs en forme de U ». 2016.
- [5] A-R-B-R-E-S. « Histoire géothermie ». URL : [http://arbres.asso.fr/fichiers/geothermie/histoire\\_geothermie\\_frey.pdf](http://arbres.asso.fr/fichiers/geothermie/histoire_geothermie_frey.pdf).
- [6] John W LUND, Derek H FREESTON et Tonya L BOYD. « Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review ». In : *Geothermics* 40.3 (2011), p. 159-180.
- [7] John W LUND et Aniko N TOTH. « Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review ». In : *Geothermics* 90 (2021), p. 101915.
- [8] Kevin RAFFERTY. « Ground water issues in geothermal heat pump systems ». In : *Ground Water* 41.4 (2003), p. 408-411.
- [9] l'ADEME et le BRGM. « La géothermie pour chauffer et rafraîchir sa maison ». 2017, p. 7.
- [10] Robin ZEH et al. « Large-Scale Geothermal Collector Systems for 5th Generation District Heating and Cooling Networks ». In : *Sustainability* 13.11 (2021), p. 6035.
- [11] Brugeo - BRUSSELS. « Qu'est-ce que la géothermie ? » URL : <https://geothermie.brussels/fr/principes-de-la-geothermie/qu-est-ce-que-la-geothermie>.
- [12] C REISS, C MARAGNA et P MONNOT. « Protocole de test de réponse thermique. doi : BRGM ». Rapp. tech. RP-60816-FR, 2012.
- [13] Orlando B ANDERSLAND et Branko LADANYI. « Frozen ground engineering ». John Wiley & Sons, 2003.
- [14] « ISSO (2005). Kennisinstituut voor de Installatiesector Ontwerp en uitvoering van verticale odemwarmtewisselaars. Rotterdam, ISSO, publicatie 73, 2005 ». In : (2005).



- [15] « Carte hydrogéologique Seraing Chênée ». URL : <http://environnement.wallonie.be/cartosig/cartehydrogeo/document/Notices/4256.pdf>.
- [16] Georgia RADIOTI. « Shallow geothermal energy : effect of in-situ conditions on borehole heat exchanger design and performance ». In : (2016).
- [17] Service public de WALLONIE ET D'AUTRES CONTRIBUTEURS. « WalOnMap ». URL : <https://geoportail.wallonie.be/>.
- [18] U SMOLARCZYK. « Geotechnical engineering handbook, vol. 2 : procedures ». 2003.
- [19] ICEDD asbl pour le compte du SERVICE PUBLIC DE WALLONIE. « BILAN ÉNERGÉTIQUE DE LA WALLONIE 2008- SECTEUR DOMESTIQUE ET ÉQUIVALENTS, Octobre 2010 ».
- [20] T COEN, Bertrand FRANÇOIS et P GERARD. « Analytical solution for multi-borehole heat exchangers field including discontinuous and heterogeneous heat loads ». In : *Energy and Buildings* 253 (2021), p. 111520.
- [21] Selçuk EROL, Mir Amid HASHEMI et Bertrand FRANÇOIS. « Analytical solution of discontinuous heat extraction for sustainability and recovery aspects of borehole heat exchangers ». In : *International journal of thermal sciences* 88 (2015), p. 47-58.

—

# Annexe A

## Application des facteurs correcteurs

### A.1 Application des facteurs correcteurs : La conductivité thermique du sol

Type	Conduction de la chaleur [W/(m.K)]	Capacité thermique [MJ/(m3.k)]	Type de sol prédominant	Friction de sondage
Très bien	2.4	2.5	sable très grossier à modérément fin (saturé ; possiblement graveleux)	<1
Bien	1.8	2.2	sable limoneux, sable avec couches d'argile et/ou de loam (saturé)	1-4
Pauvre (modéré)	1.2	1.7	argile et/ou loam avec couches de tourbe (saturé)	>4

## ANNEXE A. APPLICATION DES FACTEURS CORRECTEURS

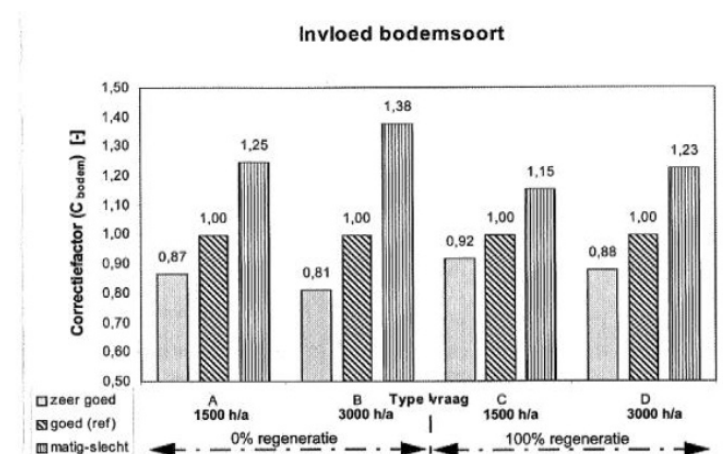


FIGURE A.1 – influence du type de sol

### A.2 Application des facteurs correcteurs : Le matériau de remplissage

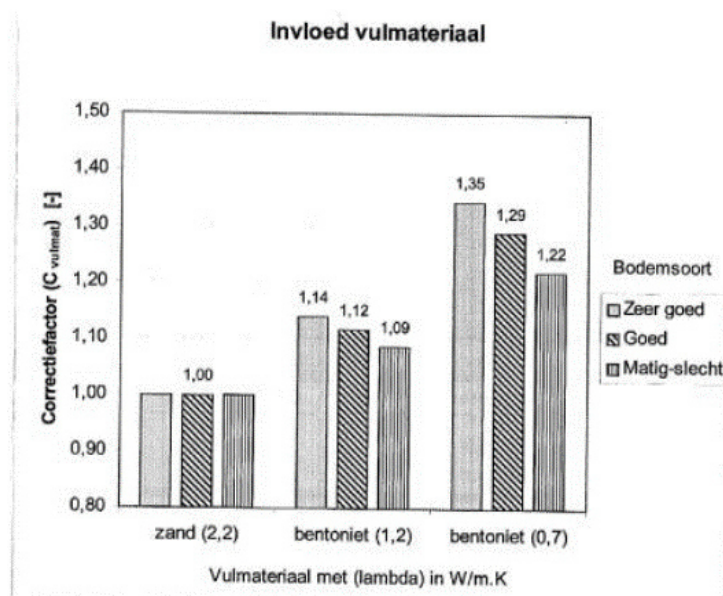


FIGURE A.2 – influence du type de matériau de remplissage

### A.3 Application des facteurs correcteurs : La température du médium

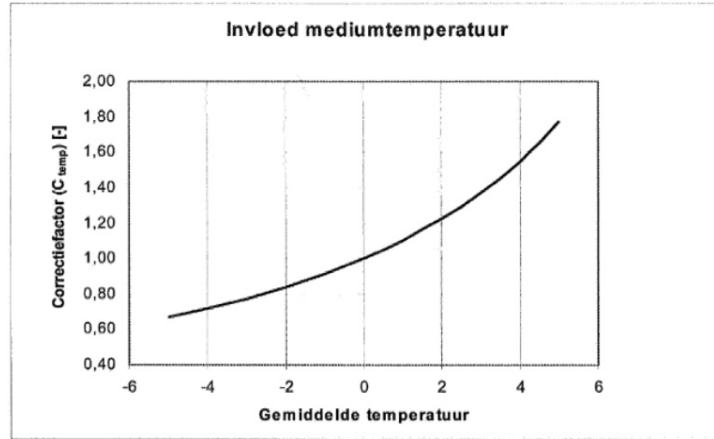


FIGURE A.3 – Influence de la température médian

### A.4 Application des facteurs correcteurs : La géométrie de la sonde

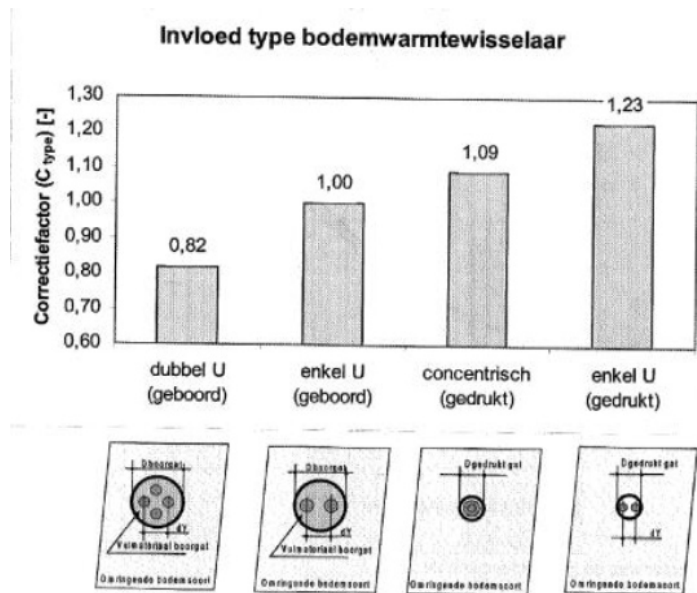


FIGURE A.4 – Influence du type d'échangeur de chaleur souterrain

## A.5 Application des facteurs correcteurs : La configuration du champ des sondes

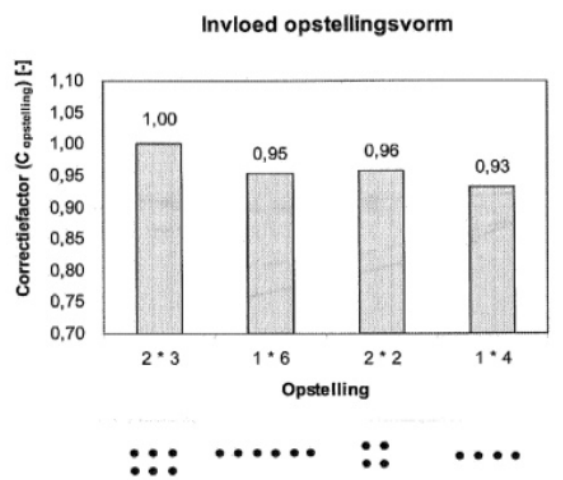


FIGURE A.5 – Influence de de la configuration (< 10 sondes géothermiques)

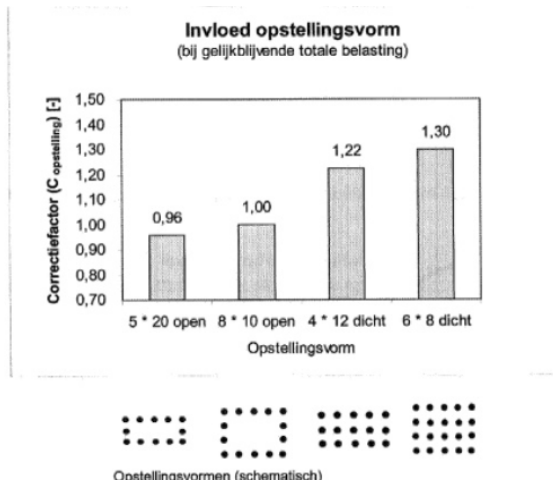


FIGURE A.6 – Influence de de la configuration (> 50 sondes géothermiques)

## A.6 Application des facteurs correcteurs : L'écart entre les échangeurs géothermiques

— Petit système (< 10 Sondes)

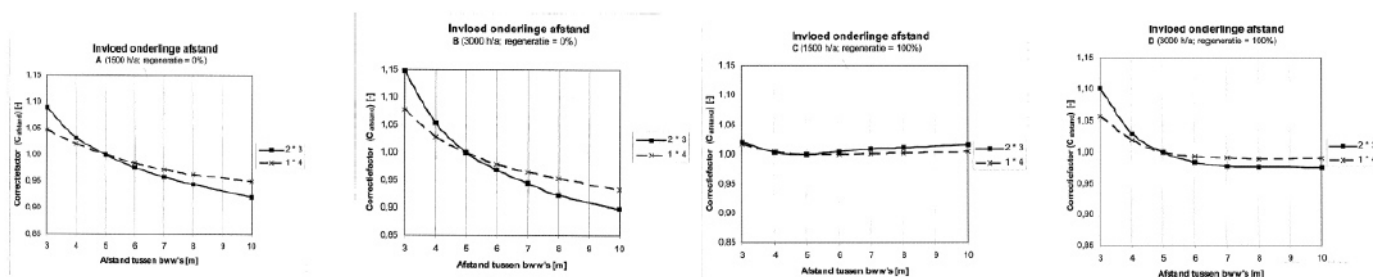


FIGURE A.7 – Influence de l'espacement entre les sondes (< 10 sondes)

— Système large (>50 Sondes)

## ANNEXE A. APPLICATION DES FACTEURS CORRECTEURS

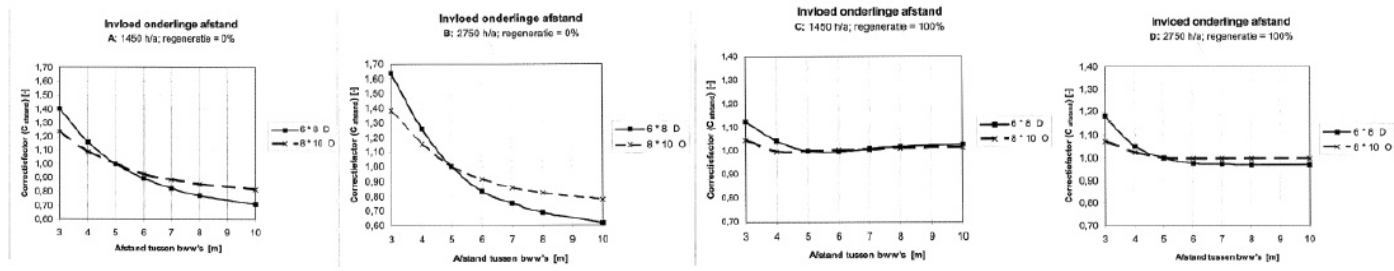


FIGURE A.8 – Influence de l'espacement entre les sondes (> 50 sondes)

## Annexe B

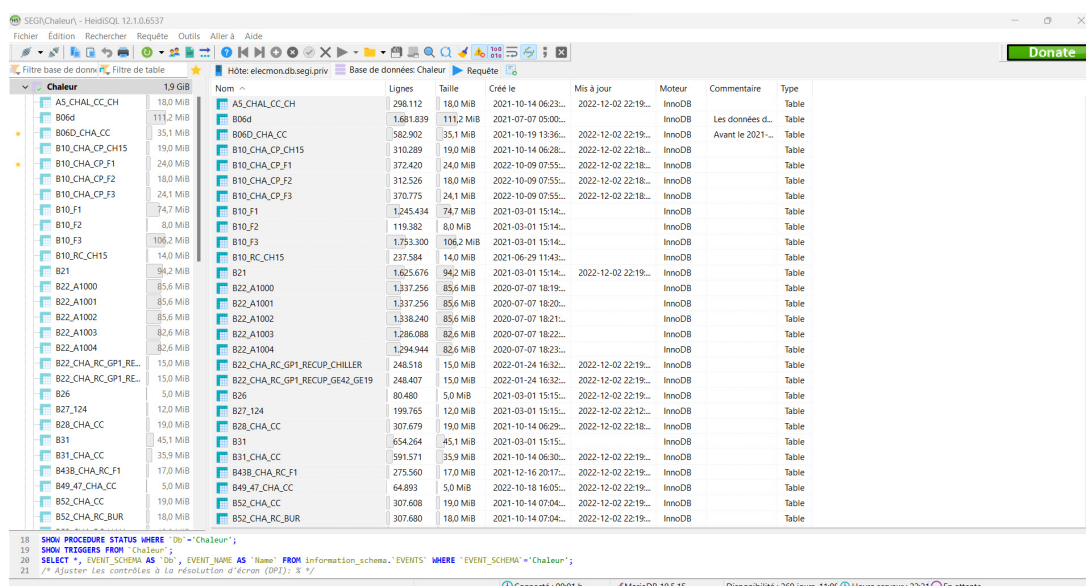
## Conductivité thermique

	Roche		Conductibilité thermique ( $\lambda$ ) [W/(m·K)]		Capacité thermique volumique ( $\rho c_p$ ) [MJ/(m³·K)]	Masse volumique ( $\rho$ ) [x 10³ kg/m³]
			Valeur effective	Valeur conseillée		
Non consolidée	Argile/Ilmon, sec		0,40 - 1,00	0,50	1,50 - 1,60	1,80 - 2,00
	Argile/Ilmon, saturé d'eau		1,10 - 3,10	1,80	2,00 - 280	2,00 - 2,20
	Sable, sec		0,30 - 0,90	0,40	1,30 - 1,60	1,80 - 2,20
	Sable, humide		1,00 - 1,90	1,40	1,60 - 2,20	1,90 - 2,20
	Sable, saturé d'eau		2,00 - 3,00	2,40	2,20 - 2,80	1,90 - 2,30
	Siltice/pierre, sec		0,40 - 0,90	0,40	1,30 - 1,60	1,80 - 2,20
	Siltice/pierre, saturé d'eau		1,60 - 2,50	1,80	2,20 - 2,60	1,90 - 2,30
	Glaise argileuse/argile		1,10 - 2,90	2,40	1,50 - 2,50	1,80 - 2,30
	Tourbe, lignite douce		0,20 - 0,70	0,40	0,50 - 3,80	0,50 - 1,10
Roches sédimentaires	Argile/roche ilmoneuse		1,10 - 3,40	2,20	2,10 - 2,40	2,40 - 2,60
	Grès		1,90 - 4,60	2,80	1,80 - 2,60	2,20 - 2,70
	Conglomérat/brèche		1,30 - 5,10	2,30	1,80 - 2,60	3,30 - 2,70
	Tuffeau		1,80 - 2,90	2,30	2,20 - 2,30	2,30 - 2,60
	Calcaire		2,00 - 3,90	2,70	2,10 - 2,40	2,40 - 2,70
	Dolomite		3,00 - 5,00	3,50	2,10 - 2,40	2,40 - 2,70
	Roche sulfurée (anhydrite)		1,50 - 7,70	4,10	2,00	2,80 - 3,00
	Roche sulfurée (plâtre)		1,30 - 2,80	1,60	2,00	2,20 - 2,40
	Roche évaporite (rocher, sel, carbonate de potassium)		3,60 - 6,10	5,40	1,20	2,10 - 2,20
Roches magmatiques	Anthracite		0,30 - 0,60	0,40	1,30 - 1,80	1,30 - 1,60
	Tuf		1,10	1,10	/	/
	Ebonite, totalement à moyennement acide	Rhyolite, trachyte, p. ex.	3,10 - 3,40	3,30	2,10	2,60
		Latite, dacite, p. ex.	2,00 - 2,90	2,60	2,90	2,90 - 3,00
	Ebonite, alcalin à ultra-alcalin	Andésite, basalte, p. ex.	1,30 - 2,30	1,70	2,30 - 2,60	2,60 - 3,20
	Plutonite, totalement à moyennement acide	Granite	2,10 - 4,10	3,20	2,10 - 3,00	2,40 - 3,00
		Syénite	1,70 - 3,50	2,60	2,40	2,50 - 3,00
	Plutonite, alcalin à ultra-alcalin	Diorite	2,00 - 2,90	2,50	2,90	2,90 - 3,00
		Gabbro	1,70 - 2,90	2,00	2,60	2,80 - 3,10
Roches métamorphiques	Métamorphique légère	Schiste argileux	1,50 - 2,60	2,10	2,20 - 2,50	2,40 - 2,70
		Chert	4,50 - 5,00	4,50	2,20	2,50 - 2,70
	Moyennement à très métamorphique	Marbre	2,10 - 3,10	2,50	2,00	2,50 - 2,80
		Quartzite	5,00 - 6,00	5,50	2,10	2,50 - 2,70
		Schiste	1,50 - 3,10	2,20	2,20 - 2,40	2,40 - 2,70
		Gneiss	1,90 - 4,00	2,90	1,80 - 2,40	2,40 - 2,70
		Amphibolite	2,10 - 3,60	2,90	2,00 - 2,30	2,60 - 2,90

FIGURE B.1 – Les conductivités thermiques selon le type de roche (Source :[4])

# Annexe C

## Plateforme HeidiSQL



Nom	Taille	Créé le	Mis à jour	Moteur	Commentaire	Type
AS_CHAL_CC_CH	18,0 MiB	2021-10-14 06:23...	2022-12-02 22:19...	InnoDB		Table
B06d	113,2 MiB	2021-07-07 05:00...		InnoDB	Les données d...	Table
B06D_CHA_CC	35,1 MiB	2021-10-19 13:36...	2022-12-02 22:19...	InnoDB	Avant le 2021...	Table
B10_CHA_CP_CH15	19,0 MiB	2021-10-14 06:28...	2022-12-02 22:18...	InnoDB		Table
B10_CHA_CP_F1	24,0 MiB	2022-10-09 07:55...	2022-12-02 22:18...	InnoDB		Table
B10_CHA_CP_F2	18,0 MiB	2022-10-09 07:55...	2022-12-02 22:18...	InnoDB		Table
B10_CHA_CP_F3	24,1 MiB	2022-10-09 07:55...	2022-12-02 22:18...	InnoDB		Table
B10_F1	74,7 MiB	2021-03-01 15:14...		InnoDB		Table
B10_F2	8,0 MiB	2021-03-01 15:14...		InnoDB		Table
B10_F3	108,2 MiB	2021-03-01 15:14...		InnoDB		Table
B10_RC_CH15	14,0 MiB	2021-06-29 11:43...		InnoDB		Table
B21	94,2 MiB	2021-03-01 15:14...	2022-12-02 22:19...	InnoDB		Table
B22_A1000	85,6 MiB	2020-07-07 18:19...		InnoDB		Table
B22_A1001	85,6 MiB	2020-07-07 18:20...		InnoDB		Table
B22_A1002	85,6 MiB	2020-07-07 18:21...		InnoDB		Table
B22_A1003	82,6 MiB	2020-07-07 18:22...		InnoDB		Table
B22_A1004	82,6 MiB	2020-07-07 18:23...		InnoDB		Table
B22_CHA_RC_GP1_RECUP_CHILLER	248,518	2022-01-24 16:32...	2022-12-02 22:19...	InnoDB		Table
B22_CHA_RC_GP1_RECUP_GE42_GE19	248,407	2022-01-24 16:32...	2022-12-02 22:19...	InnoDB		Table
B26	80,480	2021-03-01 15:15...	2022-12-02 22:19...	InnoDB		Table
B27_124	199,765	2021-03-01 15:15...	2022-12-02 22:12...	InnoDB		Table
B28_CHA_CC	307,679	2021-10-14 06:29...	2022-12-02 22:18...	InnoDB		Table
B31	654,264	2021-03-01 15:15...		InnoDB		Table
B31_CHA_CC	359,571	2021-10-14 06:30...	2022-12-02 22:19...	InnoDB		Table
B43B_CHA_RC_F1	275,560	2021-12-16 20:17...	2022-12-02 22:19...	InnoDB		Table
B49_47_CHA_CC	64,893	2022-10-18 16:05...	2022-12-02 22:19...	InnoDB		Table
B52_CHA_CC	307,608	2021-10-14 07:04...	2022-12-02 22:19...	InnoDB		Table
B52_CHA_RC_BUR	307,680	2021-10-14 07:04...	2022-12-02 22:19...	InnoDB		Table

```
18 SHOW PROCEDURE STATUS WHERE `Db`="Chaleur";
19 SHOW TRIGGERS FROM `Chaleur`;
20 SELECT *, EVENT_SCHEMA AS `Db`, EVENT_NAME AS `Name` FROM information_schema.EVENTS WHERE `EVENT_SCHEMA`="Chaleur";
21 /* Ajuster les contrôles à la résolution d'écran (DPI): 8 x/
```

FIGURE C.1 – Plateforme HeidiSQL



## Annexe D

# Prédimensionnement des sondes géothermiques pour le réseau de chaleur

— Les besoins en chaud :

$$Q_{\text{besoin}} = 2307,55 \text{ MW}$$

— Détermination de la puissance d'extraction spécifique :

La pompe à chaleur a une puissance de 1117 kW, un COP qui vaut 4. Pour déterminer la puissance qui sera extraite du sol, nous utilisons l'équation [2.6].

$$P_{\text{ground}} = \frac{1117 \times 3}{4} = 837,75 \text{ kW}$$

Nous calculons le temps de fonctionnement :

$$t_f = \frac{Q_{\text{besoin}} \times 10^3}{1117} = 2065 \text{ heures/an}$$

Nous utilisons la figure [2.12] pour déterminer la puissance d'extraction, comme notre système est considéré qu'il ne produit que la chaleur et il ne fait pas de régénération  $P_{\text{spécifique}} = 17 \text{ W/m}$ .

— La longueur totale préliminaire :

Nous déterminons la longueur totale à l'aide de l'équation [2.8].

$$L_{\text{totale}} = \frac{837,75 \times 10^3}{17} = 49279,41 \text{ m.}$$

## ANNEXE D. PRÉDIMENSIONNEMENT DES SONDES GÉOTHERMIQUES POUR LE RÉSEAU DE CHALEUR

### — Facteurs de correction :

La longueur totale ( $L_{\text{totale}}$ ) calculée est ensuite corrigée en plusieurs étapes à l'aide de certains facteurs de correction qui ont été déjà évoqué au chapitre [2] et les tableaux et les graphes utilisés pour les corrections sont présentés dans l'Annexe [A].

#### La conductivité thermique du sol :

$$\lambda = 2,88 \text{ W/mK} \rightarrow C_{\text{sol}} = 0,81$$

#### Le matériau de remplissage :

$$\lambda = 1,2 \text{ W/mK} \rightarrow C_{\text{mat}} = 1$$

C'est le sable qui a été choisi comme matériau de remplissage.

#### La température minimum du sol :

$$T_{\text{min}} = 4^{\circ}\text{C} \rightarrow C_{T_{\text{min}}} = 1,53$$

#### Le type d'échangeur géothermique :

$$\text{Double U} \rightarrow C_{\text{sonde}} = 0,82$$

#### La configuration des échangeurs géothermiques :

$$\text{Disposition en grille régulière} \rightarrow C_{\text{disp}} = 1,3$$

#### L'écart entre les échangeurs géothermiques :

$$\text{Inter-distance} = 5 \text{ m} \rightarrow C_{\text{dist}} = 1$$

La longueur de sonde corrigée vaut alors :

$$L_{\text{corrigé}} = L_{\text{totale}} C_{\text{sol}} C_{\text{mat}} C_{T_{\text{min}}} C_{\text{sonde}} C_{\text{disp}} C_{\text{dist}} = 65102,73 \text{ m}$$

### — Nombre de sondes :

Nous utilisons l'équation [2.10], nous obtenons un nombre de sondes qui vaut 542 sondes.

$$N_{BHE} = \frac{65102,73}{120} = 542 \text{ sondes.}$$