

Titre: Amélioration des prévisions des conditions du sol dans le dimensionnement des échangeurs géothermiques
Title:

Auteur: Gabriel Sabbagh
Author:

Date: 2022

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Sabbagh, G. (2022). Amélioration des prévisions des conditions du sol dans le dimensionnement des échangeurs géothermiques [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/10487/>
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/10487/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Michel Bernier
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Amélioration des prévisions des conditions du sol dans le dimensionnement
des échangeurs géothermiques**

GABRIEL SABBAGH

Département de génie mécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie mécanique

Août 2022

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Amélioration des prévisions des conditions du sol dans le dimensionnement des échangeurs géothermiques

présenté par **Gabriel SABBAGH**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Massimo CIMMINO, président

Michel BERNIER, membre et directeur de recherche

Bruno SAVARD, membre

DÉDICACE

*Ô ma mère, ce sont nos mères
Dont les sourires triomphants
Bercent nos premières chimères
Dans nos premiers berceaux d'enfants.*

*Donc reçois, comme une promesse,
Ce livre où coulent de mes vers
Tous les espoirs de ma jeunesse,
Comme l'eau des lys entr'ouverts !*

*Reçois ce livre, qui peut-être
Sera muet pour l'avenir,
Mais où tu verras apparaître
Le vague et lointain souvenir*

*De mon enfance dépensée
Dans un rêve triste ou moqueur,
Fou, car il contient ma pensée,
Chaste, car il contient mon cœur.*

Théodore de Banville

*Ce mémoire est dédié à ma mère Rabah qui m'a comblé de son amour et qui sacrifie sans arrêt
pour m'aider à accomplir mes rêves.*

Merci.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier en premier lieu le professeur Michel Bernier qui a cru en moi et qui a accepté de m'accompagner le long de ces deux années bouleversées me donnant l'opportunité d'entamer une maîtrise. Il a été compréhensif des problèmes que je rencontrais le long de mon chemin et il m'offrait toujours des solutions. Il fut une source d'inspiration qui me poussait toujours à donner le meilleur de moi-même.

Je tiens également à remercier tous les membres du BeeLab pour leur soutien et leur amicalité envers moi au cours de cette maîtrise.

J'adresse aussi mes remerciements aux membres du jury M. Massimo Cimmino et M. Bruno Savard pour avoir accepté de juger ce travail.

Enfin, je remercie M. Dru Crawley et Mme. Linda Laurie de climate.onebuilding.org pour leur aide à créer le fichier météo typique basé sur les fichiers météo futures utilisés au Chapitre 5.

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente un modèle numérique de prédiction du profil de température du sol ainsi que différents facteurs pouvant affecter ce profil incluant le gradient géothermique et les changements climatiques. L'objectif principal est de vérifier l'impact de ces différents facteurs sur le dimensionnement des échangeurs géothermiques.

Une revue de littérature de quelques modèles numériques et analytiques du sol est présentée dans ce mémoire pour pouvoir évaluer la capacité prédictive de ces modèles ainsi que leurs limitations. La revue touche aussi la portée de l'influence de différents facteurs sur la performance des échangeurs géothermiques et sur le profil de température du sol qui les entoure. Des facteurs tels le gradient géothermique présent dans le sol, qui résulte du flux de chaleur géothermique, et l'évolution du climat à la surface du sol sur de longues périodes temporelles sont examinés.

Un modèle numérique modélisant le profil de température du sol est développé sous MATLAB. Le modèle unidimensionnel est d'abord développé pour calculer la température du sol non perturbé affectée par le climat et le gradient géothermique. Puis des modèles bidimensionnel et tridimensionnel sont développés pour explorer différentes configurations géométriques à plusieurs échangeurs.

Une étude de cas est ensuite entreprise pour quantifier la contribution du flux de chaleur géothermique à l'énergie totale extraite par un échangeur géothermique et la comparer à l'énergie provenant de la surface ou du sol au voisinage du puits. Suite à 10 ans d'extraction continue d'énergie, le flux de chaleur géothermique constitue 7 % de la chaleur totale extraite par l'échangeur géothermique pendant cette période. Après 500 ans, le flux de chaleur géothermique devient la source prédominante d'énergie avec plus de 50 % de l'énergie totale extraite par l'échangeur. Plusieurs hypothèses couramment utilisées pour simplifier le gradient géothermique du modèle thermique complet du sol sont aussi comparées. Prendre une température du sol uniforme égale à la température du sol à mi-chemin de l'échangeur géothermique de façon à prendre en compte le gradient géothermique est avéré comme une bonne approximation.

Enfin, l'effet de différents scénarios climatiques présents et futurs sur la performance d'un système résidentiel de pompe à chaleur géothermique est mesuré. La résidence ainsi que les différents types d'échangeurs géothermiques sont modélisées dans TRNSYS, un outil couramment utilisé pour simuler les systèmes thermiques. Les échangeurs géothermiques horizontaux sont plus

affectés par le climat que les échangeurs verticaux. Pour un scénario de changement climatique extrême, la variabilité du climat affecte jusqu'à 6 % la consommation électrique du système de chauffage et de climatisation et l'évolution du climat sur trente années futures l'affecte de 0,47 % par décennie.

ABSTRACT

This thesis presents a numerical model for predicting the ground temperature profile as well as various factors that can affect this profile including the geothermal gradient and climate change. The goal is to examine the impact of these factors on the sizing of geothermal exchangers.

A literature review of some numerical and analytical ground models is presented to evaluate the predictive capacity of these models as well as their limitations. The review also touches on the scope of influence of different factors on the performance of geothermal exchangers and on the temperature profile of the ground surrounding them. Factors such as the geothermal gradient, which results from the geothermal heat flux, and the evolution of the climate at the ground surface over long time periods are examined.

A numerical model of the soil temperature profile is developed using MATLAB. A one-dimensional model is first developed to calculate the undisturbed ground temperature affected by the climate and the geothermal gradient. The two-dimensional and three-dimensional models are studied to explore different geometrical configurations with several exchangers.

A case study is then undertaken to quantify the contribution of geothermal heat flow to the total energy extracted by a geothermal exchanger compared to energy from the surface or the ground itself. After 10 years of continuous energy extraction, the geothermal heat flux constitutes 7 % of the total heat extracted by the geothermal exchanger during this period. After 500 years, the geothermal heat flux becomes the predominant source of energy with more than 50 % of the total energy extracted by the exchanger. Several assumptions commonly used to simplify the geothermal gradient of the full ground thermal model are also compared. Taking a uniform ground temperature equal to the ground temperature at the halfway point of the geothermal exchanger to account for the geothermal gradient has proven to be a good approximation.

Finally, the effect of different present and future climate scenarios on the performance of a residential geothermal heat pump system is evaluated. The residence as well as the different types of geothermal exchangers are modeled in TRNSYS, a commonly used tool to simulate thermal systems. Horizontal geothermal exchangers are more affected by climate than vertical exchangers. For an extreme climate change scenario, climate variability affects the electricity consumption of the heating and cooling system by up to 6 % and climate change over the next 30 years affects it by 0.47 % per decade.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT.....	VII
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVII
LISTE DES ANNEXES.....	XVIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	5
2.1 Préambule.....	5
2.2 Facteurs influants	5
2.2.1 Flux de chaleur géothermique.....	5
2.2.2 Conditions en surface	11
2.3 Modèles numériques et analytiques	17
2.3.1 Méthode des différences finies.....	17
2.3.2 Méthode analytique.....	21
CHAPITRE 3 MODÈLE NUMERIQUE DU SOL.....	24
3.1 Modèle Unidimensionnel	25
3.1.1 Maillage non uniforme et indépendance spatiale et temporelle.....	30
3.1.2 Conditions extérieures sinusoïdales croissantes et gradient géothermique.....	34
3.1.3 Effets du réchauffement et propriétés de sol différentes.....	40

3.2	Modèle Bidimensionnel	45
3.2.1	Insertion d'un EG dans le sol	48
3.2.2	Bilan d'énergie bidimensionnel	53
3.3	Modèle tridimensionnel.....	57
3.3.1	Insertion de trois EG dans le sol.....	59
3.3.2	Vérification des résultats.....	63
3.4	Résumé du Chapitre 3	68
CHAPITRE 4 L'EFFET DU FLUX GÉOTHERMIQUE SUR LES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES.....		70
4.1	Vérification de l'échange de chaleur en surface	71
4.2	Contribution du flux géothermique	73
4.3	Effet du flux géothermique sur un EG en opération	79
4.4	Résumé du Chapitre 4	84
CHAPITRE 5 L'EFFET DU CLIMAT SUR LES PERFORMANCES DES ÉCHANGEURS ET PAC GÉOTHERMIQUES		85
5.1	Introduction	85
5.2	Fichiers météo	88
5.3	Description de la résidence et du système à PAC géothermique	89
5.4	Besoins thermiques de la résidence.....	91
5.5	Conditions du sol non perturbé	95
5.6	Introduction de la PAC géothermique et de l'EG à la résidence	98
5.6.1	EG Horizontal	98
5.6.2	EG Vertical.....	107
5.7	Résumé du Chapitre 5	116
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		118

6.1	Conclusion et contributions.....	118
6.2	Recommandations	119
	RÉFÉRENCES.....	121
	ANNEXES	126

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1.1: Paramètres de la vérification du modèle 1D	31
Tableau 3.1.2: Caractéristiques du sol et du climat à Montréal	36
Tableau 3.2.1 : Spécificités du puits géothermique, du climat et du maillage utilisé	51
Tableau 3.2.2 : Bilan énergétique du sol après 10 ans de puisage thermique	56
Tableau 3.3.1 : Paramètres de simulation	60
Tableau 3.3.2 : Bilan énergétique avec différents maillages temporels et spatiaux.....	66
Tableau 3.3.3 : Caractéristiques du domaine de comparaison	67
Tableau 4.1.1 : Paramètres utilisés dans la comparaison	72
Tableau 4.1.2 : Taux de contribution du flux de chaleur en surface à la puissance totale extraite	72
Tableau 4.2.1 : Différents flux de chaleur et bilan énergétique sans flux géothermique	76
Tableau 4.2.2 : Différents flux de chaleur et bilan énergétique avec flux géothermique	76
Tableau 4.3.1 : Paramètres utilisés dans la comparaison	82
Tableau 5.3.1 : Nouvelles valeurs des coefficients de déperdition thermique des éléments de la résidence.....	89
Tableau 5.3.2 : Paramètres des conditions aux frontières	90
Tableau 5.4.1 : Charges annuelles sous les 4 fichiers climatiques (Max, Moy et Min représentent le maximum, la moyenne et le minimum).....	92
Tableau 5.5.1: Paramètres du sol et du climat.....	96
Tableau 5.6.1 : Consommation électrique annuelle sous les 4 fichiers climatiques (Max, Moy et Min représentent le maximum, la moyenne et le minimum)	99
Tableau 5.6.2 : Consommation électrique annuelle sous les 4 fichiers climatiques (Max, Moy et Min représentent le maximum, la moyenne et le minimum)	108

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1.1: Différentes configurations d'échangeurs géothermiques verticaux. La figure présente 2 échangeurs en U à 1 (gauche) et 2 (centre) tuyaux et un échangeur coaxial (droite).	2
Figure 2.1.2: Différents facteurs influant la température du sol et l'EG	4
Figure 2.3.1: Modèle semi-infini du sol.....	25
Figure 3.1.1: Maillage initial utilisé dans le modèle numérique	27
Figure 3.1.2: Maillage exponentiel d'un volume de contrôle de sol avec 20 nœuds.....	30
Figure 3.1.3: Vérification de l'indépendance du maillage temporel avec un nombre de nœuds fixe à 50 et des pas de temps variés.....	31
Figure 3.1.4: Vérification de l'indépendance du maillage spatial avec un pas de temps fixe à 4 h et des nombres de nœuds variés	32
Figure 3.1.5 : Comparaison du profil de température entre les modèles numérique et analytique pour différentes durées simulées	33
Figure 3.1.6: Températures extérieures typiques à Montréal et approximation de ces températures à une sinusoïde	35
Figure 3.1.7 : Profil de température du sol le premier janvier après 10 ans de températures extérieures sinusoïdales.....	37
Figure 3.1.8 : Profil de température du sol le premier janvier après 50 ans de température croissante linéairement.....	38
Figure 3.1.9 : Profil de température du sol le premier janvier après 50 ans de température sinusoïdale croissante.....	40
Figure 3.1.10 : Comparaison du profil de température du sol le premier janvier après 50 ans avec et sans changement climatique utilisant le modèle numérique. (Équation 3.1.24 avec $G = 0$ °C/an (bleu) et $G = 0,03$ °C/an (rouge)).	41
Figure 3.1.11 : Profil de température du sol pendant les extrêmes des températures extérieures et cône de variation de la température du sol.....	42

Figure 3.1.12 : Variation de la température du sol en fonction de la profondeur avec taux de changement climatique.....	43
Figure 3.1.13 : Variation de la température du sol en fonction de la profondeur avec taux de changement climatique et une conductivité thermique de 10 W/m-K.....	44
Figure 3.1.14 : Variation de la température du sol en fonction de la profondeur avec taux de changement climatique et une conductivité thermique de 0,1 W/m-K.....	45
Figure 3.2.1 : Nomenclature utilisée pour le maillage du modèle bi-dimensionnel	47
Figure 3.2.2 : Maillage à la proximité immédiate du puits	49
Figure 3.2.3 : Nœuds (rouge) créés par le maillage exponentiel autour de l'EG (noir).....	50
Figure 3.2.4 : Profil de température initial dans le sol le premier janvier.....	52
Figure 3.2.5 : Non-Zéros de la matrice de 820x820 éléments à résoudre (gauche) et un aperçu plus proche de sa structure (droite).....	52
Figure 3.2.6 : Profil de la température du sol en janvier après 10 ans de puisage de chaleur.....	53
Figure 3.3.1 : Nomenclature d'un nœud pour le modèle numérique tri-dimensionnel.....	59
Figure 3.3.2 : Configuration de nœuds (rouge) et d'EG (noir) proposée (vue d'en haut).....	60
Figure 3.3.3: Configuration de nœuds (rouge) et d'EG (noir) proposée (vue de côté).....	61
Figure 3.3.4 : Non-Zéros de la matrice de 7098x7098 éléments à résoudre (gauche) et un aperçu plus proche de sa structure (droite)	62
Figure 3.3.5 : Vue d'en haut du profil de température du sol à 4 mètres de profondeur et après 10 ans de puisage de chaleur	62
Figure 3.3.6 : Comparaison entre pygfunction et la méthode numérique pour le calcul des "g-functions"	68
Figure 4.1.1: Représentation schématique d'un EG	71
Figure 4.2.1 : Exemple de flux de chaleur initial dans le sol avec gradient géothermique.....	74
Figure 4.2.2 : Bilan énergétique sans flux géothermique.....	77
Figure 4.2.3 : Bilan énergétique avec flux géothermique	78

Figure 4.2.4 : Profil de température et flux de chaleur autour de l'EG après 10 ans d'extraction de chaleur, sans gradient géothermique	78
Figure 4.2.5 : Profil de température et flux de chaleur autour de l'EG après 10 ans d'extraction de chaleur, avec gradient géothermique.....	79
Figure 4.3.1 : Température de l'eau entrant dans l'EG (à gauche) et température de l'air ambiant (à droite)	81
Figure 4.3.2 : Chaleur échangée par l'EG avec les profils initiaux de température du sol donnés par l'équation 4.3.1 sans (a) et avec (b) gradient géothermique, et en utilisant l'approximation du profil de température du sol de l'équation 4.3.3 (c)	83
Figure 5.1.1: Schéma qualitatif de l'énergie électrique consommée par une PAC munie d'un chauffage auxiliaire pour répondre aux charges thermiques d'une résidence à Montréal en chauffage et en climatisation.....	86
Figure 5.1.2: Séries de simulations exécutées pour dissocier l'effet du climat sur la performance de l'EG. Le climat des années réelles affecte la résidence dans tous les cas mais la surface du sol est affectée tantôt par les années réelles, tantôt par les années typiques.....	88
Figure 5.3.1 : Capacité normalisée et COP en chauffage et en refroidissement en fonction de la température d'entrée de l'eau.....	91
Figure 5.4.1: Configuration TRNSYS utilisée pour mesurer les besoins thermiques de la résidence	92
Figure 5.4.2 : Charges mensuelles de refroidissement (gauche) et de chauffage (droite) de la résidence en fonction de la TMY Actuelle et Future	92
Figure 5.4.3 : Charges annuelles de refroidissement de la résidence entre 1998 et 2049 ainsi que la charge moyenne avec les conditions TMY Actuelle et Future	93
Figure 5.4.4 : Charges annuelles de chauffage de la résidence entre 1998 et 2049 ainsi que la charge moyenne avec les conditions TMY Actuelle et Future	93
Figure 5.5.1: Augmentation de la température moyenne des 150 premiers mètres du sol soumis à une température à la surface augmentant linéairement. Les résultats sont calculés numériquement et avec la méthode de Kharseh et al. (2011).	95

Figure 5.5.2 : Température annuelle moyenne du sol à la surface, pour les 3 premiers mètres, pour les 30 premiers mètres et les 150 premiers mètres de 2020 à 2049 sous les conditions météorologiques futures RCP85-20-49. Les lignes en pointillés représentent le résultat des régressions linéaires.	98
Figure 5.6.1 : Principales composantes et connexions de TRNSYS.....	99
Figure 5.6.2 : Température maximale (à gauche) et minimale (à droite) annuelle d'entrée de l'eau à la PAC géothermique	100
Figure 5.6.3 : Consommation électrique du système à PAC géothermique en mode de refroidissement et sa tendance globale sur la période 1998-2049 ainsi que la consommation moyenne dans le cadre des TMY Actuelle et Future	102
Figure 5.6.4 : Consommation électrique du système à PAC géothermique en mode de chauffage et sa tendance globale sur la période 1998-2049 ainsi que la consommation moyenne dans le cadre des TMY Actuelle et Future	103
Figure 5.6.5 : Principales composantes et connexions de TRNSYS.....	104
Figure 5.6.6: Différence de consommation électrique du système à PAC géothermique en climatisation causée par les différentes conditions à la surface du sol (le sol est affecté tantôt par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49, tantôt par les fichiers TMY Actuelle et TMY Future tandis que le bâtiment est toujours affecté par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49)	105
Figure 5.6.7 : Différence de consommation électrique du système à PAC géothermique en chauffage causée par les différentes conditions à la surface du sol (le sol est affecté tantôt par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49, tantôt par les fichiers TMY Actuelle et TMY Future tandis que le bâtiment est toujours affecté par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49)	106
Figure 5.6.8 : Principales composantes et connexions de TRNSYS.....	108
Figure 5.6.9 : Profil de température initial utilisé par le Type 557b comparé au profil de température réel du sol	109

Figure 5.6.10 : Température maximale (à gauche) et minimale (à droite) annuelle d'entrée de l'eau à la PAC géothermique	110
Figure 5.6.11 : Consommation électrique du système à PAC géothermique en mode de refroidissement et sa tendance globale sur la période 1998-2049 ainsi que la consommation moyenne dans le cadre des TMY Actuelle et Future	111
Figure 5.6.12 : Consommation électrique du système à PAC géothermique en mode de chauffage et sa tendance globale sur la période 1998-2049 ainsi que la consommation moyenne dans le cadre des TMY Actuelle et Future	112
Figure 5.6.13 : Principales composantes et connections de TRNSYS.....	113
Figure 5.6.14 : Différence de consommation électrique du système à PAC géothermique en climatisation causée par les différentes conditions à la surface du sol (le sol est affecté tantôt par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49, tantôt par les fichiers TMY Actuelle et TMY Future tandis que le bâtiment est toujours affecté par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49)	114
Figure 5.6.15 : Différence de consommation électrique du système à PAC géothermique en chauffage causée par les différentes conditions à la surface du sol (le sol est affecté tantôt par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49, tantôt par les fichiers TMY Actuelle et TMY Future tandis que le bâtiment est toujours affecté par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49)	115

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

1D	Une Dimension
2D	Deux Dimensions
3D	Trois Dimensions
AMY	Actual Meteorological Year
BTES	Borehole Thermal Energy Storage
COP	Coefficient de Performance
CWEC	Canadian Weather Year for Energy Calculations
CWEEDS	Canadian Weather Energy and Engineering Datasets
DST	Duct Ground Heat Storage Model
EED	Earth Energy Designer
EG	Échangeur Géothermique
GG	Gradient Géothermique
MATLAB	Matrix Laboratory
PAC	Pompe à Chaleur
RCP	Relative Concentration Pathway
RMSE	Root Mean Square Error
SBM	Superposition Borehole Model
TMY	Typical Meteorological Year
TRNSYS	Transient Systems Simulation Program

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Méthode numérique de Lee & Lam (2008)	126
Annexe B Méthode numérique de Delazar et al. (2021).....	128
Annexe C Type 557b.....	134
Annexe D Type 952	139
Annexe E Type 8952.....	141

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les échangeurs géothermiques (EG) sont utilisés pour collecter ou rejeter de la chaleur au sol. La quantité de chaleur transférée est directement proportionnelle à la différence de température entre le sol et le fluide circulant dans l'échangeur. Ces EG sont utilisés, la plupart du temps, comme source ou puits de chaleur des pompes à chaleur (PAC) géothermiques. Les EG peuvent être classés en deux grandes familles : les EG horizontaux généralement enfouis à quelques mètres de la surface et les EG verticaux. Ces EG peuvent être raccordés en série (le fluide caloporteur sortant de l'un entre dans l'autre) ou en parallèle (les EG sont tous raccordés au même tuyau principal alimentant leurs entrées par le même fluide caloporteur et le fluide ressortant des EG est aussi collecté par un tuyau unique) pour former des champs d'EG. Dans le cas des champs d'EG verticaux on utilisera, par exemple, l'abréviation 5x4 pour désigner un champ de 20 puits réparti en 5 rangées de 4 puits chacune. Tel que montré à la Figure 2.1.1, les principaux types d'EG verticaux à boucle fermée sont les EG coaxiaux (où le fluide caloporteur monte et redescend dans l'EG utilisant un tuyau central et un tuyau annulaire autour de ce dernier) et les EG à tuyaux en U. Ces tuyaux sont scellés dans un coulis ressemblant à du béton pour sceller le puits et éviter la présence de poches d'air entre les tuyaux et le sol. Le coulis est donc l'interface d'échange thermique entre les tuyaux de l'EG et le sol qui les entoure. Pour un EG en U, il peut avoir un (un allé et un retour) ou deux (deux allés et deux retours) tuyaux présents dans un même coulis. Le diamètre du puits se situe généralement entre 10 et 20 centimètres. Pour des applications à PAC résidentielles, la longueur totale du champs d'EG (qui est la somme des longueurs des puits) est de l'ordre de 200 mètres et est fonction des propriétés physiques de l'EG et du sol, des besoins du bâtiment et de la performance de la PAC.

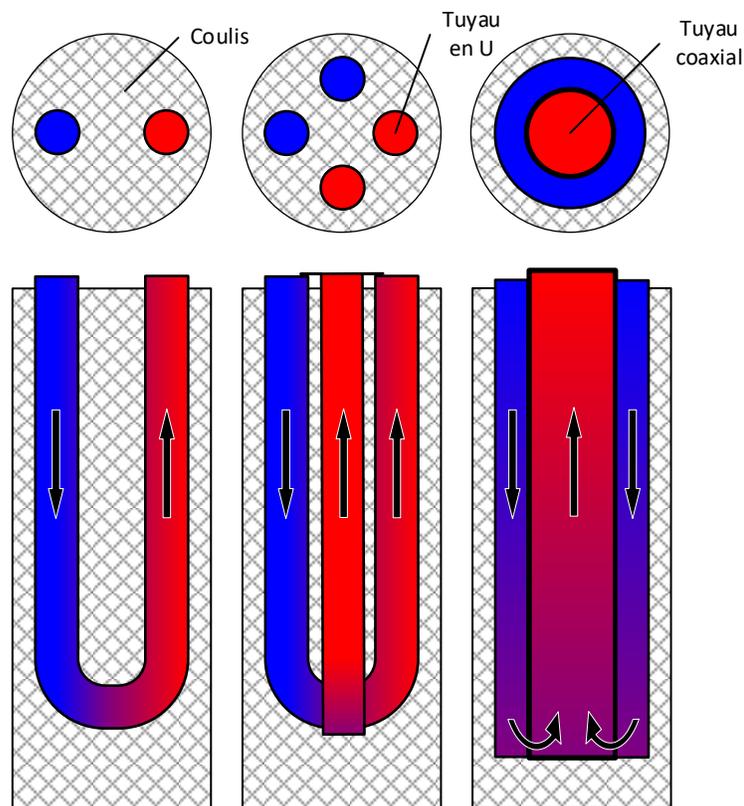


Figure 2.1.1: Différentes configurations d'échangeurs géothermiques verticaux. La figure présente 2 échangeurs en U à 1 (gauche) et 2 (centre) tuyaux et un échangeur coaxial (droite).

L'efficacité d'une PAC est fortement liée à la température de son puits et de sa source de chaleur. Selon le principe de rendement d'une pompe à chaleur de Carnot, plus l'écart entre ces deux températures est grand, moins la PAC est performante (son Coefficient de performance (COP) diminue) et plus sa capacité (i.e. la puissance fournie en chauffage ou en climatisation) est réduite. Les PAC conventionnelles, puisant ou rejetant de l'énergie à l'air extérieur, sont les plus affectés par le climat et surtout dans les régions connaissant des températures saisonnières extrêmes les rendant inutilisables pendant les périodes extrêmement froides de l'année. Contrairement à la température de l'air extérieur qui fluctue de plusieurs dizaines de degrés au cours de l'année, la température du sol, même à quelques mètres sous la surface, varie relativement moins et reste proche de la température ambiante annuelle moyenne. Les PAC géothermiques ont donc l'avantage de puiser ou de rejeter de la chaleur à un environnement plus favorable à leur efficacité et à leur capacité à chauffer/climatiser. Il est donc important de pouvoir adéquatement quantifier l'influence des conditions climatiques sur les EG pour correctement prédire leur fonctionnement. Ces facteurs

peuvent être classés dans deux catégories distinctes : En premier, les facteurs qui influencent les EG par contact physique direct avec l'échangeur comme les différentes densités et diffusivités thermiques du sol au voisinage de l'EG ou les écoulements d'eaux souterraines. La seconde catégorie est constituée des facteurs qui affectent indirectement les EG en influençant le sol qui l'entoure. Des facteurs tel la couverture végétale, l'évapotranspiration, le gradient de température géothermique (GG) dû au flux de chaleur géothermique et l'échange de chaleur sensible entre le sol et l'atmosphère. Les facteurs abordés dans ce mémoire, montrés dans la Figure 2.1.2, sont l'effet du climat et du flux de chaleur géothermique sur le profil de température du sol. Le flux de chaleur géothermique provient de la chaleur interne de la Terre qui émane de nombreuses sources telles que la désintégration d'éléments radioactifs et la chaleur résiduelle d'accrétion planétaire. Le flux de chaleur géothermique continental moyen est de l'ordre de $65 \pm 1,6 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (Pollack & Hurter, 1993). Donc un tel flux de chaleur géothermique conduit à un gradient géothermique de $65 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ pour un sol dont la conductivité thermique est constante et égale à $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Cette étude vise en premier à développer un modèle numérique tridimensionnel (3D) modélisant les profils de température du système EG-sol et mesurant la contribution de ces deux derniers facteurs sur le bilan énergétique de ce système. En effet, la puissance du modèle numérique par rapport aux modèles analytiques déjà établis est la possibilité d'affiner commodément les quantités d'énergie échangées entre les EG et le sol, ainsi qu'entre le sol et l'atmosphère à cause d'un climat variable pendant la durée de fonctionnement simulée. De plus, ce modèle numérique permet de faciliter l'étude du fonctionnement et de l'influence de différentes configurations géométriques non orthodoxes de plusieurs EG. Le second but principal de cette étude est de quantifier l'effet du flux de chaleur géothermique et du changement climatique sur la performance des EG lorsqu'ils sont accouplés à des systèmes de PAC assurant le chauffage et la climatisation de bâtiments. En outre, ces installations de PAC géothermiques exigent un dimensionnement adéquat de l'EG pour assurer leur fonctionnement efficace. Ce dimensionnement présume, dans les meilleurs des cas, des conditions atmosphériques annuelles périodiques. Cette hypothèse est remise en question par un changement climatique de plus en plus accentué pendant les dernières années. L'effet du changement climatique est le plus ressenti dans les couches superficielles du sol, où les EG horizontaux sont enfouis. Par suite, le dimensionnement des EG, conçus pour opérer pendant plusieurs décennies, est non seulement affecté en surface par les conditions

atmosphériques, comme mentionné précédemment, mais aussi par des charges de chaleur demandées par les PAC qui évoluent d'année en année.

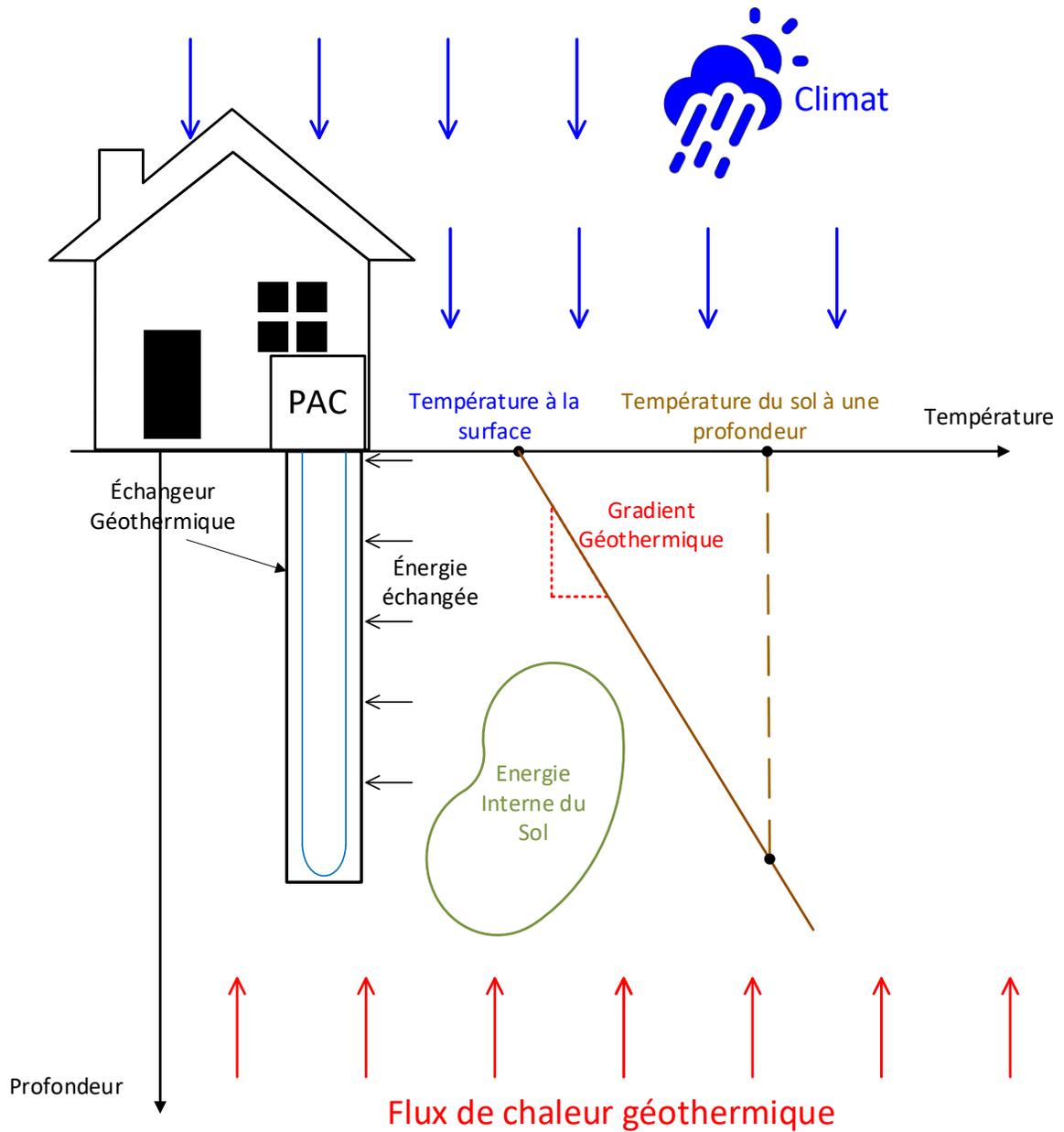


Figure 2.1.2: Différents facteurs influant la température du sol et l'EG

CHAPITRE 2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Préambule

Le but principal de ce travail est d'évaluer quantitativement et qualitativement l'effet de différents paramètres physiques sur le dimensionnement et le fonctionnement des EG. Ce mémoire est axé sur l'effet des changements climatiques sur la température de l'air en surface de ces EG ainsi que sur les différentes méthodes et hypothèses utilisées pour modéliser le flux de chaleur géothermique.

Une modélisation numérique en trois dimensions du sol contenant un ou plusieurs EG est présentée dans ce mémoire. Différents types de modèles numériques se rapportant au présent travail sont traités dans cette revue de littérature.

2.2 Facteurs influants

2.2.1 Flux de chaleur géothermique

2.2.1.1 Étude de Beier (2020)

De solides arguments en faveur de la prise en compte du gradient géothermique lors de la simulation des tests de réponse thermique des puits coaxiaux sont avancés par Beier (2020). Ces tests de réponse thermique sont réalisés au début d'un projet et permettent de déterminer la conductivité thermique du sol au moyen de l'analyse (à l'aide de la méthode dite de la source linéique infinie) de données expérimentales jumelé à un modèle du sol. Dans son étude, des comparaisons sont faites entre un modèle radial 1D conventionnel, et un modèle 2D qu'il a développé avec et sans prise en compte du gradient géothermique. Le modèle 2D a été vérifié avec les données produites par Holmberg et al. (2016). Les profils de température du fluide du modèle concordent bien avec les valeurs de Holmberg et al. (2016). Tout d'abord, Beier (2020) a constaté que dans le cas où le fluide pénètre dans le tuyau intérieur, les températures d'entrée et de sortie du fluide sont surestimées d'environ 1 °C à la fois dans l'extraction et l'injection de chaleur si le gradient géothermique est négligé. Deuxièmement, si le fluide entre par le tuyau annulaire, la température du fluide au fond du puits est sous-estimée de plus de 1 °C à la fois en extraction et en injection de chaleur si le gradient géothermique est négligé. Beier (2020) montre également que le

modèle 2D avec un gradient géothermique présente une augmentation de la courbe de température moyenne entre 0,2 et 2 heures de fonctionnement du puits et un grand écart de température dans les premières minutes de fonctionnement lorsque le système est dominé par la réponse du puits par rapport aux modèles 1D et 2D sans gradient géothermique. Par conséquent, sans tenir compte du gradient géothermique, les modèles 1D et 2D sont aveugles à ces phénomènes. Ces courbes sont ensuite utilisées pour estimer les valeurs de la conductivité thermique du sol et de la résistance thermique du puits en utilisant une approche communément appelée estimation des paramètres. Comme les modèles les plus simples ne peuvent pas simuler les premières périodes dominées par la capacité thermique interne du puits, l'ajustement des paramètres est effectué sur l'intervalle de temps de 10 à 100 h. Beier (2020) procède ensuite à différentes simulations pour calculer à la fois la conductivité thermique du sol et la résistance thermique du puits en utilisant le modèle 2D avec et sans gradient géothermique tout en faisant varier de manière approfondie différents paramètres du système tels que la conductivité thermique du coulis et du sol, la longueur du puits, le débit du fluide et le gradient géothermique. Il a constaté que, en utilisant le même modèle 2D avec et sans gradient géothermique, les valeurs de la conductivité thermique du sol et de la résistance thermique du puits peuvent être sous-estimées de 9 % et 47 % respectivement.

2.2.1.2 Étude de Wagner et al. (2012)

Wagner et al. (2012) ont effectué une comparaison des essais de réponse thermique d'EG à double tube en U en utilisant à la fois la méthode conventionnelle de la source linéique et une simulation numérique en faisant varier le gradient géothermique. Ils ont constaté que la conductivité du sol est sous-estimée lorsqu'on utilise la méthode de la source linéique et qu'un gradient géothermique est présent. Ils ont également constaté que pour des gradients géothermiques élevés (52,2 °C/km), l'erreur dépasse 10 %. Les couples « conductivité thermique du sol-résistance thermique de l'EG » valables dans l'étude paramétrique et la régression linéaire avancée sont décalés par la valeur du gradient géothermique. L'existence de ce gradient géothermique semble amplifier la propagation de la chaleur en fonction de la profondeur, ce qui ne peut être pris en compte par la théorie de la source linéique et conduit donc à une conductivité thermique apparemment plus élevée que la réalité. De plus, la résistance thermique de l'EG reflète le transport de chaleur à l'intérieur de l'EG et ne devrait dépendre que de la géométrie et des propriétés physiques de l'EG et du sol et non de la température du sol. Cependant, Wagner et al. (2012)

montrent que les valeurs de résistance thermique du puits obtenues à partir de tests de réponse thermique simulés semblent être fortement influencées par le gradient géothermique, ce qui entraîne une sous-estimation de cette résistance thermique de plus de 10 % pour les gradients géothermiques élevés. Ils supposent alors que cette relation artificielle entre la résistance thermique de l'EG et le gradient géothermique est causée par les variations de température à l'intérieur et à l'extérieur de l'EG sur toute sa longueur, ce qui entraîne des valeurs de résistances thermiques dépendant de la profondeur.

2.2.1.3 Étude de Morchio & Fossa (2020)

Morchio & Fossa (2020) ont entrepris d'étudier l'influence du gradient géothermique sur le comportement thermique des EG coaxiaux et son effet sur la prédiction de la conductivité thermique du sol. Il est intéressant de noter que lorsqu'aucun gradient géothermique n'est pris en compte, la conductivité thermique du sol prédite ne semble pas être affectée par la configuration hydraulique (entrée du fluide par le tuyau annulaire ou central) ni par la longueur de l'EG. La conductivité thermique du sol est déterminée par une méthode graphique. Cette méthode est décrite dans la thèse de Gehlin (1998) où :

$$T_f = \frac{Q}{4\pi kH} \ln(t) + \left[\frac{Q}{H} \left(\frac{1}{4\pi k} \left(\ln \left(\frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right) - R_b \right) + T_g \right] \text{ pour } t \geq \frac{5r_b^2}{\alpha} \quad 2.2.1$$

Avec :

T_f = Température moyenne du fluide caloporteur [°C]

Q = Puissance injecté [W]

k = Conductivité thermique [W/m.K]

H = Hauteur de l'EG [m]

t = Temps écoulé [s]

α = Diffusivité thermique [m²/s]

r_b = Rayon de l'EG [m]

γ = Constante d'Euler (0.5772)

R_b = Résistance thermique [K/(W/m)]

T_g = Température du sol non perturbé [°C]

L'équation 2.2.1 peut être simplifiée en une relation linéaire entre T_f et $\ln(t)$:

$$T_f = b \ln(t) + m \quad 2.2.2$$

Et par suite, la valeur de k peut être déduite de la pente de l'équation 2.2.2 en faisant :

$$k = \frac{Q}{4\pi bH} \quad 2.2.3$$

Donc la valeur de k est simplement obtenue en connaissant la pente de l'évolution de T_f en fonction du temps. Lorsqu'un gradient géothermique est introduit aux simulations de test de réponse thermique, la valeur de la conductivité thermique du sol prédite dépend de la configuration hydraulique ainsi que de la longueur de l'EG. De plus, lorsqu'un gradient géothermique de 0.03K/m est introduit dans la configuration, la conductivité thermique du sol prédite est encore plus influencée par la configuration hydraulique et la longueur de l'EG. Pour une configuration d'entrée de fluide par le tuyau central, la conductivité thermique du sol prédite diminue avec l'augmentation de la longueur de l'EG, ce qui entraîne une sous-estimation de 18,8 % de sa valeur. En outre, avec une entrée de fluide par le tuyau annulaire, la conductivité thermique du sol prédite augmente avec la longueur de l'EG, ce qui conduit à une surestimation de 9 %. Cela montre que l'approche traditionnelle de la source linéique infinie pour les tests de réponse thermique, aussi robuste qu'elle est pour prédire la conductivité thermique du sol lorsqu'aucun gradient géothermique n'est impliqué, devient dépendante de la configuration physique de l'EG et non des propriétés du sol lorsqu'un gradient géothermique est introduit.

2.2.1.4 Étude de Liu et al. (2020)

Dans leur article, Liu, et al (2020) mesurent numériquement l'effet du gradient géothermique sur la charge d'extraction thermique et le rayon d'effet thermique d'un EG coaxial. Ils ont constaté que, pendant une année de fonctionnement, le gradient géothermique a un impact important sur la charge d'extraction thermique moyenne, puisqu'elle augmente respectivement de 54,5 %, 35,6 % et 26,3 % lorsque le gradient géothermique passe de 20 à 50 °C/km avec un

incrément de 10 °C/km (donc en passant de 20 à 30 °C/km puis de 30 à 40 °C/km et enfin de 40 à 50 °C/km). De plus, le gradient géothermique a un impact sur la charge d'extraction thermique moyenne. En outre, le gradient géothermique a un effet sur la charge maximale, puisque lorsque le gradient passe de 20 à 50°C/km, la charge maximale augmente de 13 %. Par suite, avec des gradients géothermiques élevés, le sol à proximité immédiate de l'EG subit des changements de température radicaux. Dans leur exemple, Liu, et al (2020) montrent qu'avec un gradient de 50 °C/km, la température du sol au diamètre radial de -5 à 5 m autour du puits diminue presque trois fois plus qu'avec un gradient de 20 °C/km. Par conséquent, la prise en compte du gradient géothermique est essentielle pour évaluer la charge d'extraction thermique pour une extraction de chaleur durable à long terme et pour la mesure du rayon d'effet thermique.

2.2.1.5 Étude de Kurevija et al. (2014)

Dans leur article, Kurevija et al. (2014) quantifient l'effet du gradient géothermique sur le dimensionnement des EG verticaux accouplés aux systèmes à PAC géothermiques. Le bâtiment étudié se trouve à Zagreb en Croatie, une région ayant un gradient géothermique relativement élevé de 0,055 °C/m. La température de base du sol (donc la température du sol à une profondeur où la variation annuelle est de moins de 0,1 °C, excluant le gradient géothermique) est considérée égale à 13,1 °C. Les besoins énergétiques du bâtiment en chauffage et en refroidissement sont respectivement de 150 et 50 MWh/an. En outre, le bilan énergétique du sol est « perdant » en y extrayant plus de chaleur que ce qui lui est rejeté, créant par suite une zone sous-refroidie autour de l'EG. Deux configurations rectangulaires d'EG sont prises en considération : une configuration de 10x2 puits et une autre de 5x4. Une première expérience est effectuée pour dimensionner l'EG de façon que la température du fluide caloporteur ne descende pas en dessous de son point de solidification à -9,4 °C pendant le pic de l'opération du système en mode de chauffage pendant toutes les années de fonctionnement.

Avec une distanciation inter-puits de 6 m, différentes valeurs de temps d'exploitation sont étudiées. Pour 30 ans d'opération, une réduction de la longueur totale requise de l'EG est observée pour les deux configurations de 10x2 et 5x4 en prenant compte du gradient géothermique. En effet, la longueur totale requise chute de 2103,7 m à 2001,8 m (-4,8 %) pour la configuration 10x2 et de 2186,1 m à 2069,5 m (-5,3 %) pour la configuration 5x4. Plus le temps d'opération envisagé est long, plus l'effet du gradient géothermique sur le dimensionnement devient prononcé.

Dans la deuxième partie, l'effet de différents espacements inter-puits est étudié sur le dimensionnement de l'EG qui fonctionne pour 30 années. Pour une distance inter-puits de 4 m, la longueur totale requise de l'EG à configuration 5x4 diminue de 2460,9 m à 2286,3 m (-7,1 %) en prenant compte du gradient géothermique tandis que pour la configuration 10x2, cette longueur diminue de 2279,9 m à 2141,4 m (-6,1 %) en prenant compte du gradient géothermique. Donc pour les configurations de puits proches les uns des autres, et comme la charge du bâtiment est majoritairement une charge de chauffage, la prise en compte du gradient géothermique a un effet important sur la réduction de la longueur requise de l'EG. Pour une distance inter-puits de 8 m, la longueur totale requise de l'EG à configuration 5x4 diminue de 2050,9 m à 1954,7 (-4,7 %) en prenant compte du gradient géothermique tandis que pour la configuration 10x2, elle diminue de 2014,2 m à 1927,5 (-4,3 %). Comme la configuration 5x4 est par nature moins efficace que la configuration 10x2 à diffuser la chaleur dans le sol, la longueur totale de l'EG requise pour la même distance inter-puits est plus importante pour la configuration 5x4 que la configuration 10x2. De plus, comme la charge du bâtiment est majoritairement une charge de chauffage, la configuration 5x4 est plus affectée par la prise en compte du gradient géothermique que la configuration 10x2. En conclusion, cet article montre que l'effet du gradient géothermique sur les systèmes à EG, dans les régions où un gradient important existe, est significatif et il doit être pris en considération pendant la conception de tout projet de PAC géothermique.

2.2.1.6 Analyse critique

La section 2.2.1 met en avant plusieurs articles traitant du flux de chaleur géothermique. Les articles de Beier (2020), Wagner et al. (2012) et de Morchio & Fossa (2020) mettent en évidence l'influence du flux de chaleur géothermique dans les tests de réponse thermique des EG et donc sur la détermination de la résistance effective de ces EG.

De plus les articles de Liu et al. (2020) et Kurevija et al. (2014) présentent l'effet de la présence d'un flux de chaleur géothermique sur la température du sol autour d'un EG ainsi que sur la performance d'un système à PAC géothermique. Ce mémoire aborde ces aspects du flux de chaleur géothermique et ajoute aux connaissances en calculant les lignes de flux de chaleur autour d'un EG en opération ainsi que la part du flux de chaleur géothermique du bilan thermique d'un EG en extraction sur de longues durées.

2.2.2 Conditions en surface

2.2.2.1 Étude de Seong-Kyun et Youngmin (2020)

Dans leur étude, Seong-Kyun et Youngmin (2020) quantifient l'effet du changement climatique sur les températures de l'air et la température à la surface du sol et par suite sur le profil de température autour d'EG. Pour cela, les températures à 10 et 50 m de profondeur aux bords d'un EG en opération dans la région de Daejeon en Corée du Sud sont mesurées pendant trois intervalles de temps : entre mai 2008 et avril 2009, entre mai 2016 et avril 2017 et entre mai 2017 et avril 2018. Des taux d'augmentation de température de 0,132 °C/an et 0,119 °C/an sont déterminés par régression linéaire à 10 et 50 m de profondeur respectivement. Pour déterminer la part du changement climatique de cette augmentation de température, une simulation unidimensionnelle du sol sans EG est entreprise. En utilisant les valeurs de la température mesurées à 1 m de profondeur (supposées comme à la surface du sol), des augmentations de 0,029 °C/an et 0,010 °C/an ont été calculé à 10 et 50 m respectivement sur la période de 2008 à 2018 à cause du changement climatique. Par superposition, ils déduisent que l'effet de réchauffement de l'EG pendant ces 10 années d'opération est de 0,103 °C/an et 0,109 °C/an pour les profondeurs de 10 et 50 m respectivement.

Pour prédire l'effet du changement climatique sur l'évolution de la température à proximité de l'EG à 50 m de profondeur d'ici 2050, plusieurs simulations utilisant divers RCP (Representative Concentration Pathway) simulant les conditions climatiques sont effectuées (parmi RCP 2,6, 4,5, 6,0 et 8,5). Les différentes valeurs des RCP représentent l'augmentation du bilan énergétique du système Terre-atmosphère depuis l'âge préindustriel défini en 1750. En d'autres mots, c'est la puissance additionnelle provenant du Soleil absorbée par la planète mesurée en W/m^2 . Cette métrique est fréquemment utilisée pour mesurer le changement climatique et pour quantifier la sévérité de différents scénarios climatiques futurs. Un scénario de changement climatique RCP 8,5 désigne une augmentation de l'énergie absorbée par la Terre du Soleil à un taux de 8,5 W/m^2 d'ici 2100.

La différence de température à 50 m de profondeur en 2050 entre le pire scénario (RCP 8,5) et le meilleur (RCP 6,0) est de 0,17 °C. Ils supposent que le scénario RCP 6,0 présente la plus petite augmentation de température car ce scénario présente la température moyenne la plus basse de 2019 à 2050 pour la région de Daejeon. La température au bord de l'EG à 50 m de profondeur

en novembre 2049 avec RCP 8,5 serait de 19,12 °C. Une augmentation de 1,28 °C par rapport à novembre 2017 et de 3,06 °C par rapport à la température du sol à 50 m mesurée avant l'opération de l'EG. De plus, Seong-Kyun et Youngmin (2020) ajoutent que les EG horizontaux accumuleraient moins de chaleur par le fait que la chaleur peut facilement être diffusée de la surface du sol à l'atmosphère. Cependant, l'efficacité en mode de refroidissement d'un tel système raccordé à une PAC pourrait diminuer avec l'accroissement de l'augmentation de la température de la surface du sol et donc, ces systèmes sont plus affectés par le changement climatique que les systèmes à EG verticaux. Par suite, l'opération à long terme de ces EG, dans des climats relativement chauds, conduit à des accumulations non négligeables de chaleur dans le sol affectant non seulement la performance de la PAC associée, mais aussi les environnements chimiques et microbiologiques du sol.

2.2.2.2 Étude de Shen & Lukes (2015)

Dans cette étude, Shen & Lukes (2015) quantifient l'effet de différents scénarios de changement climatique (entre 2040 et 2069) sur la performance de systèmes à pompe à chaleur (PAC) géothermique résidentiels dans les différentes zones climatiques des États-Unis. Quatre villes sont choisies pour représenter les quatre zones climatiques les plus répandues : Philadelphia (modérée-humide), Chicago (froide), Phoenix (chaude-sèche), Miami (chaude-humide). Un scénario de référence et deux scénarios de changement climatiques sont pris en considération : Une moyenne climatique entre les années 1961 et 1990 pour définir un climat « normal » et les scénarios de changement climatique A2 et A1FI (Nakicenovic, et al., 2000). Le scénario A1FI est le pire des deux scénarios avec une croissance économique rapide et une forte dépendance sur les énergies fossiles. Une simulation TRNSYS d'une résidence occupée est conçue pour cette comparaison. Naturellement, à la suite du changement climatique, les charges de chauffages diminuent et les charges de refroidissement augmentent. Dans les régions froides, la consommation d'énergie totale est maximale pour le scénario climatique A2 montrant que la diminution des charges de chauffage des espaces et de l'eau sanitaire compense l'augmentation des charges de refroidissement dans le scénario A1FI en comparaison avec le scénario A2. La performance des pompes à chaleur géothermiques est impactée négativement par le changement climatique dans toutes les zones climatiques. En effet, le coefficient de performance (COP) diminue sous des conditions climatiques plus chaudes. De plus, la consommation d'énergie des pompes à chaleur géothermiques augmente

de façon significative dans les zones climatiques chaudes contrairement aux zones climatiques froides où la consommation énergétique augmente légèrement. En ce qui concerne les températures d'entrée et de sorties du fluide caloporteur pendant la saison de refroidissement, le changement climatique cause une augmentation moyenne de 2 à 3 °C dans les quatre régions. Ces températures de fluide plus élevées diminuent les COP en refroidissement. Par suite, le changement climatique affecte négativement le COP global du système à PAC géothermique même si le COP en chauffage augmente marginalement car le changement climatique augmente la charge de refroidissement dans les quatre régions et diminue la charge de chauffage. Même Chicago et Philadelphia, qui ont principalement des charges annuelles de chauffage, deviennent des zones où le refroidissement prédomine dans les scénarios de changement climatique. Cette diminution significative des charges de chauffage réduit fortement les avantages que le changement climatique apporte sur la performance des PAC géothermiques en chauffage. De plus, avec des charges de refroidissement dominant le paysage énergétique, l'utilisation de PAC géothermique peut augmenter considérablement le bilan de chaleur au sol et donc créer une augmentation locale de la température du sol, un phénomène non pris en considération dans les divers modèles climatiques.

2.2.2.3 Étude de Kharseh et al. (2015)

Dans cette étude, Kharseh et al. (2015) quantifient l'effet du changement climatique sur le fonctionnement d'un système à PAC géothermique répondant aux besoins d'une résidence dans différents climats. Trois sites sont choisis pour représenter différents climats : Stockholm-Suède (froid), Istanbul-Turquie (modéré) et Doha-Qatar (chaud). De plus, deux niveaux d'enveloppe thermique de bâtiments sont comparés : Une qualité d'enveloppe thermique qui respecte les normes de construction actuelles de chaque ville et une enveloppe thermique de qualité plus basse. Le scénario de changement climatique A1B est pris en considération (émissions moyennes). Les années comparées sont 2014 et 2050, et les températures moyennes de l'air semblent augmenter de 1,3 °C à Stockholm, 1,8 °C à Istanbul, et 0,9 °C à Doha entre ces deux périodes. Pour les deux niveaux de qualité de l'enveloppe thermique, le changement climatique diminue la charge de chauffage dans tous les climats. Cette diminution varie de 9,9 % dans les climats froids à 54,8 % dans les climats chauds. En termes de puissance, le changement climatique diminue la puissance requise en chauffage le moins dans les climats froids (2,3 % pour l'enveloppe sous-optimale) et le plus dans les climats modérés (25,6 % pour l'enveloppe standard). De plus, le changement

climatique augmente les charges de refroidissement dans tous les climats. L'amplitude de cette augmentation est le plus prononcée dans les zones modérés (~30 %) et le moins dans les zones chaudes (~10 %). De plus, la puissance de refroidissement requise augmente dans les climats chauds et encore plus dans les climats modérés mais elle diminue dans les climats froids. Cela pourrait être expliqué par le fait qu'en 2050, la température ambiante maximale est projetée à diminuer de 1,4 °C à Stockholm. En ce qui concerne l'enveloppe thermique, elle semble généralement améliorer la consommation énergétique en chauffage et en refroidissement avec le changement climatique. Cependant elle n'affecte pas la réduction d'énergie requise en chauffage dans les climats froids et celle en refroidissement dans les climats chauds. A noter que la résidence simulée n'est pas occupée, un fait qui peut affecter le bilan thermique en refroidissement et en chauffage en fonction de l'enveloppe. En ce qui concerne la consommation énergétique globale de la PAC géothermique, le changement climatique diminue cette consommation dans les climats froids et l'augmente dans les climats chauds. En effet, dans les climats froids, la réduction de la charge de chauffage due au changement climatique l'emporte sur l'augmentation de la charge de refroidissement et l'inverse dans les climats chauds. En ce qui concerne les zones modérées, la réduction énergétique en chauffage est presque la même que l'augmentation en refroidissement et donc le changement climatique affecte marginalement la consommation énergétique globale à Istanbul. De plus, comparée à la consommation en 2014, la consommation énergétique en 2050 du système à PAC géothermique dans les bâtiments à enveloppe standard diminue de 5 % dans les climats froids et augmente de 17,7 % dans les climats chauds. D'autre part, avec les bâtiments ayant une enveloppe thermique sous-optimale, la consommation énergétique diminue de 8,5 % dans les climats froids et augmente de 18 % dans les climats chauds.

2.2.2.4 Étude de Kharseh et al. (2009)

Dans cette étude, Kharseh et al. (2009) déterminent l'effet d'un changement climatique sur la température moyenne du sol, les besoins en chauffage et en climatisation d'une résidence et la longueur requise d'un EG accouplé à un système de PAC géothermique pour répondre à ces besoins. Pour commencer, le sol est supposé comme un milieu homogène avec une conductivité thermique de 3 W/m-K, une capacité thermique volumétrique de 2,4 MJ/m³-K et un flux géothermique de 0,07 W/m². Pour quantifier l'effet d'une augmentation de la température moyenne de l'air d'une quantité donnée, le sol possède une température en surface initiale de 0 °C. Puis en

affectant la surface avec la température qui correspond au taux de réchauffement (1,5, 3 et 4,5 °C sur 130 ans), l'effet du changement climatique est calculé en calculant la différence entre la température moyenne du sol avec une température de surface de 0 °C et la température moyenne du sol affecté par les températures en surface supérieures à 0 °C. Avec un sol ayant ces propriétés thermiques, l'augmentation de température des 100 premiers mètres du sol est presque égale à 50 % de l'augmentation de la température en surface (i.e. pour une température en surface qui augmente de 2 °C sur 130 ans, la température moyenne des 100 premiers mètres augmente de 1 °C sur ces mêmes 130 ans). Puis, pour déterminer les besoins en chauffage et en refroidissement d'une résidence prototype, ils utilisent la méthode de degrés-heures pour calculer la proportion entre l'énergie requise en chauffage et l'énergie requise en refroidissement. Pour leur exemple de température extérieure sinusoïdale, le rapport entre l'énergie requise en chauffage et l'énergie requise en refroidissement est 7,95 et donc ils choisissent des valeurs de 32 et 4 MWh comme valeurs de besoins du bâtiment en chauffage et en refroidissement respectivement. Entre les deux scénarios de réchauffement extrêmes (0 °C et 4,5 °C d'augmentation), les besoins en chauffage diminuent de 30,3 % et ceux en refroidissement augmentent de 137,2 %. A noter que comme la résidence possède une charge majoritairement en chauffage, la variation absolue de la charge de chauffage entre les deux scénarios climatiques est plus grande que la variation absolue de la charge de refroidissement. Pour combiner l'effet du changement climatique sur la variation des charges de climatisation et la température du sol, des simulations sur EED (Earth Energy Designer) sont réalisées pour calculer la longueur totale de l'EG. En combinant les effets du changement climatique sur la température du sol et les besoins en climatisation, la longueur de l'EG requise diminue de 50 % entre le scénario sans réchauffement et le scénario avec 4,5 °C de réchauffement. Cependant, cette étude est limitée par le fait que les besoins en chauffage sont 8 fois plus grands que ceux en refroidissement et par suite, une étude de cas où la charge en refroidissement est plus importante est requise pour quantifier l'effet du changement climatique sur les régions les plus négativement affectés.

2.2.2.5 Étude de Luo & Asproudi (2015)

Dans leur article, Luo & Asproudi (2015) mesurent l'effet du changement climatique ainsi que celui de l'îlot de chaleur urbain sur les couches superficielles du sol au Royaume-Uni. Trois sites sont étudiés pour trois différentes durées de données de températures collectées à 30 et 100

cm de profondeur : Cockley Park (CP) à Northumberland entre 1907 et 2011, considéré comme une région rurale, St James Park (SJP) au centre de Londres de 1980 à 2012, considéré comme une région urbaine et l'aérodrome de Kenley (KA) entre 1995 et 2012, considéré comme une zone rurale proche de la métropole londonienne. Pour quantifier l'effet du changement climatique isolé sur la température du sol, le site de CP est utilisé comme il est considéré comme libre de toute influence urbaine. Pendant la durée s'étalant de 1907 à 2011, la température du sol à 100 cm augmente de 0,15 °C par décennie et de 0,17 °C par décennie une profondeur de 30 cm. Dans la localité de SJP, le réchauffement du sol dû à l'effet combiné du changement climatique et de l'îlot de chaleur urbain augmente sa température de 0,85 °C par décennie à 30 cm et de 1,18 °C par décennie à 100 cm. La région relativement rurale de KA qui se situe à 24 km de la station SJP est aussi affectée par l'effet de l'îlot de chaleur urbain avec une augmentation de 0,26 °C par décennie à 30 cm et 0,75 °C par décennie à 100 cm de profondeur.

Dans la deuxième partie de l'article, Luo & Asproudi (2015) déterminent l'effet de cette augmentation différente de la température du sol entre les zones urbaines et rurales sur la performance des systèmes à PAC géothermiques accouplés aux EG horizontaux. Le COP de ces installations en automne est de 3,3 dans les zones urbaines comparé à 3,05 pour les zones rurales. En hiver, le COP de ces installations est bas pour les deux zones mais ce COP est néanmoins 0,2 plus élevé dans les zones urbaines que les zones rurales. Par suite, la température du sol a un effet non négligeable sur la performance des systèmes à PAC géothermique accouplés à des EG horizontaux. Dans les zones où la charge en chauffage est plus élevée que la charge en refroidissement, les effets du changement climatique ainsi que de ceux de l'îlot de chaleur urbain sur la température du sol permettent d'avoir une meilleure performance des systèmes de climatisation à PAC géothermique.

2.2.2.6 Analyse critique

La section 2.2.2 met en avant plusieurs articles traitant de l'effet du changement climatique sur le profil de température du sol ainsi que sur la performance des systèmes à PAC géothermique. Tous les articles concluent que le changement climatique induira des charges en chauffage plus petites et des charges en climatisation plus grandes ainsi qu'une augmentation de la température moyenne du sol. Par la suite, le changement climatique affecte les systèmes à PAC géothermique sous deux aspects interconnectés : Le changement des besoins thermiques des bâtiments et

l'augmentation de la température moyenne du sol et donc un changement de la performance de l'EG accouplé au système. Ce mémoire tente de séparer l'effet de la variabilité du climat année par année ainsi que son évolution pendant de longues durées sur la performance d'un EG de son effet sur le système à PAC géothermique en son entièreté.

2.3 Modèles numériques et analytiques

2.3.1 Méthode des différences finies

La section 2.3.1 aborde différents modèles numériques par différences finies. Comme dans le reste du mémoire un modèle unidimensionnel pour le profil de température du sol et un modèle tridimensionnel pour un champ d'EG sont utilisés, ces modèles seront le point focal de cette revue. D'autres modèles numériques classiques non abordés mais méritant d'être mentionnés sont le modèle SBM (Superposition Borehole Model) (Eskilson, 1986) ainsi que le modèle DST (Duct Ground Heat Storage Model) (Hellström, 1989) abordé plus profondément à l'Annexe C.

2.3.1.1 Méthode de Lee & Lam (2008)

Dans leur article, Lee & Lam (2008) prédisent les performances d'EG en utilisant une méthode de différences finies avec des coordonnées cartésiennes. Chaque EG est approximé à une colonne carrée pour éviter l'utilisation d'un maillage fin à l'intérieur de ce dernier. De plus, les hypothèses suivantes sont mises en place pour calculer les profils de température à l'extérieur des EG :

- Le sol est homogène ;
- Les propriétés thermiques des matériaux ne changent pas avec la température ;
- La résistance thermique entre le sol et les EG est nulle ;
- La température du sol est constante en surface, en grande profondeur, ainsi que dans les directions transversales limites ;

Une description de la méthode numérique utilisée figure à l'Annexe A.

Dans leur étude, Lee & Lam (2008) concluent que les performances d'un champ d'EG ne peuvent être prédites avec précision en utilisant les résultats obtenus d'un seul EG par superposition à moins de créer un modèle de différences finies pour chaque EG. Une meilleure méthode serait de discrétiser le champ en coordonnées rectangulaires et simuler tous les EG simultanément. En

effet, ils ont constaté que les profils de température du sol à proximité de l'EG se comportaient différemment de ceux plus loin. Dans un scénario d'injection de chaleur dans le sol, la température maximale du sol près de l'EG est observée à proximité de la partie supérieure de l'EG. Cependant, à une distance éloignée de quelques mètres de l'EG, la température maximale du sol semble se décaler vers la profondeur à mi-chemin de l'EG. Par suite, l'interférence thermique entre deux EG dans un champ d'EG dépend de la distance entre ces EG et de leur profondeur. De plus, une comparaison entre le modèle développé et le modèle à source linéique finie est entreprise. La différence entre les augmentations de température du sol à différentes distances de l'EG est calculée et, à 10 m de l'EG par exemple, une différence de 12,5 % entre les deux méthodes est observée. Cela peut aboutir à une déviation non négligeable en estimant la performance d'un grand champ d'EG en considérant l'interférence thermique entre eux. Par suite, pour modéliser de grands champs d'EG, l'approche numérique serait le meilleur choix.

2.3.1.2 Méthode de Delazar et al. (2021)

Dans leur article, Delazar et al. (2021) développent un modèle numérique implicite tridimensionnel d'un champ d'EG qui tient compte des interactions entre la surface du sol et l'atmosphère. Les hypothèses utilisées dans leur configuration sont :

- Le sol est considéré homogène, non perturbé au temps initial et les propriétés thermiques des matériaux sont indépendantes de la température.
- L'EG et les tuyaux peuvent être représentés comme des éléments unidimensionnels à cause de leur petite taille relative au sol.
- La résistance thermique entre le sol et l'EG est nulle.
- La température du sol à une certaine profondeur varie sinusoïdalement pendant une année et cette amplitude de variation diminue exponentiellement avec la profondeur.
- Les effets du rayonnement solaire, de la convection naturelle, de l'évaporation, de la précipitation ainsi que de la couverture végétale sont estimés par le concept de la source de chaleur interne.
- La capacité thermique du coulis est ignorée et un état quasi permanent est maintenu à l'intérieur des EG.

Le modèle développé et détaillé à l'Annexe B est, par la suite, comparé à un modèle ne comprenant pas le terme de source interne H qui permet la considération des fluctuations de la température saisonnière du sol. Delazar et al. (2021) concluent qu'il est indispensable de prendre en considération ces fluctuations de température pour les EG de moins de 60 m de profondeur. De plus, ces fluctuations doivent être tenues en compte lorsque l'amplitude de la variation de la température en surface est importante. Ignorer ces fluctuations pourrait engendrer une mauvaise estimation des résultats.

2.3.1.3 Méthode de Chalhoub et al. (2017)

Dans leur article, Chalhoub et al. (2017) présentent un modèle numérique à différences finies pour décrire le transfert de chaleur et d'humidité entre l'atmosphère et les couches superficielles du sol. Le modèle est par la suite vérifié expérimentalement. Ce modèle prend en compte les précipitations, l'évapotranspiration (pour calculer le volume d'eau passant du sol à l'atmosphère), le contenu du sol en eau (pour déterminer ses propriétés thermiques), la couverture végétale, l'irradiation de longue et courte longueur d'onde ainsi que le transfert de chaleur par convection à la surface. Le modèle opère suivant deux étapes consécutives :

La première étape est le calcul d'un bilan hydraulique du sol en divisant ce dernier en deux couches différentes : La première couche moins profonde est affectée par les racines de la végétation et la deuxième ne l'est pas. Le contenu en eau du sol à un instant donné est affecté par les précipitations ainsi que l'évapotranspiration du sol. Ce contenu en eau est par la suite utilisé pour déterminer les propriétés physiques du sol tel sa conductivité thermique et sa capacité thermique volumétrique C .

La deuxième étape consiste à calculer le bilan énergétique du sol en faisant :

$$R + H + LE + G = 0 \quad 2.3.1$$

Où R est la différence entre l'irradiation entrant et quittant le sol, H est la chaleur sensible échangée entre le sol et l'atmosphère incluant principalement une constituante convective affectée par la couverture végétale, LE est la chaleur latente échangée entre le sol et l'atmosphère avec E étant la quantité d'eau s'évaporant à la surface du sol (et calculée dans la première étape) et L la chaleur latente d'évaporation de l'eau et finalement, G est la chaleur globale échangée entre le sol et

l'atmosphère. La température du sol est ensuite calculée numériquement en résolvant l' équation de la conduction de chaleur unidimensionnelle transitoire sans source.

L'ensemble des équations est discrétisé en temps et en espace pour pouvoir les résoudre numériquement. Par exemple, le transfert de chaleur au sol à un pas de temps j devient :

$$G^j = R^{j-1} - H^{j-1} - LE^{j-1} \quad 2.3.2$$

Et la température à un nœud i du sol, discrétisé n nœuds, est calculée avec une méthode de différence finie explicite :

$$T_i^j = T_i^{j-1} + \alpha^{j-1} \Delta t \left(\frac{T_{i+1}^{j-1} - 2T_i^{j-1} + T_{i-1}^{j-1}}{(\Delta z)^2} \right) \quad 2.3.3$$

Où α est la diffusivité thermique du sol, Δt le pas de temps et Δz la distance entre deux nœuds. Le transfert de chaleur en surface G est utilisé comme condition limite à la surface du sol et est introduit à l'équation 2.3.3 sous la forme :

$$T_1^j = T_1^{j-1} + \alpha^{j-1} \Delta t \left(\frac{T_2^{j-1} - T_1^{j-1}}{(\Delta z)^2} \right) + \frac{\Delta t G^{j-1}}{\Delta z C^{j-1}} \quad 2.3.4$$

Dans la deuxième partie de l'article, une vérification expérimentale du modèle est entreprise en comparant les résultats de ce dernier avec les mesures au centre expérimental du BRGM à Orléans, France pendant l'année s'étalant de novembre 2013 à novembre 2014. La température du sol est mesurée chaque 10 minutes à 6, 14, 20, 30, 50, 100 et 150 cm de profondeur. La précision du modèle est mesurée par le biais d'une valeur d'efficacité Ef donnée par :

$$Ef = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (s_j - m_j)^2}{\sum_{j=1}^n (s_j - \bar{m})^2} \quad 2.3.5$$

Où une valeur proche de 1 indique une bonne précision. Le modèle numérique arrive à une valeur d'efficacité Ef supérieure à 0.8 même à 14cm de profondeur où la différence entre la température simulée et celle mesurée varie entre -2,44 °C et +5,76 °C. Le modèle arrive à une valeur d'efficacité supérieure à 0.9 pour des profondeurs plus grandes que 30cm avec une différence entre les valeurs

simulées et les valeurs mesurées à 150cm bornée par $-0,53\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+1,66\text{ }^{\circ}\text{C}$ inférant une robustesse du modèle numérique.

En conclusion, le modèle numérique réussi à prédire la température du sol avec une précision relativement bonne et il est possible d'utiliser ce modèle, avec modifications, pour mesurer l'effet de la variation des conditions en surface sur la performance des EG.

2.3.1.4 Analyse critique

La section 2.3.1 met en avant plusieurs modèles numériques à différences finies complexes pour modéliser le sol et les EG. Le modèle unidimensionnel présenté par Chalhoub et al. (2017) pour calculer le profil de température du sol comptabilise les précipitations, l'évapotranspiration, le contenu du sol en eau, la couverture végétale, l'irradiation de longue et courte longueur d'onde ainsi que le transfert de chaleur par convection à la surface. Le modèle tridimensionnel présenté par Delazar et al. (2021) pour modéliser un champ d'EG comptabilise le transfert thermique dans le coulis et entre les différents tuyaux d'un EG. Comme ce mémoire n'abordera que l'effet de la variation de la température ambiante à la surface du sol ainsi que l'effet du flux de chaleur géothermique, un modèle numérique plus concis y est développé.

2.3.2 Méthode analytique

2.3.2.1 Méthode de Xing & Spitler (2017)

Dans la première partie de leur article, Xing & Spitler (2017) développent un modèle numérique unidimensionnel pour prédire la température du sol non perturbé utilisant une méthode de volumes finis. Ce modèle numérique prend en compte différents phénomènes à la surface du sol comme l'ensoleillement, la convection, la radiation thermique et la conduction pour simuler les profils de température. Le modèle est utilisé pour prédire la température du sol nu ou recouvert d'asphalte, de béton ou d'herbe haute ou basse. Le modèle numérique prend aussi compte du gel et dégel du sol ainsi que la couverture de neige en surface.

Bien que ce modèle numérique puisse donner des résultats relativement précis, il s'avère coûteux en termes de puissance de calcul et une approche analytique devient plus attirante pour les applications d'ingénierie. La forme générale de ces modèles analytiques typiquement utilisée est (Thomson, 1862):

$$T_s(z, \tau) = T_{s,avg} - \sum_{n=1}^{\infty} e^{-z \sqrt{\frac{n\pi}{\alpha_s t_p}}} T_{s,amplitude,n} \cos\left(\frac{2n\pi}{t_p}(t - PL_n) - z \sqrt{\frac{n\pi}{\alpha_s t_p}}\right) \quad 2.3.6$$

Où $T_s(z, \tau)$ est la température du sol non perturbée en °C à une profondeur z en m et à un temps τ en jours de l'année commençant le premier janvier. De plus, t_p est la période du cycle de température du sol en jours (365), $T_{s,avg}$ est la température moyenne annuelle du sol en °C, α_s la diffusivité du sol en $m^2/jour$, $T_{s,amplitude,n}$ est l'amplitude de surface d'ordre n qui peut être présumée, quand n est égal à 1, comme la moitié de la différence entre la température moyenne mensuelle maximale et minimale pendant l'année en °C et PL_n est le déphasage d'ordre n dans le cycle de température du sol en jours. Le modèle utilisé en pratique est le modèle qui prend n égal à 1 ce qui est suffisant pour adéquatement modéliser la variation de la température du sol dans la plupart des cas. Cependant, cette équation avec n égal à 1 ne prend en compte que les phénomènes de conduction de chaleur et est assez inefficace pour modéliser le sol dans les régions humides ou les régions froides présentant un sol apte à geler et être recouvert de neige. Ces phénomènes peuvent causer une déviation de la température du sol prévue de 1 à 4 °C. (Signorelli & Kohl, 2004) et par la suite, l'utilisation d'harmoniques d'ordres plus grands que 1 est justifiée pour prendre en compte de ces phénomènes.

Par la suite, Xing & Spitler (2017) comparent les prédictions du modèle analytique harmonique d'ordre 1 et 2 à la température du sol mesuré dans 19 différents endroits aux États-Unis dans 3 différentes zones climatiques : des zones froides du Midwest américain (ouest du Mississippi) et en Alaska, des zones arides et sèches en été dans l'ouest des États-Unis et des zones chaudes et tempérées du sud des États-Unis. Ces différents sites sont aussi divisés en sites recouverts d'herbe haute et courte. Les résultats montrent une réduction de l'erreur RMSE de 0,2 °C en utilisant le modèle harmonique d'ordre 2 à la place du modèle harmonique d'ordre 1. Le modèle harmonique d'ordre 2 donne des résultats comparables en précision aux résultats du modèle numérique pour les profondeurs supérieures à 1 m. En effet, l'effet de la variabilité journalière de la température en surface sur le profil de température du sol est atténué à partir de ces profondeurs et le modèle analytique d'ordre 2, qui lui ne peut prendre en compte de cette variabilité journalière, commence à se rapprocher du modèle numérique. En conclusion, le modèle harmonique d'ordre 2

donne des résultats relativement proches de la méthode numérique malgré sa simplicité et il est donc utilisable pour la plupart des applications en ingénierie.

CHAPITRE 3 MODÈLE NUMERIQUE DU SOL

La modélisation de la température du sol s'avère une tâche importante pour évaluer la performance de divers systèmes géothermiques car, comme déjà mentionné, la quantité de chaleur transférée est directement proportionnelle à la différence de température entre le sol et le fluide circulant dans un EG. Dans cette étude, les propriétés thermiques et physiques du sol (tel sa masse volumique et sa diffusivité thermique) sont constantes dans le temps et dans l'espace. Les écoulements d'eau souterrains et l'évapotranspiration en surface sont négligés. Ces simplifications ont pour but d'isoler les effets des flux de chaleur géothermique et les échanges en surface sur le profil de température du sol. De plus, tel que montré à la Figure 2.3.1, le volume du sol est considéré comme un solide semi-infini.

L'approche d'utiliser un modèle numérique pour calculer la température du sol, est constituée de deux étapes principales. La première est une phase de préparation du volume du sol étudié en initialisant les caractéristiques statiques de ce domaine comme ces propriétés physiques et thermiques, la subdivision du sol en utilisant un maillage adéquat, la discrétisation du temps de simulation, et le choix de la complexité de l'étude de cas. En effet, une étude unidimensionnelle (1D) est suffisante pour un volume de sol uniforme, bidimensionnelle (2D) pour un volume de sol contenant un ou plusieurs EG coplanaires (d'une façon qualitative) et tridimensionnelle (3D) pour plusieurs EG non coplanaires. La deuxième étape est la phase de calcul numérique des énergies thermiques entrantes, sortantes et générées dans les différents volumes de contrôle.

Le choix de développer un modèle numérique et non pas d'utiliser différents programmes déjà disponibles est justifiable par la facilité de moduler ce modèle en fonction des besoins, par sa versatilité à reproduire les résultats de différentes études ainsi que par la simplicité à l'utiliser dans un environnement de TRNSYS. Les prochains paragraphes montrent le développement du modèle numérique en ordre croissant de complexité.

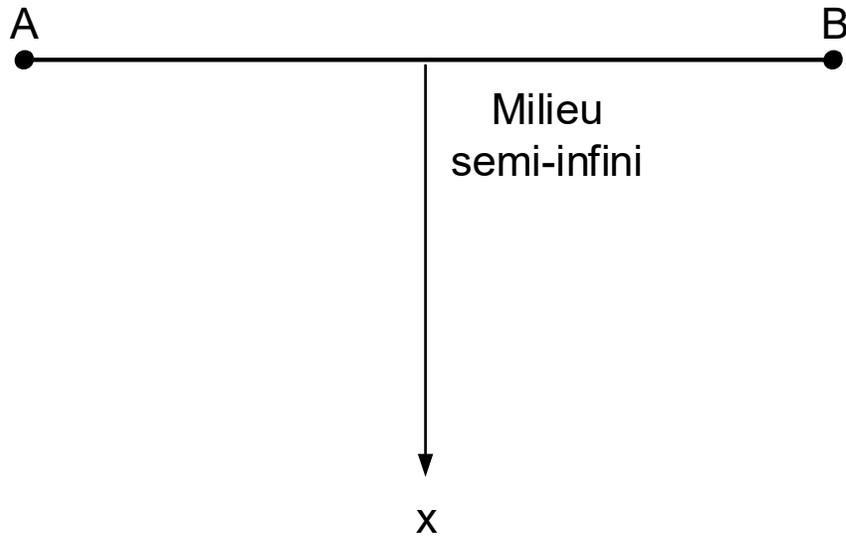


Figure 2.3.1: Modèle semi-infini du sol

3.1 Modèle Unidimensionnel

L'équation de la chaleur unidimensionnelle transitoire sans source de chaleur est donnée par :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad 3.1.1$$

Où :

T = température du sol [$^{\circ}\text{C}$]

t = temps écoulé [s]

x = profondeur [m]

ρ = masse volumique du sol [kg/m^3]

C_p = chaleur spécifique du sol [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$]

k = conductivité thermique du sol [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]

Une solution analytique pour les conditions de frontière et initiales suivantes :

Pour $x = 0$ (condition de surface), $T(0, t) = T_{ext}$

Pour $t = 0$, la température du sol est uniforme et égale à T_i

Pour x tend vers l'infini, la température est égale à T_i

La solution à l'équation 3.1.1 existe et a la forme (Han, 2012):

$$\frac{T(x, t) - T_{ext}}{(T_i - T_{ext})} = erf\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad 3.1.2$$

Où α est la diffusivité thermique du sol ($= k/\rho C_p$) et erf est la fonction d'erreur. Bien que cette solution analytique soit utile, elle ne permet pas de prendre en compte le flux géothermique. C'est pourquoi un modèle numérique est développé.

Cette étude vise à résoudre numériquement l'équation 3.1.1 à l'aide de la méthode des volumes finis de Patankar (1980). Dans un premier temps, tel que montré dans la Figure 3.1.1, un maillage uniforme est utilisé avec des volumes de contrôle Δx pour l'ensemble du domaine de calcul sauf aux extrémités où des demi-volumes de contrôle sont utilisés. Pour un point interne P, l'équation discrétisée prend la forme suivante :

$$a_P T_P = a_E T_E + a_O T_O + b \quad 3.1.3$$

Où les indices E et O indiquent, respectivement, les nœuds au-dessous (est) et au-dessus (ouest) du nœud d'indice P.

En utilisant une approche implicite, les différents coefficients prennent la forme suivante :

$$a_P = a_E + a_O + a_P^0 \quad 3.1.4$$

Avec :

$$a_E = \frac{k}{\delta x_e}, \quad a_O = \frac{k}{\delta x_o}, \quad a_P^0 = \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t}, \quad b = a_P^0 T_P^0 \quad 3.1.5$$

Où :

T_P^0 = Température du nœud P au pas de temps précédent.

Δt = Pas de temps.

δx = Distance entre 2 nœuds.

Δx = Longueur d'un volume de contrôle.

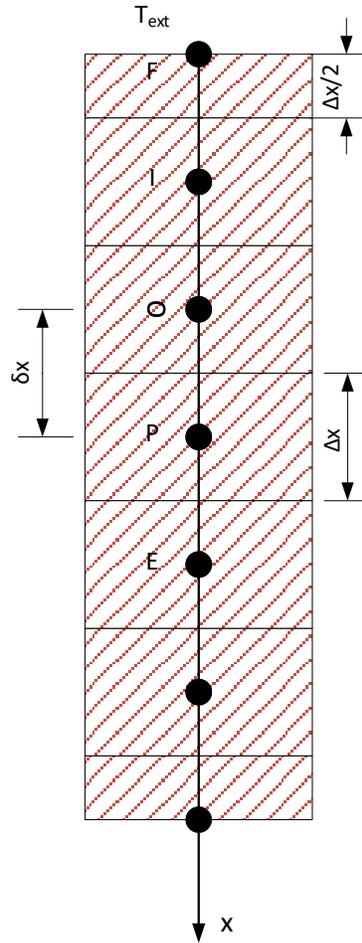


Figure 3.1.1: Maillage initial utilisé dans le modèle numérique

Pour un nœud à la frontière comme le nœud F de la Figure 3.1.1, l'équation discrétisée a la forme :

$$a_F T_F = a_I T_I + b \quad 3.1.6$$

Où les indices F et I indiquent respectivement le point de frontière et le nœud interne le plus proche de ce dernier et où :

$$a_F = a_I + a_F^0 \quad 3.1.7$$

$$a_I = \frac{k}{\delta x}, \quad a_F^0 = \frac{\rho C_p \Delta x}{2 \Delta t}, \quad b = a_F^0 T_F^0 + q'', \quad q'' = h(T_{ext} - T_F) \quad 3.1.8$$

Avec q'' étant le flux de chaleur surfacique par convection et/ou rayonnement à la surface et h le coefficient d'échange. De cette façon, chacun des n nœuds définit une équation à trois inconnues

qui sont les températures du sol à ce nœud et ses nœuds voisins au pas de temps donné. En ce qui concerne la condition à la frontière inférieure, la température du sol est assignée comme constante pour jouer le rôle de source de chaleur dans le cas où un gradient géothermique existe.

Ces n équations forment un système de n équations à n inconnues et ce dernier a la particularité d'avoir, quand écrit sous forme matricielle de $A * T = B$, une matrice A tridiagonale et donc facile à simplifier. Ce produit matriciel a la forme :

$$A * T = \begin{bmatrix} a_1^1 & a_2^1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_1^2 & a_2^2 & a_3^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_2^3 & a_3^3 & a_4^3 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & a_{n-3}^{n-2} & a_{n-2}^{n-2} & a_{n-1}^{n-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{n-2}^{n-1} & a_{n-1}^{n-1} & a_n^{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{n-1}^n & a_n^n \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ T_{n-2} \\ T_{n-1} \\ T_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ b_{n-2} \\ b_{n-1} \\ b_n \end{bmatrix} = B \quad 3.1.9$$

Où pour une ligne i donnée, avec $1 < i < n$, les coefficients a_j^i et b_i sont les coefficients a et b de l'équation 3.1.3 tandis que pour une les lignes 1 et n , ils représentent les coefficients a et b de l'équation 3.1.6. En vue la simplicité de la forme matricielle atteinte, ce système est résolu avec MATLAB en codant manuellement la méthode du pivot de Gauss. La première étape de cette méthode consiste à transformer la matrice creuse A en une matrice triangulaire.

$$(A|B) = \begin{bmatrix} a_1^1 & a_2^1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & b_1 \\ a_1^2 & a_2^2 & a_3^2 & 0 & 0 & \cdots & 0 & b_2 \\ 0 & a_2^3 & a_3^3 & a_4^3 & 0 & \cdots & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & a_{n-3}^{n-2} & a_{n-2}^{n-2} & a_{n-1}^{n-2} & 0 & b_{n-2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{n-2}^{n-1} & a_{n-1}^{n-1} & a_n^{n-1} & b_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{n-1}^n & a_n^n & b_n \end{bmatrix} \quad 3.1.10$$

D'une façon successive, passant de la ligne d'indice le plus petit (en commençant par la ligne d'indice 2 car la ligne d'indice 1 a déjà la forme désirée) à l'indice le plus grand, chaque ligne L_i de la matrice A augmenté de B montrée dans l'équation 3.1.10 devient la une ligne d'indice prime (L'_i) possédant des coefficients a d'indice prime (a') en faisant :

$$L'_i = L_i - \frac{a_{i-1}^i}{a_{i-1}^{i-1}} L_{i-1} \quad 3.1.11$$

Jusqu'à atteindre une forme triangulaire supérieure de la matrice en question ($a_j^i = 0$ si $i > j$) ayant la forme :

$$(A|B) = \begin{bmatrix} a_1^1 = a_1^1 & a_2^1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & b_1 = b_1' \\ 0 & a_2^2 - \frac{a_2^1}{a_1^1} a_1^1 = a_2^2 & a_3^2 & 0 & 0 & \cdots & 0 & b_2 - \frac{a_2^1}{a_1^1} b_1 = b_2' \\ 0 & 0 & a_3^3 - \frac{a_3^2}{a_2^2} a_2^2 = a_3^3 & a_4^3 & 0 & \cdots & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{n-2}^{n-2} & a_{n-1}^{n-2} & 0 & b'_{n-2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{n-1}^{n-1} & a_n^{n-1} & b'_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_n^n & b'_n \end{bmatrix} \quad 3.1.12$$

Désormais, les températures T_i peuvent être calculés directement commençant par T_n en trouvant :

$$T_n = \frac{b'_n}{a_n^n} \quad 3.1.13$$

Et par suite :

$$T_i = \frac{b'_i - a_{i+1}^i T_{i+1}}{a_i^i} \quad 3.1.14$$

3.1.1 Maillage non uniforme et indépendance spatiale et temporelle

La surface du sol exposée au climat extérieur est la partie du modèle exposée au plus grand gradient de température au fil du temps. Par suite, une précision des mesures près de la surface est importante pour la fiabilité du modèle numérique. Pour cette raison, un maillage exponentiel avec une forte concentration de points près de la surface a été utilisé. La position x_n d'un nœud d'indice n est donc exprimée par :

$$x_n = e^{\frac{\ln(E+1)}{N-1}(n-1)} - 1 \quad 3.1.15$$

Pour tout $n \in \llbracket 1; N \rrbracket$, avec N étant le nombre total de nœuds désiré et E la profondeur du volume étudié.

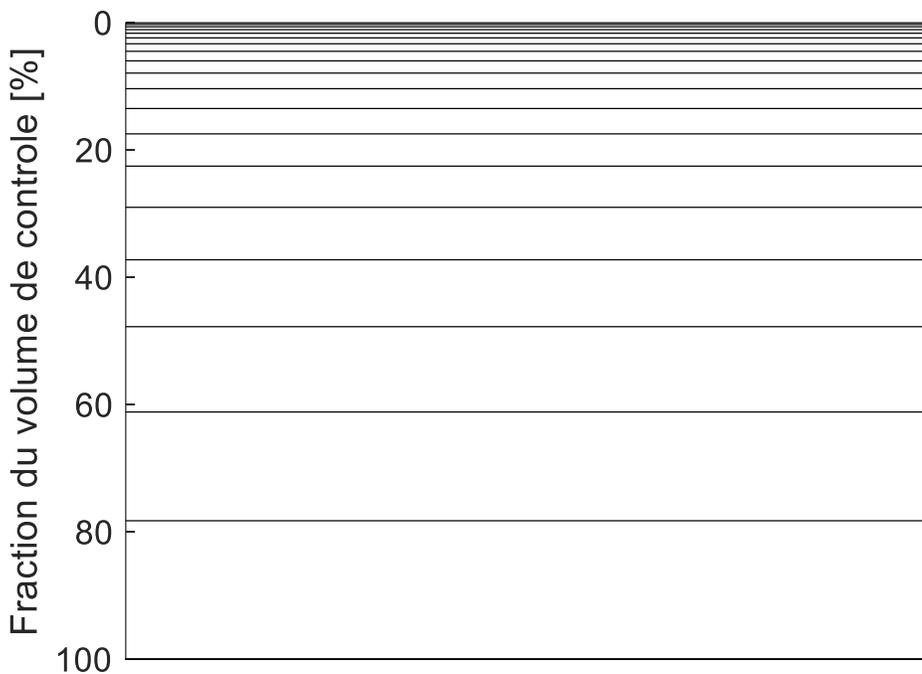


Figure 3.1.2: Maillage exponentiel d'un volume de contrôle de sol avec 20 nœuds

Comme le montre la Figure 3.1.2, ce maillage exponentiel permet de raffiner le maillage près de la surface et d'avoir un maillage plus ou moins grossier dans les zones profondes où les changements de température sont moindres et donc ne demandant pas un même degré d'exactitude. Par suite, dans le reste des calculs, un maillage exponentiel sera adopté pour modéliser le sol. Une vérification de l'intégrité de la méthode numérique face au changement de maillage spatial et temporel est faite en utilisant les paramètres du Tableau 3.1.1.

Tableau 3.1.1: Paramètres de la vérification du modèle 1D

Paramètre	Valeur
Conductivité thermique du sol (k) [W/m-K]	1
Capacité thermique du sol (C_p) [J/kg-K]	1000
Densité du sol (ρ) [kg/m ³]	1000
Température extérieure (T_{ext}) [°C]	10
Température initiale (T_i) [°C]	20
Coefficient de convection (h) [W/m ² -K]	30
Profondeur étudiée (E) [m]	10

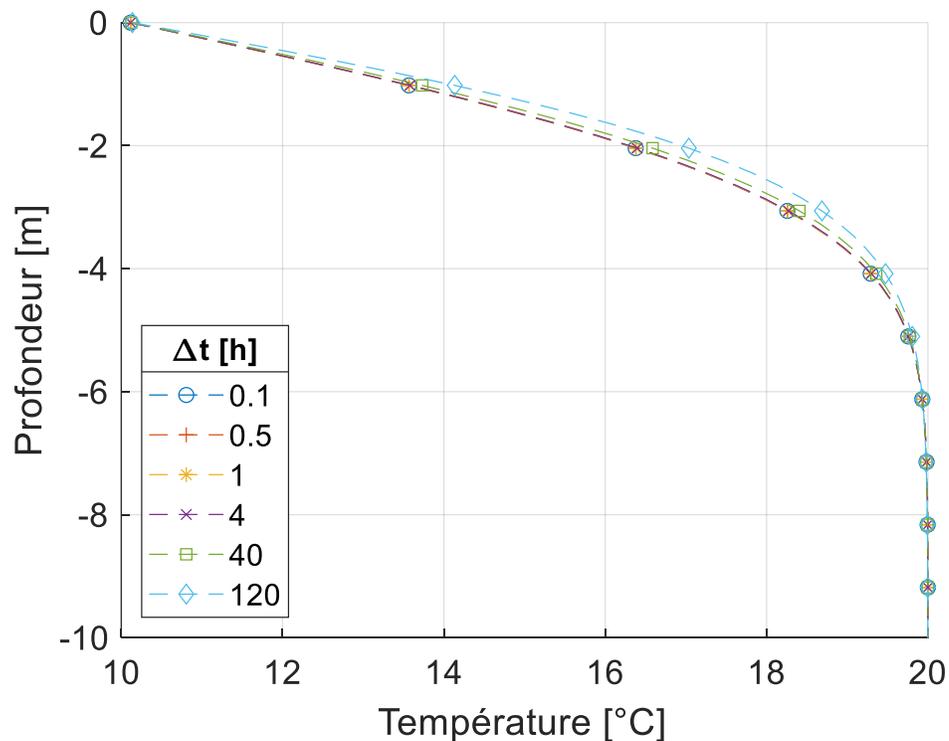


Figure 3.1.3: Vérification de l'indépendance du maillage temporel avec un nombre de nœuds fixe à 50 et des pas de temps variés

Utilisant les caractéristiques du Tableau 3.1.1, l'influence du pas de temps est étudiée avec un nombre de nœuds fixe (50) et une durée simulée de 720 heures. Les résultats pour des pas de temps Δt de 0,1, 0,5, 1, 4, 40 et 120 heures sont illustrés dans la Figure 3.1.3. Comme le montre cette figure, la différence entre les courbes successives diminue en réduisant Δt et les courbes des valeurs entre 0,1 et 4 h sont très proches les unes des autres (au plus 0,02 °C de différence).

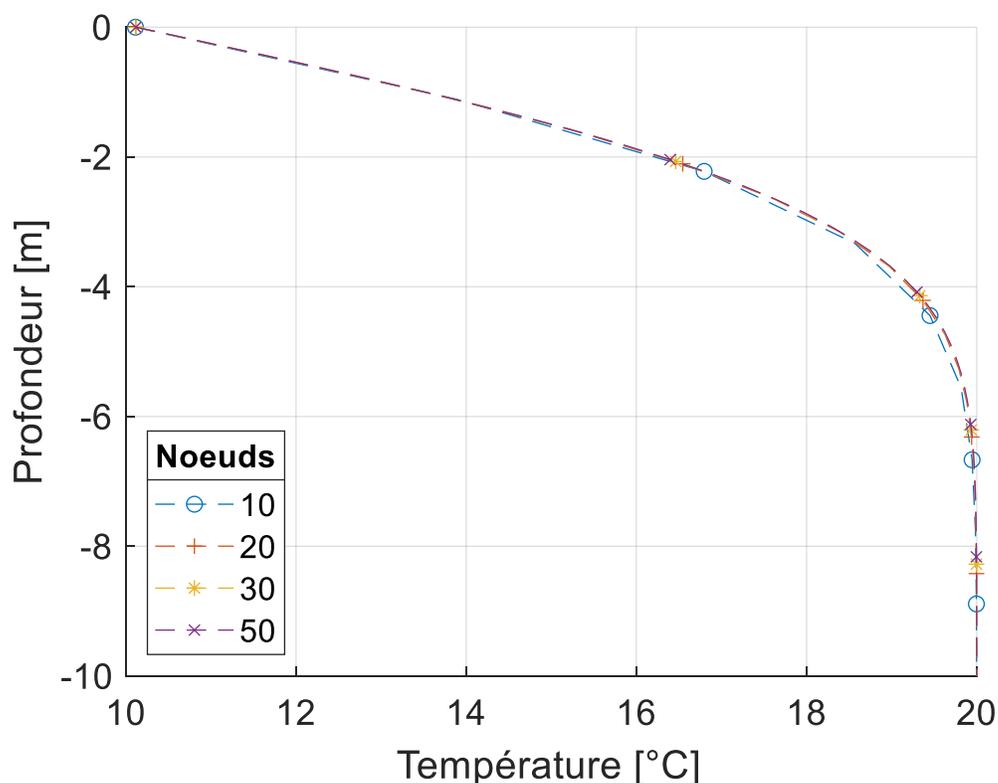


Figure 3.1.4: Vérification de l'indépendance du maillage spatial avec un pas de temps fixe à 4 h et des nombres de nœuds variés

En utilisant les mêmes caractéristiques du Tableau 3.1.1, la Figure 3.1.4 montre l'effet de l'augmentation du nombre de nœuds sur le profil de température. Il est apparent que cette allure varie très faiblement au-delà de 30 nœuds (une différence d'au plus 0,02 °C entre les courbes de 30 et 50 nœuds). Par suite, la vérification de la compatibilité du modèle numérique avec le modèle analytique se fera avec 50 nœuds et un pas de temps de 4 h.

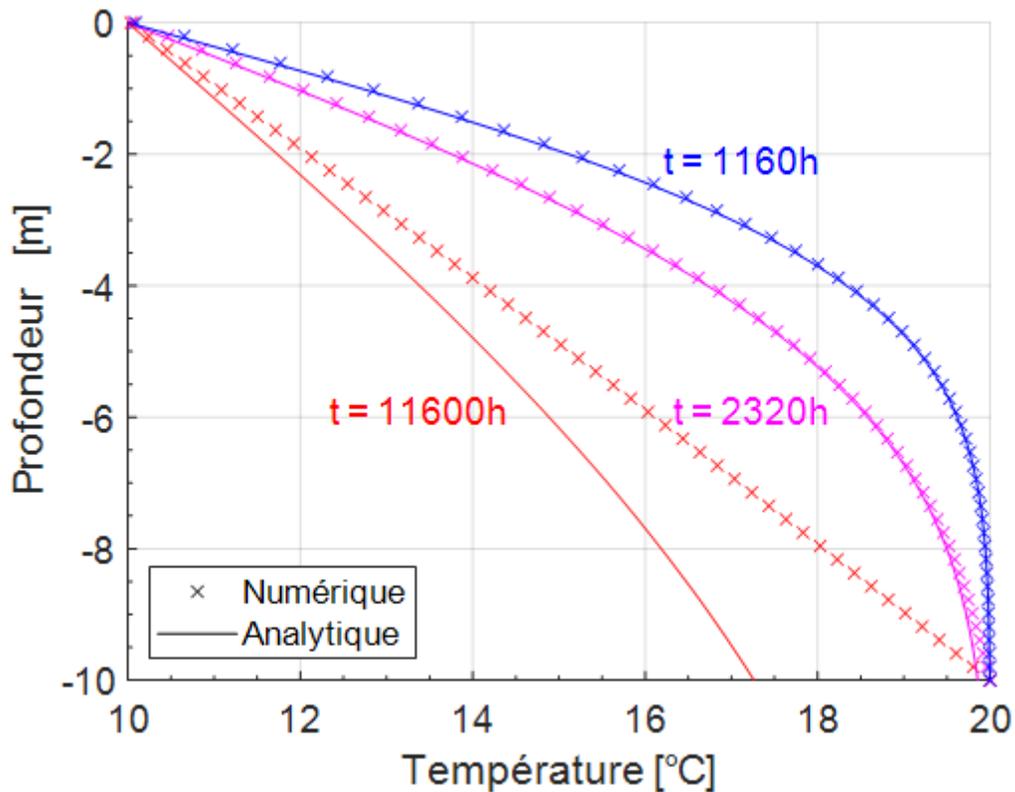


Figure 3.1.5 : Comparaison du profil de température entre les modèles numérique et analytique pour différentes durées simulées

La Figure 3.1.5 montre qu'il y a un bon accord entre les solutions analytique (équation 3.1.2) et numérique jusqu'à une limite donnée où l'approximation du sol à un milieu semi-infini cesse d'être valide (pour $t = 11600$ h sur la Figure 3.1.5 par exemple). Il existe donc une profondeur minimale à respecter pour que la méthode numérique soit valide pour le temps de simulation pris en compte et représente le plus fidèlement possible le caractère semi-infini du domaine de calcul. En adoptant une approche adimensionnelle, les caractéristiques physiques du sol (la conductivité thermique k , la capacité thermique C_p et la densité ρ), le temps simulé t et la profondeur simulée E sont reliés par la relation :

$$E \sqrt{\frac{\rho C_p}{k t}} = C \quad 3.1.16$$

Où C est une constante de proportionnalité adimensionnelle. Cette relation est dérivée de la thèse d'Eskilson (1987) qui stipule que la distance E parcourue en un temps t par la chaleur depuis sa source est $E = 3 \sqrt{\frac{kt}{\rho C_p}}$. Une erreur relative de moins de 1 % entre les deux modèles est atteinte quand $C > 2\sqrt{3}$ et cette valeur sera une limite utilisée dans le reste de cette étude pour conserver la fiabilité de la méthode numérique en question. Par exemple, en utilisant les paramètres du Tableau 3.1.1, la durée maximale possible à simuler d'une façon fiable est 2315 heures.

3.1.2 Conditions extérieures sinusoïdales croissantes et gradient géothermique

Dans cette section, le modèle numérique unidimensionnel est utilisé pour calculer le profil de température du sol qui est affecté par un gradient géothermique et différentes conditions en surface. En premier lieu, la température ambiante d'un fichier météo typique de la région de Montréal est approximée par une sinusoïde et les différentes propriétés du sol sont fixées. Ensuite le modèle numérique est utilisé pour calculer le profil de température du sol affecté en surface par la température ambiante sinusoïdale déjà introduite. Les résultats sont comparés à la solution analytique existante. De plus, le profil de température du sol est calculé affecté par une température ambiante à la surface augmentant linéairement et les résultats sont aussi comparés à la solution numérique existante. Enfin, pour essayer de visualiser l'effet du changement climatique sur le profil de température du sol, ce dernier est affecté par une température ambiante sinusoïdale augmentant d'une façon linéaire combinant les conditions des deux parties précédentes. Les résultats produits par le modèle numérique sont utilisés pour confirmer une méthode analytique développée comme solution du problème de transfert de chaleur avec ces conditions de frontière.

3.1.2.1 Variation sinusoïdale de la température extérieure

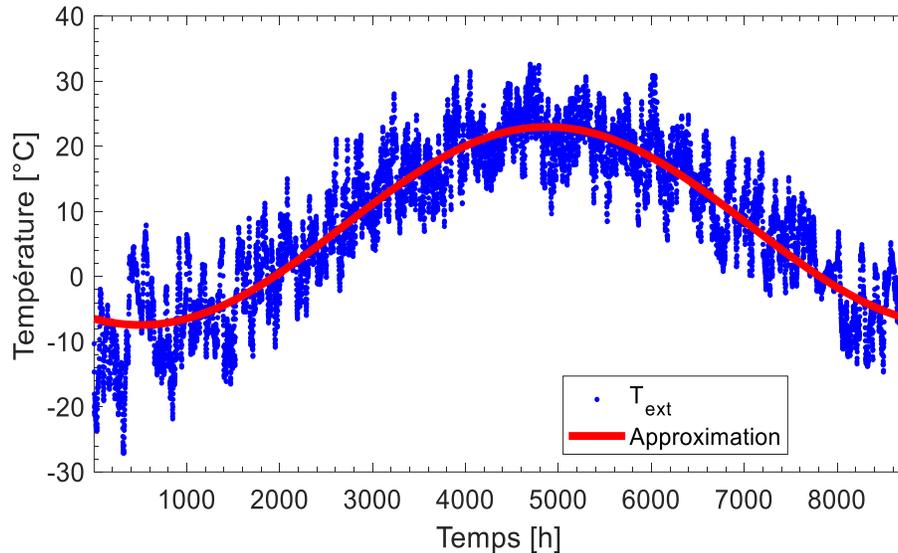


Figure 3.1.6: Températures extérieures typiques à Montréal et approximation de ces températures à une sinusoïde

La Figure 3.1.6 montre la variation horaire de la température extérieure sur une année. Ces données sont issues du fichier météo typique de la région de Montréal (CAN_QC_MONTREAL-INTL-A_7025251.epw). Tel que montré à la Figure 3.1.6, il est possible d'approximer les variations annuelles de la température extérieure par une sinusoïde de période T d'un an (ou 31536×10^3 secondes) :

$$T_{ext}(t) = T_m - (T_{max} - T_m) \cos(\omega(t - \phi)) \quad 3.1.17$$

Pour la région Montréal, la sinusoïde résultante possède une valeur moyenne T_m de $7,9$ °C, une température maximale T_{max} de $23,2$ °C et une température minimale à l'heure 541 (ou à la seconde 1947600) de l'année donnant un déphasage Φ à la sinusoïde. ω est la vitesse de rotation de la sinusoïde en rad/s qui n'est autre que $\frac{2\pi}{T}$.

Tableau 3.1.2: Caractéristiques du sol et du climat à Montréal

Paramètre	Valeur
Conductivité thermique du sol (k) [W/m-K]	3.25
Capacité thermique du sol (C_p) [J/kg-K]	1000
Densité du sol (ρ) [kg/m ³]	1500
Diffusivité thermique du sol (α) [m ² /s]	2.17e-6
Température moyenne (T_m) [°C]	7.9
Gradient géothermique (g) [°C/m]	0.02
Température extérieure maximale (T_{max}) [°C]	23.2
Période climatique (T) [h]	8760
Déphasage (Φ) [h]	541
h [W/m ² -K]	30e30

3.1.2.2 Variation sinusoïdale de la température extérieure et gradient géothermique

En ce qui concerne le gradient géothermique dans la région de Montréal, une étude de Raymond et al. (2008) prédit une valeur entre 0,01 et 0,02 °C/m. Avec ces conditions du sol et du climat, la solution analytique du profil de température dans le sol est (Lunardini, 1981):

$$T(x, t) = T_m + gx - (T_{max} - T_m)e^{-x\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}} \cos\left(\omega(t - \Phi) - x\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\right) \quad 3.1.18$$

Avec comme conditions initiales pour les modèles numérique et analytique :

$$T(x, 0) = T_m + gx - (T_{max} - T_m)e^{-x\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}} \cos\left(\omega\Phi + x\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\right) \quad 3.1.19$$

Comme la solution analytique impose une variation sinusoïdale de la température à la surface du sol, cette température suit la variation sinusoïdale de la température extérieure. Pour cela, une valeur du coefficient de convection h élevée (30e30) est prise dans le modèle numérique de façon à imposer une température de surface égale à la température extérieure pour pouvoir comparer fidèlement les deux modèles.

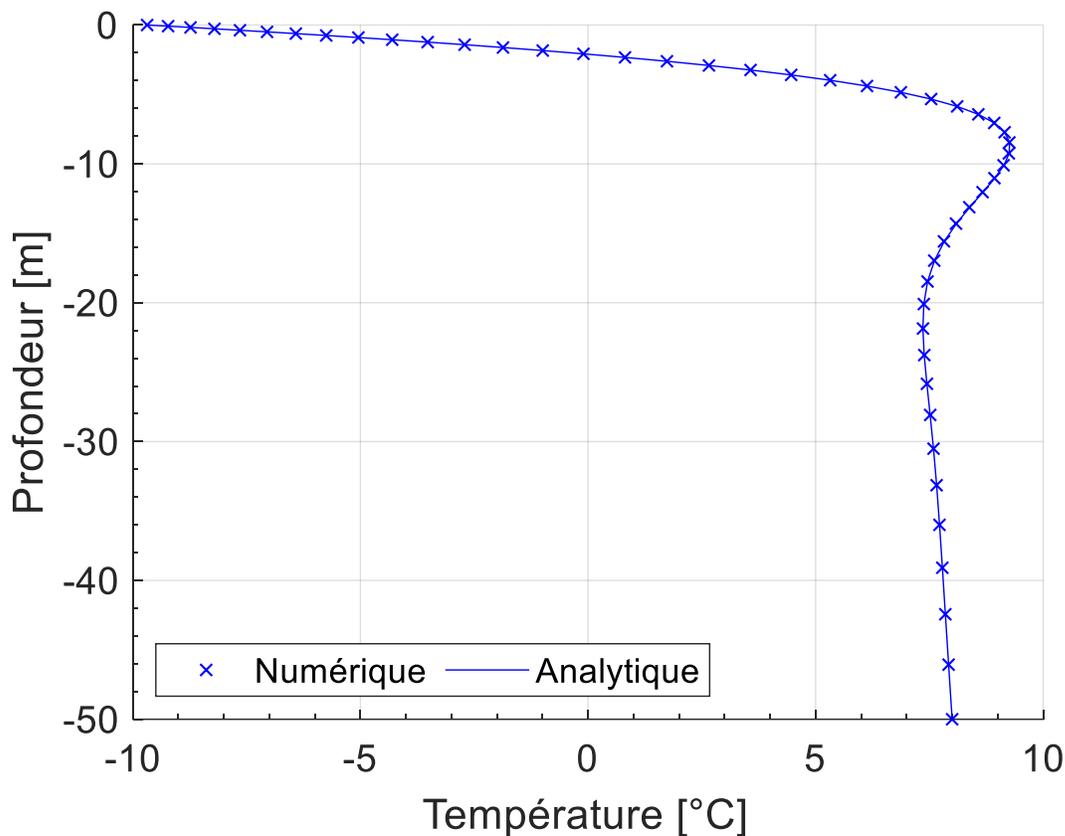


Figure 3.1.7 : Profil de température du sol le premier janvier après 10 ans de températures extérieures sinusoïdales

En utilisant les caractéristiques du Tableau 3.1.2, la Figure 3.1.7 montre un bon accord entre la solution analytique et la méthode numérique (RMSE=0,0044 °C).

3.1.2.3 Augmentation linéaire de la température extérieure

L'augmentation de la température ambiante prévue pour la période de 2081 à 2100 par rapport à la période de 1986 à 2005 tombe entre 2,6 °C et 4,8 °C pour le scénario de changement climatique RCP8.5 (Collins, et al., 2013). Pour ces raisons, il est intéressant d'étudier les effets de ces changements sur le profil de température dans le sol. Dans cette partie, les effets d'une augmentation annuelle de la température extérieure sont pris en compte. Pour commencer, on visualise l'effet d'une augmentation linéaire de la température extérieure ayant la forme :

$$T_{ext} = T_m + Gt \quad 3.1.20$$

Où G est le taux de changement climatique. La solution analytique à cette condition de frontière existe (VanSant, 1980) et est de la forme :

$$\frac{T(x, t) - T(x, 0)}{Gt} = (1 + 2Fo^2(x, t)) \operatorname{erfc}(Fo(x, t)) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} Fo(x, t) e^{-Fo^2(x, t)} \quad 3.1.21$$

Où erfc est la fonction erreur complémentaire et Fo est une fonction de la forme :

$$Fo(x, t) = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad 3.1.22$$

Dans le but de vérifier le modèle numérique avec cette solution analytique, un cas test a été réalisé. Le sol possède les mêmes propriétés figurant dans le Tableau 3.1.2 et une température initiale ayant pour équation :

$$T(x, 0) = T_m + gx \quad 3.1.23$$

De plus, la valeur de G est $G = 0,03$ °C par année.

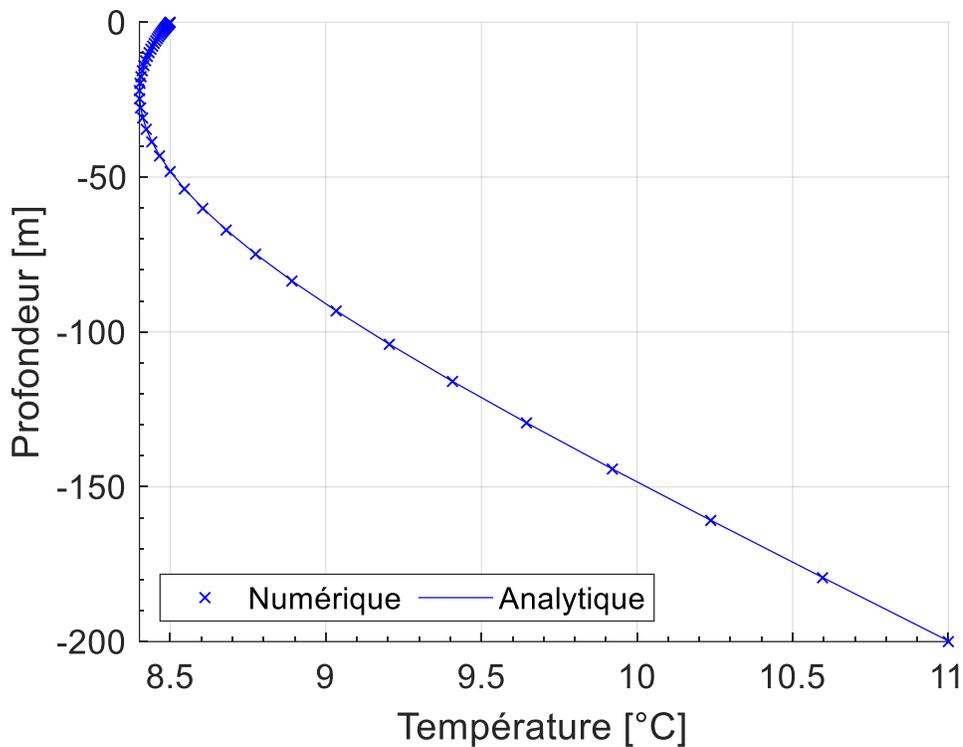


Figure 3.1.8 : Profil de température du sol le premier janvier après 50 ans de température croissante linéairement

La Figure 3.1.8 montre les résultats de cette vérification après 50 ans. On remarque un bon accord entre la solution analytique et la méthode numérique (RMSE = $8,7e-4$ °C) ce qui permet d'utiliser le modèle numérique avec confiance.

3.1.2.4 Ajout d'un terme à la variation sinusoïdale de la température extérieure

En vue des changements de température moyenne de l'air, cette dernière ne peut plus être approximée à une simple sinusoïde. Une façon rudimentaire d'ajouter les effets du changement climatique est d'ajouter à la variation sinusoïdale de la température extérieure un terme qui varie linéairement en fonction du temps comme c'était le cas pour l'équation 3.1.20:

$$T_{ext}(t) = T_m + (T_{max} - T_m) \sin(\omega(t + \phi)) + Gt \quad 3.1.24$$

En utilisant une analogie avec les fonctions de transfert électriques utilisée par Bassols (2013) se référant à un article de Pipes (1957), pour un signal d'entrée (température extérieure) étant la somme des équations 3.1.17 et 3.1.20, la sortie de la fonction de transfert est la somme des sorties en vertu du principe de superposition. Le profil de température dans le sol est alors la somme des équations 3.1.18 et 3.1.21 et a la forme :

$$T(x, t) = T(x, 0) - (T_{max} - T_m) e^{-x\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}} \cos\left(\omega(t - \Phi) - x\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\right) \quad 3.1.25$$

$$+ Gt \left[(1 + 2Fo^2(x, t)) \operatorname{erfc}(Fo(x, t)) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} Fo(x, t) e^{-Fo^2(x, t)} \right]$$

Dans le but de vérifier le modèle numérique avec cette solution analytique, un cas test a été réalisé. Les propriétés du sol sont analogues à celles figurant dans le Tableau 3.1.2, $G = 0,03$ °C/an et le sol possède un profil de température initial décrit par l'équation 3.1.19. Les résultats de ce cas test sont montrés à la Figure 3.1.9 après 50 ans. Cette figure montre un bon accord (RMSE = 0,0023 °C) entre la solution analytique et la méthode numérique renforçant l'utilisation de la méthode numérique dans le cas où une solution analytique n'est pas disponible.

Il est à noter que le développement de l'équation 3.1.25 comme méthode analytique de prédiction de la température du sol avec une température sinusoïdale croissante comme condition limite à la

surface représente une nouvelle contribution car il n'a pas été possible de retracer une telle méthode dans la littérature.

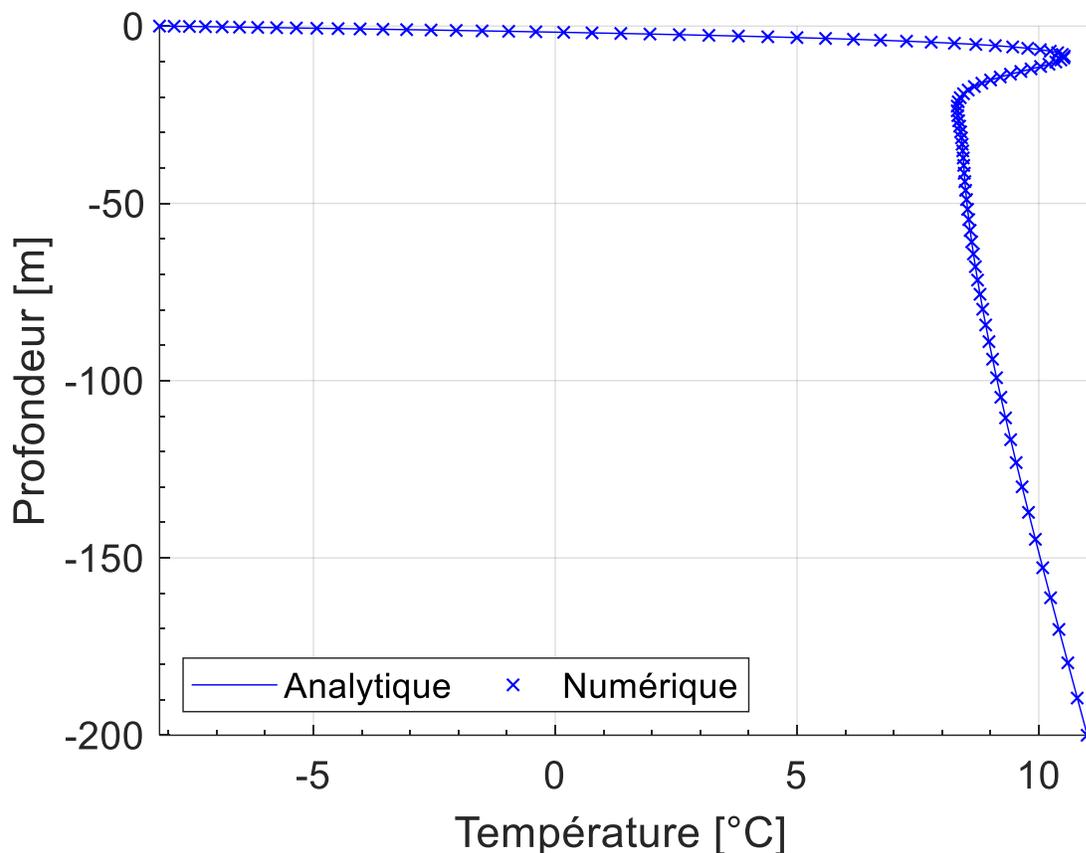


Figure 3.1.9 : Profil de température du sol le premier janvier après 50 ans de température sinusoïdale croissante

3.1.3 Effets du réchauffement et propriétés de sol différentes

La section 3.1.2 a montré la fiabilité du modèle numérique à prédire le profil de température du sol après plusieurs années de simulation pour différentes conditions. Ce modèle est utilisé dans le reste de ce paragraphe pour comparer les différents profils de température du sol possédant différentes propriétés physiques et soumis à différents profils de température extérieure. Pour commencer, une comparaison des profils de température du sol ayant les caractéristiques mentionnées dans le Tableau 3.1.2, soumis à un profil de température extérieur décrit par l'équation 3.1.24 pour un

profil de températures extérieures sans réchauffement (avec $G = 0 \text{ °C/an}$) et pour un profil de températures extérieures avec réchauffement (avec $G = 0,03 \text{ °C/an}$) sont présentés.

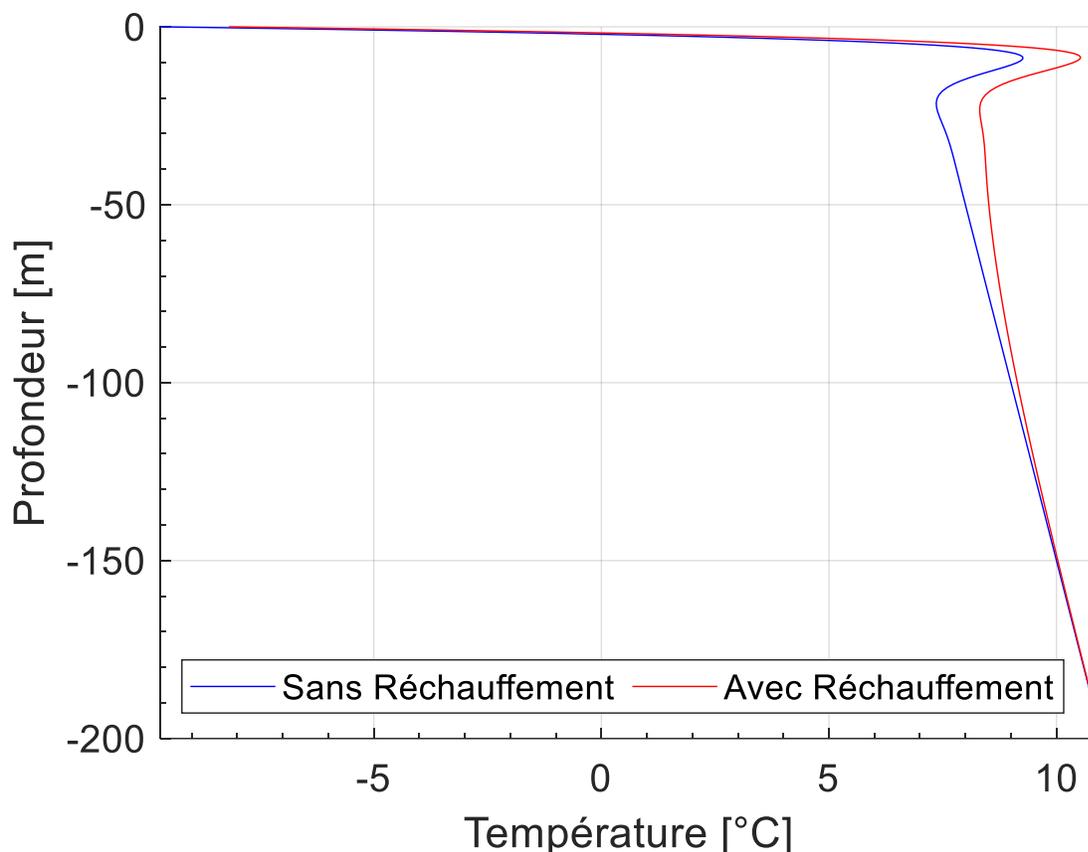


Figure 3.1.10 : Comparaison du profil de température du sol le premier janvier après 50 ans avec et sans changement climatique utilisant le modèle numérique. (Équation 3.1.24 avec $G = 0 \text{ °C/an}$ (bleu) et $G = 0,03 \text{ °C/an}$ (rouge)).

Comme le montre la Figure 3.1.10, une augmentation non négligeable de température est aperçue jusqu'à des profondeurs assez grandes (1 °C à une profondeur de 20 m). Cette disparité de températures peut affecter les prédictions de performance des systèmes à EG et surtout les échangeurs horizontaux qui sont la majorité du temps enfoui à quelques mètres de la surface.

Le modèle numérique permet aussi d'étudier les cônes de variation du sol. Un cône de variation montre la plage de températures que prend une couche du sol tout au long de l'année en fonction de sa profondeur. Pour commencer, la Figure 3.1.11 montre le cône de variation du sol qui a les propriétés décrites dans le Tableau 3.1.2. La courbe bleue montre le profil de température

du sol pendant l'instant le plus froid de l'année tandis que la courbe rouge montre le profil à l'instant le plus chaud. Les courbes noires montrent l'amplitude de la variation de la température d'une couche de sol à une profondeur donnée au cours de l'année. Il est remarquable que les couches supérieures soient soumises aux variations les plus grandes et suivent assez fidèlement la température extérieure contrairement aux couches profondes dont la température reste proche de la température moyenne du sol à ce niveau tout au long de l'année. Comme le concept d'un cône de variation n'est valable que pour une année donnée, une façon d'étudier l'impact du changement climatique sur ces cônes est de prendre des années spécifiques et dessiner le profil de température du sol pendant les instants les plus froids et les plus chauds de cette année.

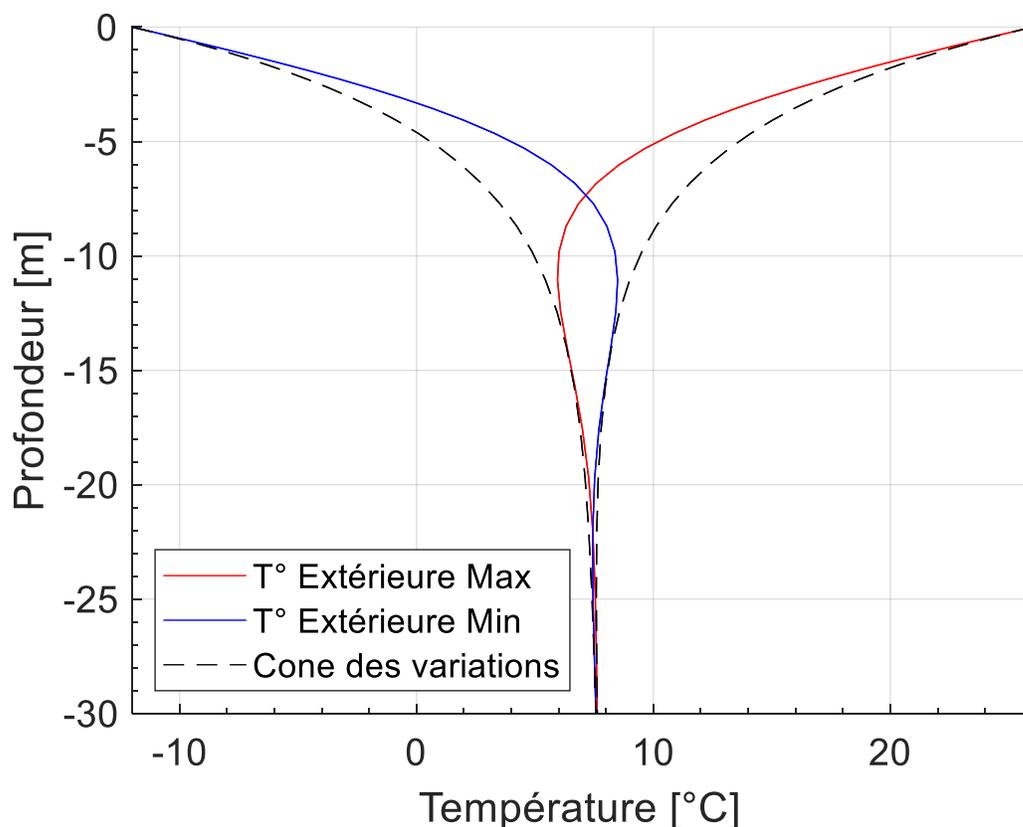


Figure 3.1.11 : Profil de température du sol pendant les extrêmes des températures extérieures et cône de variation de la température du sol

La Figure 3.1.12 montre les différents profils de température dans le sol ayant les caractéristiques décrites dans le Tableau 3.1.2. Un changement climatique $G = 0,03$ °C/an affecte les couches supérieures du sol qui sont décalés de $+1,5$ °C au bout de 50 ans. Cependant, les couches plus

profondes semblent moins changées par ce fait et convergent toujours vers la température moyenne du sol. La profondeur affectée par le changement climatique est proportionnelle à la durée de temps durant laquelle le sol est soumis à ce réchauffement. En effet, la courbe décrivant le profil de température après 25 ans de simulation est décalée d'une façon non négligeable (plus que $0,1\text{ °C}$) de la température moyenne du sol non perturbé jusqu'à une profondeur de 35 mètres tandis qu'après 50 ans, cette profondeur devient 80 mètres.

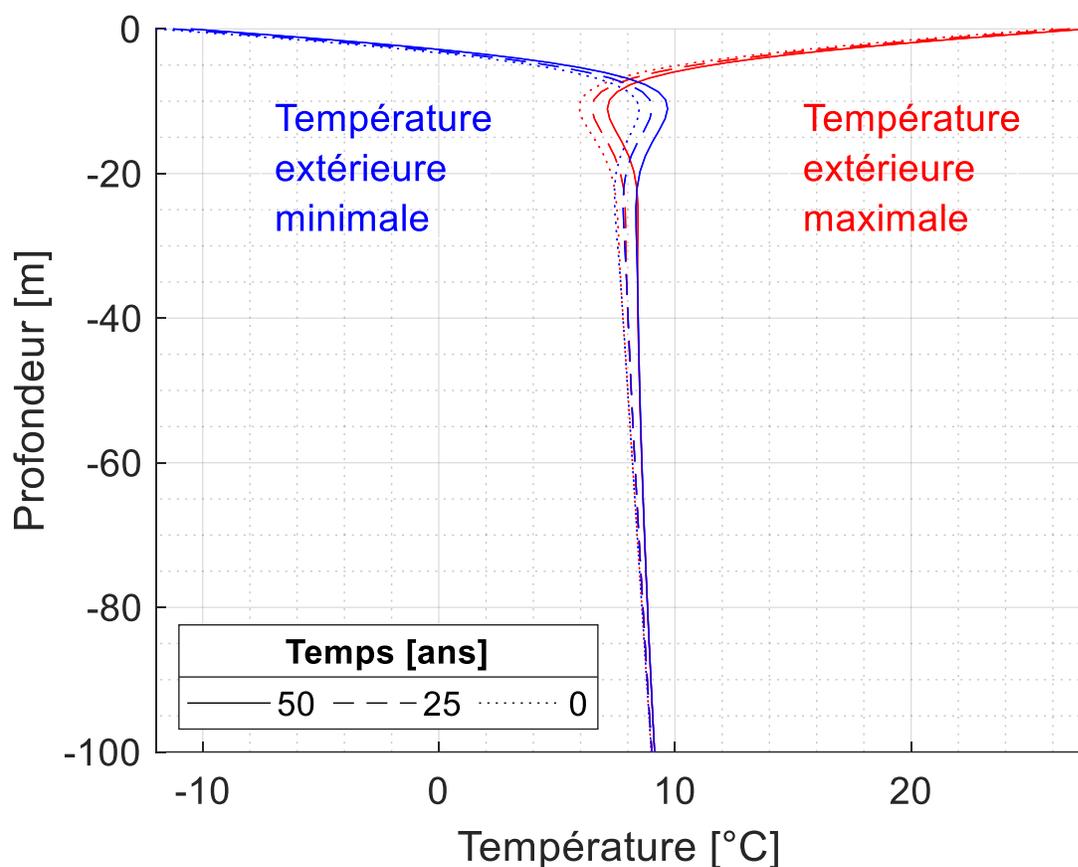


Figure 3.1.12 : Variation de la température du sol en fonction de la profondeur avec taux de changement climatique

Un autre aspect à étudier est l'effet du changement climatique sur le profil de température de plusieurs sols à propriétés physiques différentes. Pour illustrer cela, deux simulations sont faites avec un sol ayant les propriétés du Tableau 3.1.2 mais avec deux valeurs extrêmes de conductivité thermique différentes, l'une à 10 W/m-K et l'autre à $0,1\text{ W/m-K}$. Le taux de réchauffement G est toujours égal à $0,03\text{ °C/an}$. La Figure 3.1.13 montre qu'avec une grande conductivité thermique du

sol, le profil sinusoïdal de la température de surface est présent d'une façon plus claire dans le profil de température du sol. En effet, l'amplitude de la variation semble être plus étalée sur la profondeur du volume de contrôle. De plus, le profil ne rejoint la température d'équilibre du sol que dans des profondeurs avancées. Conséquemment, le gradient de réchauffement à la surface affecte les parties profondes du sol d'une manière plus importante plus la conductivité du sol est grande.

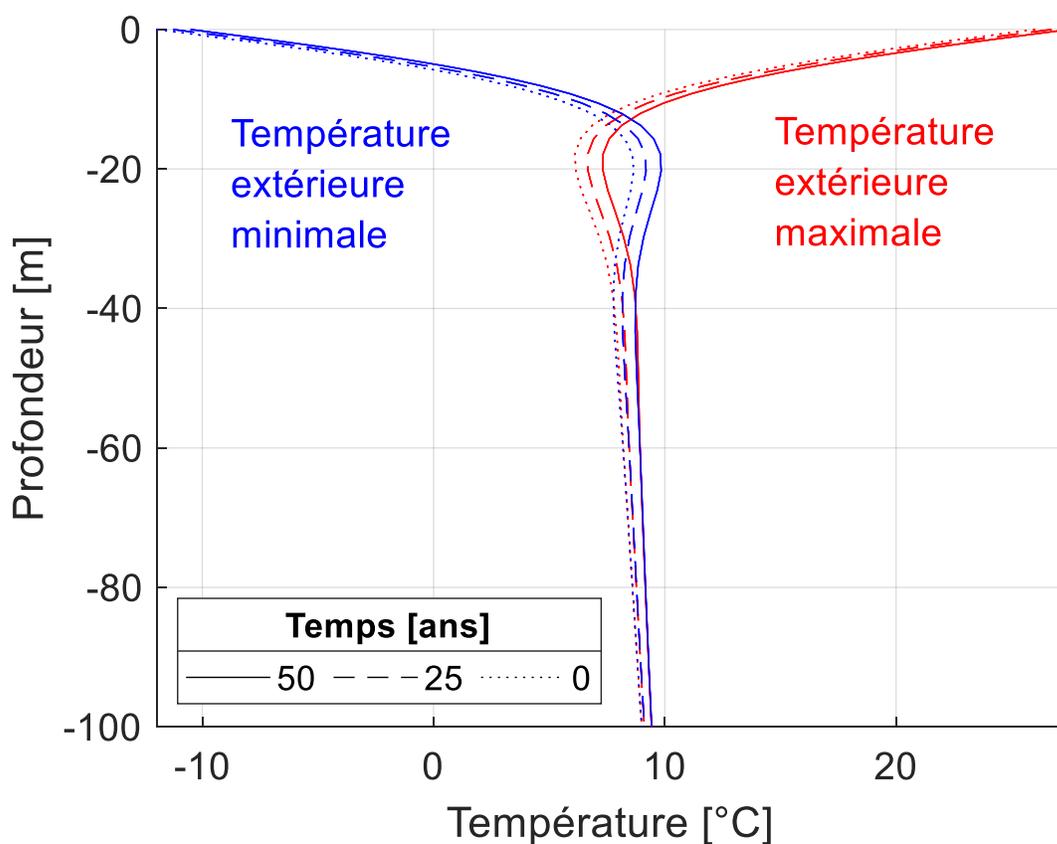


Figure 3.1.13 : Variation de la température du sol en fonction de la profondeur avec taux de changement climatique et une conductivité thermique de 10 W/m-K

La Figure 3.1.14 montre qu'avec une faible conductivité thermique du sol, le profil sinusoïdal de la température de surface n'arrive qu'à pénétrer les couches les plus superficielles du sol. En effet, l'amplitude de la variation semble être concentrée sur la profondeur superficielle du volume de contrôle. De plus, le profil rejoint la température d'équilibre du sol à une vingtaine de mètres et, par suite, le gradient de réchauffement à la surface n'affecte que peu les parties profondes du sol.

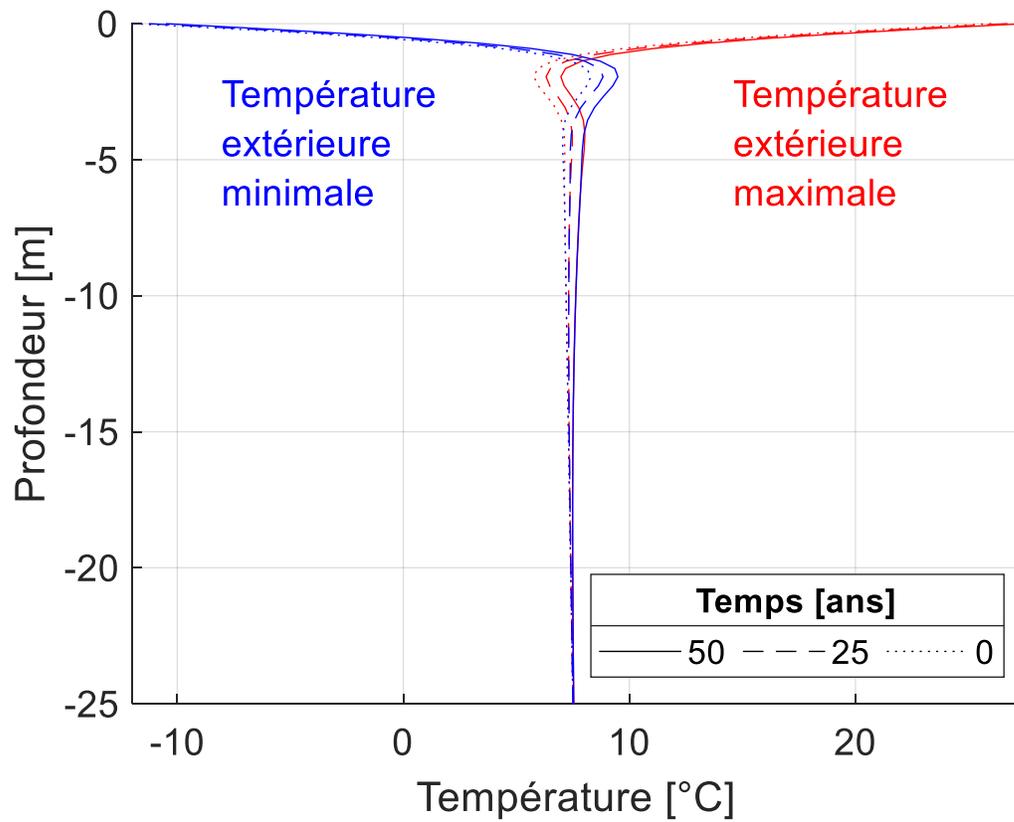


Figure 3.1.14 : Variation de la température du sol en fonction de la profondeur avec taux de changement climatique et une conductivité thermique de 0,1 W/m-K

3.2 Modèle Bidimensionnel

Dans le cas où les flux thermiques dans le sol ne sont pas uniformes suivant une direction orthogonale à l'axe de profondeur X (en introduisant un EG par exemple), on doit se tourner vers une analyse bidimensionnelle. La manière naturelle d'aborder cette tâche est de modéliser le sol et l'EG en coordonnées cylindriques. Cependant, comme cette partie sert de tremplin vers le modèle tridimensionnel cartésien pour un champ d'EG, cette section sera aussi développée en employant une géométrie cartésienne. L'équation gouvernante est donnée par l'équation de la conduction thermique bidimensionnelle transitoire avec source de chaleur :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S \quad 3.2.1$$

Où

y = l'abscisse horizontale [m]

S = taux de génération (absorption) de chaleur dans un volume élémentaire [W/m^3]

Comme pour le cas en une dimension, l'équation 3.2.1 est discrétisée (Patankar, 1980) en :

$$a_P T_P = a_E T_E + a_O T_O + a_N T_N + a_S T_S + b \quad 3.2.2$$

Où, pour rester consistant avec les notations utilisées dans l'équation 3.1.3, la Figure 3.2.1 montre les indices N et S qui réfèrent respectivement aux points à droite et à gauche du point P étudié, et où :

$$a_E = \frac{k\Delta y}{\delta x_e}, \quad a_O = \frac{k\Delta y}{\delta x_o}, \quad a_N = \frac{k\Delta x}{\delta y_n}, \quad a_S = \frac{k\Delta x}{\delta y_s} \quad 3.2.3$$

$$a_P^0 = \frac{\rho C_p \Delta x \Delta y}{\Delta t}, \quad b = S \Delta x \Delta y + a_P^0 T_P^0 \quad 3.2.4$$

$$a_P = a_E + a_O + a_N + a_S + a_P^0 \quad 3.2.5$$

Avec :

δy = Distance entre 2 nœuds dans la dimension de Y.

Δy = Longueur d'un volume de contrôle dans la dimension de Y.

En ce qui concerne les conditions de surface, des versions modifiées des équations 3.1.6, 3.1.7 et 3.1.8 sont adoptées en deux dimensions pour prendre en compte l'échange de chaleur convectif en surface seulement selon la direction y . Ces équations ont la forme :

$$a_P T_P = a_E T_E + a_N T_N + a_S T_S + b \quad 3.2.6$$

$$a_E = \frac{k\Delta y}{\delta x_e}, \quad a_N = \frac{k\Delta x}{2\delta y_n}, \quad a_S = \frac{k\Delta x}{2\delta y_s} \quad 3.2.7$$

$$a_P^0 = \frac{\rho C_p \Delta x \Delta y}{2\Delta t}, \quad b = hT_{ext}\Delta y + a_P^0 T_P^0 + S \frac{\Delta x}{2} \Delta y, \quad 3.2.8$$

$$a_P = a_S + a_N + a_E + a_P^0 + h\Delta y$$

En ce qui concerne la condition à la frontière inférieure, la température du sol est assignée comme constante pour jouer le rôle de source de chaleur dans le cas où un gradient géothermique existe. Pour conserver l'approximation du sol à un milieu semi-infini, les segments limites du volume de contrôle perpendiculaires à l'axe Y sont considérés comme indifférents aux perturbations de température dans la direction Y et donc, obéissent aux équations décrites dans le Modèle Unidimensionnel.

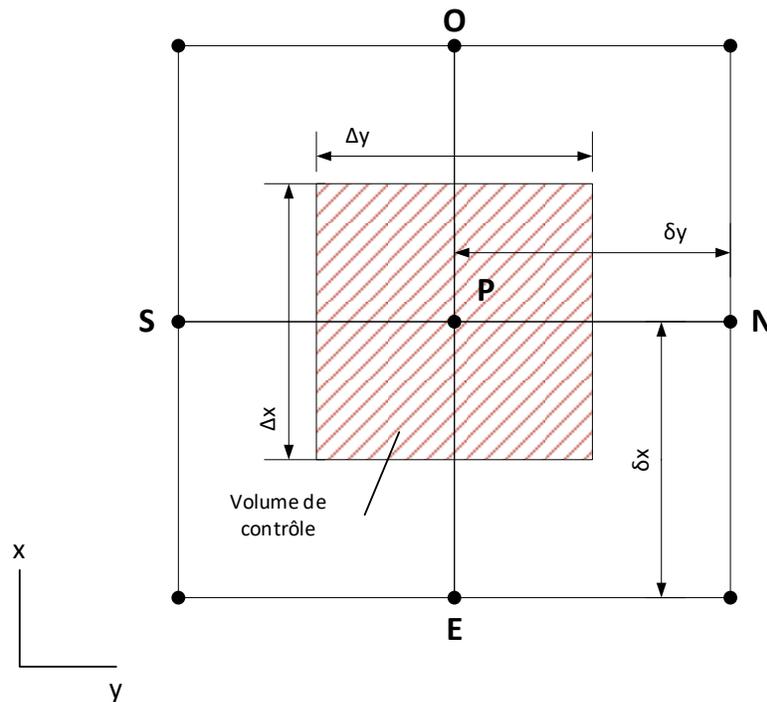


Figure 3.2.1 : Nomenclature utilisée pour le maillage du modèle bi-dimensionnel

3.2.1 Insertion d'un EG dans le sol

Comme preuve de concept de la discrétisation de l'équation gouvernante en deux dimensions, un EG possédant les caractéristiques spécifiées dans le Tableau 3.2.1 est inséré dans le sol. Les conditions extérieures de température sinusoïdales décrites par l'équation 3.1.17 et les conditions du Tableau 3.1.2 sont utilisées. Cet EG est idéalisé par une tranche de sol sans épaisseur introduite dans le plan formé par X et Y et dans laquelle la chaleur est retirée à un taux de $S \cdot d_{puits} \cdot H$ [W/m] où d_{puits} et H désigne respectivement le diamètre et la longueur de l'EG. Comme le montre la Figure 3.2.3, un maillage de type exponentiel est utilisé comme dans le cas de l'étude en une dimension pour raffiner les prises de températures autour de la surface où les gradients de température sont les plus grands. De plus, pour pouvoir bien mesurer les effets thermiques de l'EG sur le profil de température du sol, un maillage de type exponentiel est également utilisé autour de ce dernier. Pour les nœuds dans la direction verticale suivant x, leur profondeur est décrite par l'équation 3.1.15. Cependant, pour avoir des volumes de contrôle contenant uniquement des termes de source (donc les volumes de contrôle contenant l'EG) il est important d'avoir deux nœuds de part et d'autre de chacune des limites supérieures et inférieures de l'EG de façon que cette limite soit à mi-chemin de ces deux nœuds. Par exemple, si l'EG est de 140 m et il est enfoui à 2 m de profondeur, 4 des valeurs viables pour la profondeur des nœuds sont 1 et 3 m (1 m entre le nœud et la limite de chaque côté) pour la limite supérieure et 135 et 145 m (5 m entre le nœud et la limite de chaque côté) pour la limite inférieure. Ces valeurs sont déterminées automatiquement en conjonction avec l'équation 3.1.15. En ce qui concerne le maillage dans la direction horizontale y, l'abscisse d'un nœud de rang n est décrite par les équations :

$$y_{N+n+1} = e^{\frac{\ln\left(\frac{W}{2}+1-d\right)+1}{N-1}n} - 1 + d \quad 3.2.9$$

$$y_{N-n} = - \left(e^{\frac{\ln\left(\frac{W}{2}+1-d\right)}{N-1}n} - 1 + d \right) \quad 3.2.10$$

En addition d'une colonne de nœud possédant une abscisse passant par le centre de l'EG. Les abscisses dupliquées sont supprimées. Les variables sont les mêmes que dans l'équation 3.1.15 donc le maillage horizontal possède N+1 nœuds de plus que le maillage vertical. De plus n est une variable entière allant de 0 à N, W et d désignent respectivement la largeur du sol simulé et la

largeur de l'EG. De cette façon, et comme pour le cas des ordonnées en profondeur, deux nœuds de part et d'autre de l'EG permettent d'avoir des volumes de contrôle contenant uniquement l'EG. Par exemple, pour un EG de 0,12 m de diamètre à une abscisse horizontale y égale à 0, les abscisses des nœuds à proximité immédiate de l'EG utilisées pour définir les volumes de contrôle sont 0, 0,12 et -0,12 m. Cette distribution est visualisable dans la Figure 3.2.2.

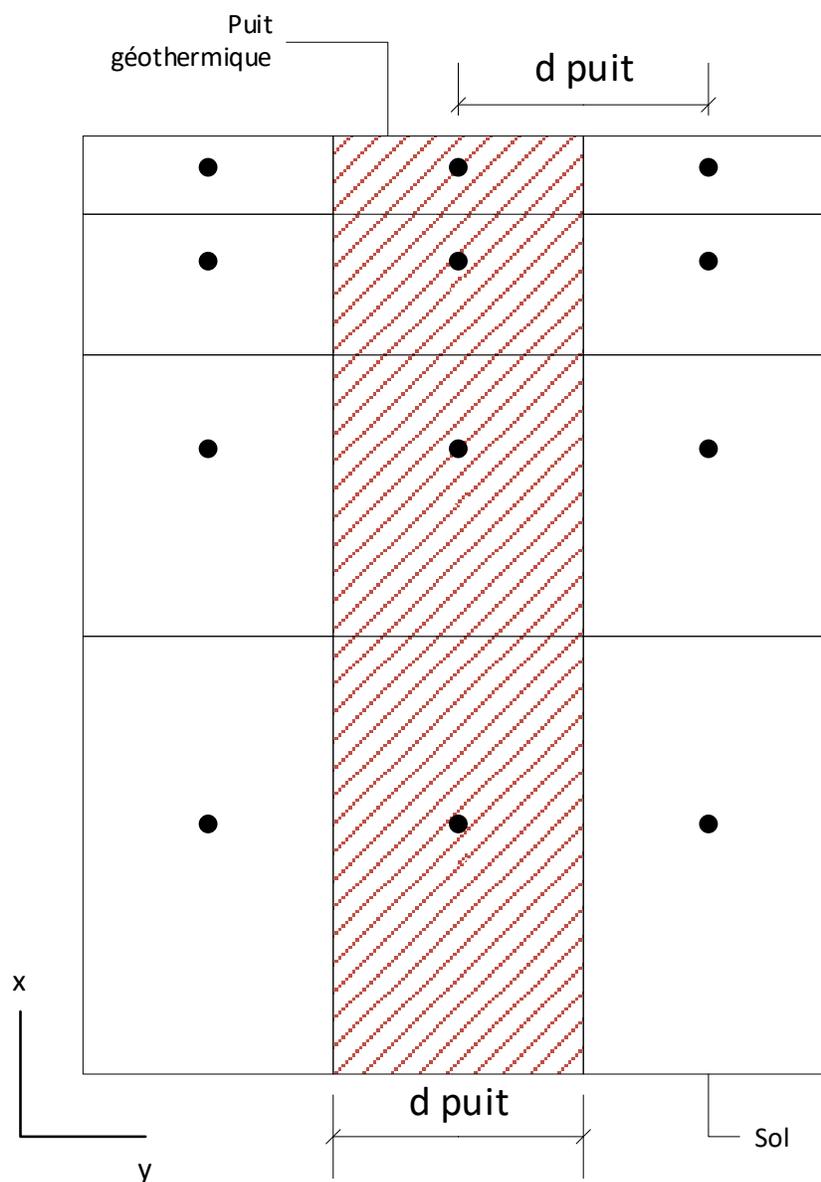


Figure 3.2.2 : Maillage à la proximité immédiate du puits

Un maillage du puits est fait de façon à ce que les volumes de contrôle contenant une partie du puits ne contiennent que le puits et non pas le sol. Donc, suivant la direction y , la largeur du volume

de contrôle contenant le puits est égal au diamètre du puits et, par suite, c'est dans ce volume de contrôle où la chaleur sera puisée. Une illustration de ces volumes de contrôle est montrée par la partie hachurée de la Figure 3.2.2 où on puise $q_{inj} \cdot x_i \cdot y_i$ W/m de chaleur avec x_i et y_i étant les dimensions du volume de contrôle d'indice i . La Figure 3.2.3 illustre un EG (noir) enfoui dans le sol dont leurs propriétés sont décrites dans le Tableau 3.2.1. Les points rouges représentent les nœuds du maillage exponentiel du sol et de l'EG. Le maillage non-régulier assure une grande densité de nœuds à la surface du sol ainsi qu'à la proximité de l'EG, les deux interfaces qui sont soumises au gradient thermique le plus important. Les différents volumes de contrôle sont formés par les lignes horizontales et verticales (non illustrées dans la Figure 3.2.3) passant à mi-chemin entre les points comme illustré dans la Figure 3.2.2.

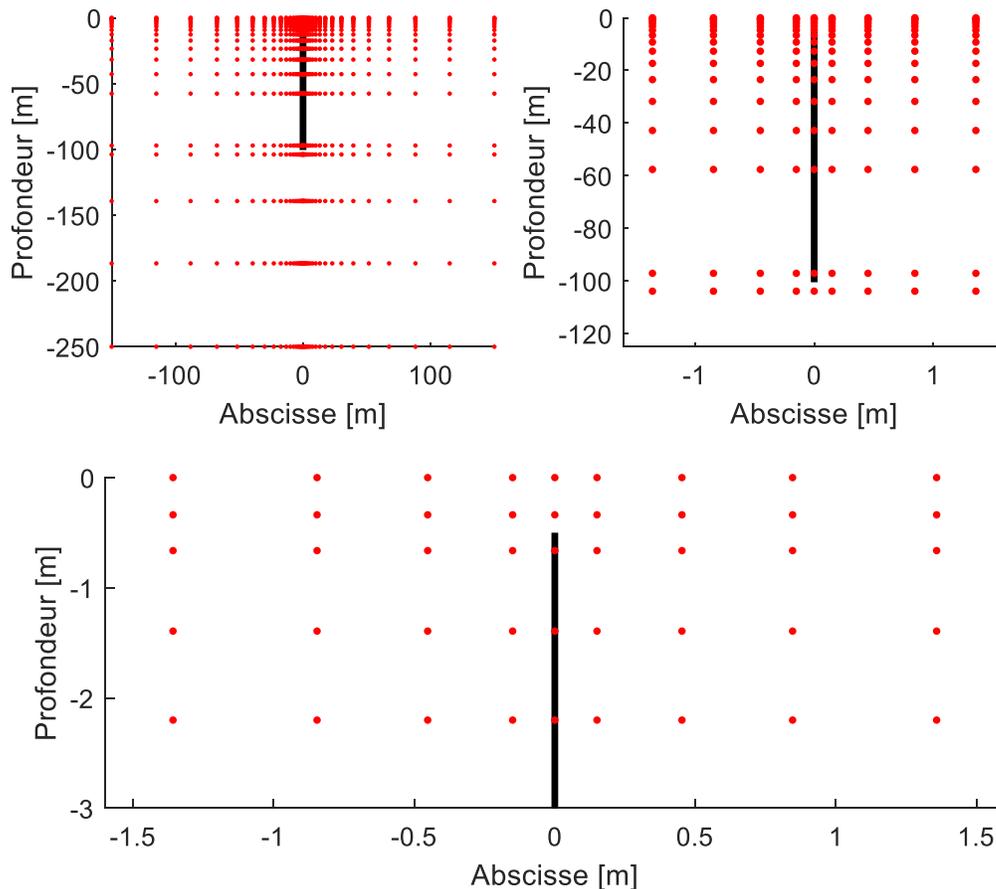


Figure 3.2.3 : Nœuds (rouge) créés par le maillage exponentiel autour de l'EG (noir)

Tableau 3.2.1 : Spécificités du puits géothermique, du climat et du maillage utilisé

Paramètre	Valeur
Longueur verticale du puits (H) [m]	100
Abscisse du puits [m]	0
Diamètre du puits (d_{puits}) [m]	0,15
Profondeur d'enfouissement (D) [m]	0,5
Taux d'absorption de chaleur (q_{inj}) [W/m^3]	-10
Nombre de nœuds utilisés [-]	820
Conductivité thermique du sol (k) [$W/m-K$]	3,25
Capacité thermique du sol (C_p) [$J/kg-K$]	1000
Densité du sol (ρ) [kg/m^3]	1500
Diffusivité thermique du sol (α) [m^2/s]	2,17e-6
Température moyenne (T_m) [$^{\circ}C$]	7,9
Gradient géothermique (g) [$^{\circ}C/m$]	0,02
Température extérieure maximale (T_{max}) [$^{\circ}C$]	23,2
Période climatique ($\frac{\omega}{2\pi}$) [h]	8760
Déphasage (ϕ) [h]	541
h [W/m^2-K]	30

Initialement, le sol, ayant les propriétés décrites dans le Tableau 3.2.1, possède un profil de température uniforme en fonction de son abscisse, pouvant être décrit par l'équation 3.1.19, et illustré par la Figure 3.2.4. Par la suite, le volume de contrôle en surface est soumis à une température sinusoïdale décrite par l'équation 3.1.17. Il est à noter que l'énergie transmise par les bords d'abscisses -150 et 150 est supposée nulle. En effet, le volume de contrôle est dimensionné d'une façon à ce que l'influence du puits reste contenue entre les abscisses -150 et 150 en prenant la constante C de l'équation 3.1.16 égale à 5.74 et par suite, aucune quantité de chaleur significative n'est échangée à partir de ces interfaces.

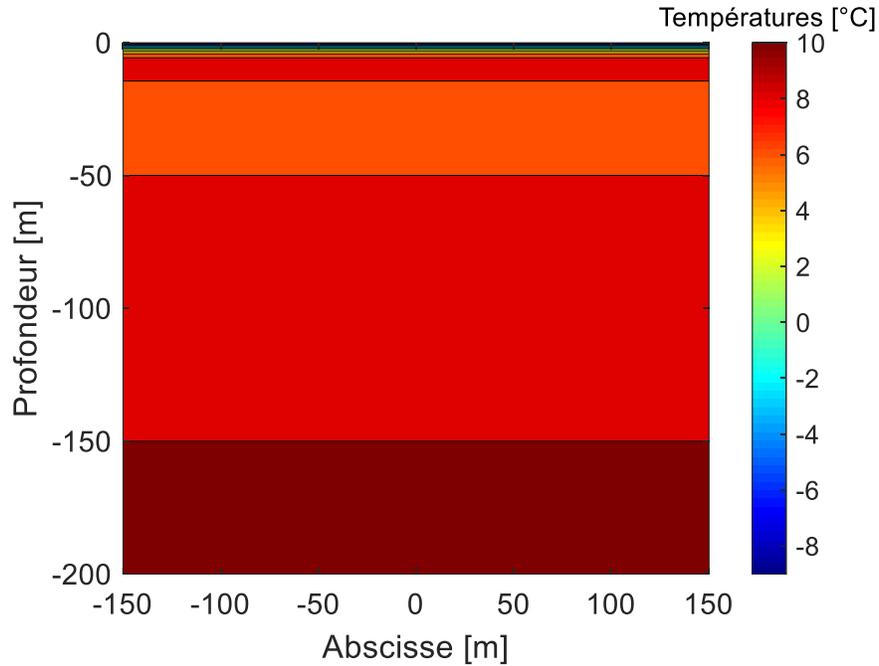


Figure 3.2.4 : Profil de température initial dans le sol le premier janvier

La discrétisation résulte en la création d'un système à 820 inconnues (820 nœuds). Pour résoudre ce système, le solveur de MATLAB choisit la meilleure façon d'approcher le problème. Comme montré dans la Figure 3.2.5, la matrice en question est une matrice creuse et donc le solveur utilise un algorithme pour les matrices creuses (MathWorks, 2022) et choisi d'utiliser un solveur de type LU.

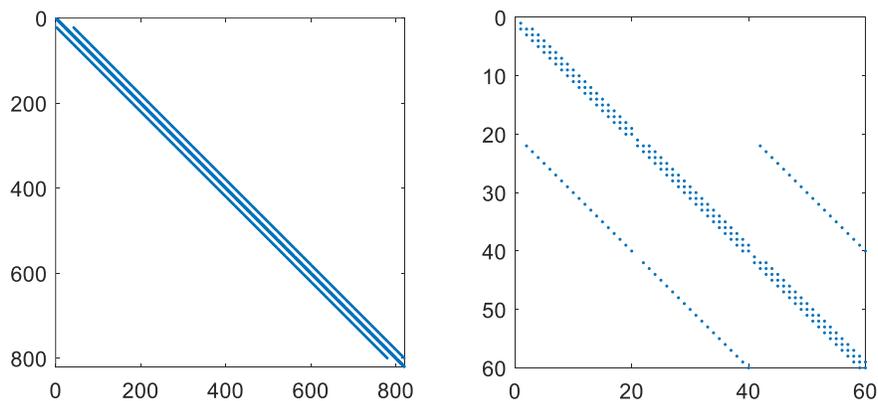


Figure 3.2.5 : Non-Zéros de la matrice de 820x820 éléments à résoudre (gauche) et un aperçu plus proche de sa structure (droite)

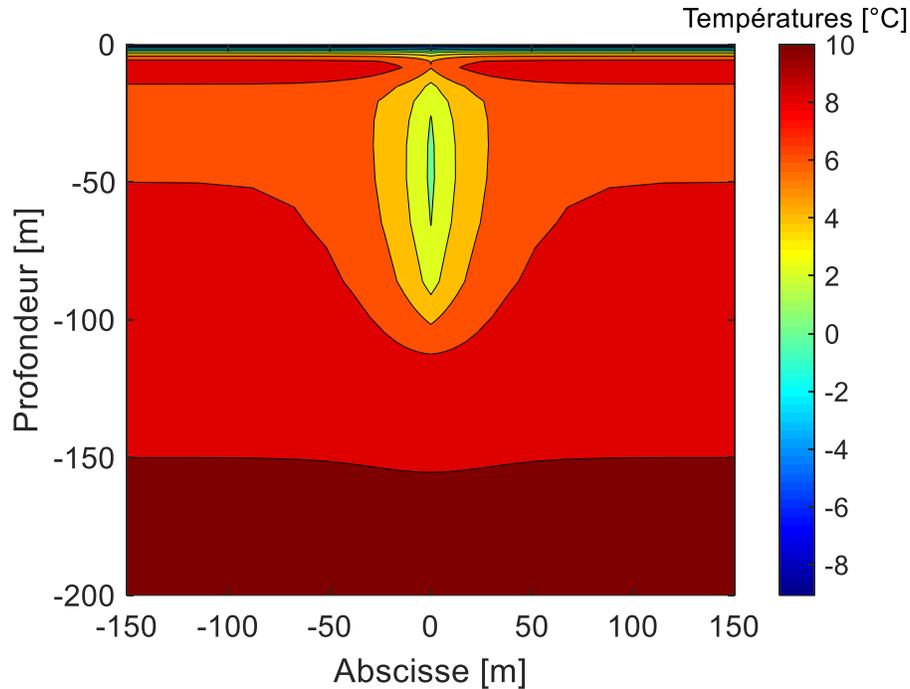


Figure 3.2.6 : Profil de la température du sol en janvier après 10 ans de puisage de chaleur

Les résultats de la simulation de la Figure 3.2.6 sont obtenus avec un maillage de 820 (20x41) nœuds et avec un pas de temps de 20 heures. La Figure 3.2.6 montre que la température du sol autour de l'EG n'est pas uniforme tout au long de ce dernier. Cela est dû d'une part au gradient géothermique et d'autre part aux variations de la température à la surface du sol à cause du climat.

3.2.2 Bilan d'énergie bidimensionnel

Pour vérifier l'allure du profil de températures de la Figure 3.2.6 ainsi que la validité de la méthode numérique utilisée, un bilan d'énergie sur le volume de contrôle total de sol est calculé. Ce bilan a la forme :

$$E_{stock} = E_{conv} + E_{geo} + E_{inj} \quad 3.2.11$$

Où :

E_{stock} = Energie stockée dans le volume de contrôle [J/m]

E_{conv} = Energie transmise au volume de contrôle par convection à la surface [J/m]

E_{geo} = Energie transmise au volume de contrôle par le flux de chaleur géothermique [J/m]

E_{inj} = Energie échangé entre le puits et le volume de contrôle [J/m]

D'une manière générale pour une masse linéique m constante et pour un milieu uniforme :

$$dE_{elementaire} = mC_p dT \quad 3.2.12$$

Pour un élément de contrôle de volume linéique $dV = dx dy$ constant, l'énergie stockée, initialement nulle, pendant une durée t est :

$$\int_0^t dE_{elementaire} = \rho C_p dx dy \int_0^t dT \quad 3.2.13$$

Alors :

$$E_{elementaire} = \rho C_p dx dy (T_t - T_0) \quad 3.2.14$$

Donc l'énergie stockée dans tout le volume du sol est :

$$\begin{aligned} E_{stock} &= \int_{y_{min}}^{y_{max}} \int_{x_{min}}^{x_{max}} E_{elementaire}(x, y) \quad 3.2.15 \\ &= \int_{y_{min}}^{y_{max}} \int_{x_{min}}^{x_{max}} \rho C_p [T_t(x, y) - T_0(x, y)] dx dy \end{aligned}$$

En utilisant la discrétisation illustrée dans la Figure 3.2.1, la double intégrale est transformée en une double somme de la forme :

$$E_{stock} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n E_{elementaire,i,j} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \rho C_p (T_{t,i,j} - T_{0,i,j}) \Delta x_i \Delta y_j \quad 3.2.16$$

Où i représente l'indice de la profondeur du nœud et j l'indice de l'abscisse du nœud dans la matrice de maillage de dimensions n fois m .

En ce qui concerne E_{conv} , pour une surface linéique constante dy :

$$\frac{dE_{transmise}}{dt} = h \left(T_{ext}(t) - T_{surface}(t) \right) dy \quad 3.2.17$$

Alors, l'énergie totale transmise au sol par convection est :

$$\begin{aligned} E_{conv} &= \int_{y_{min}}^{y_{max}} \int_{t=0}^{t=t_{finale}} dE_{transmise} \\ &= \int_{y_{min}}^{y_{max}} \int_{t=0}^{t=t_{finale}} h \left(T_{ext}(t, y) - T_{surface}(t, y) \right) dy dt \end{aligned} \quad 3.2.18$$

Après une discrétisation, l'équation précédente devient :

$$E_{conv} = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n h (T_{ext,i,j} - T_{surface,i,j}) \Delta y_i \right) \Delta t \quad 3.2.19$$

Où i est l'indice de l'abscisse du nœud dans le vecteur de maillage de n éléments et j l'indice du pas de temps dans le vecteur de discrétisation temporelle contenant m pas.

D'une façon analogue, E_{geo} transférée au sol à travers une surface linéique constante dy est :

$$\frac{dE_{transmise}}{dt} = q_{geo} dy \quad 3.2.20$$

Donc, comme le flux géothermique est constant en temps et en espace, l'énergie géothermique totale transmise au sol est :

$$E_{geo} = \int_{y_{min}}^{y_{max}} \int_{t_0}^{t_{finale}} dE_{transmise} = q_{geo} \int_{y_{min}}^{y_{max}} \int_{t_0}^{t_{finale}} dy dt \quad 3.2.21$$

Cette équation peut être trivialement résolue sans recours à une discrétisation en faisant :

$$E_{geo} = q_{geo} (y_{max} - y_{min}) (t_{finale} - t_0) \quad 3.2.22$$

Pour E_{inj} , l'équation quantifiant l'énergie échangée, à travers une surface linéique constante dx , entre le puits et le sol est :

$$\frac{dE_{transmise}}{dt} = d_{puits} q_{inj} dx \quad 3.2.23$$

Par suite, avec un taux d'absorption constant, l'échange énergétique total entre le puits et le sol est :

$$E_{inj} = \int_{-D-H}^{-D} \int_{t_0}^{t_{finale}} dE_{transmise} = q_{inj} d_{puits} \int_{-D-H}^{-D} \int_{t_0}^{t_{finale}} dx dt \quad 3.2.24$$

Cette équation peut aussi être facilement résolue sans recours à une discrétisation en faisant :

$$E_{inj} = q_{inj} d_{puits} (-D - (-D - H))(t_{finale} - t_0) \quad 3.2.25$$

Par convention, une énergie positive (négative) sera une énergie entrante au (sortante du) sol.

Tableau 3.2.2 : Bilan énergétique du sol après 10 ans de puisage thermique

E_{conv} [GJ/m]	E_{geo} [GJ/m]	E_{inj} [GJ/m]	E_{stock} [GJ/m]	Bilan [GJ/m]
2,917	6,154	-47,336	-38,206	-0,06 (0,13 %)

Un bilan d'énergie est effectué pour le cas de la Figure 3.2.6 et le Tableau 3.2.2 montre que le bilan énergétique du sol après 10 ans de puisage est bien conservé donnant un degré de confiance additionnel aux résultats de la Figure 3.2.6. La partie majoritaire de l'erreur dans le bilan vient du profil initial de températures du sol qui est proche, mais pas exactement égal au profil de température du sol en état permanent en addition de la précision de la discrétisation spatiale et temporelle. Le Tableau 3.2.2 indique que sur 10 ans, 47,336 GJ/m ont été collecté par l'EG. De cette quantité, 38,206 GJ/m provient de l'énergie interne qui existe déjà dans le sol, 2,917 GJ/m provient de l'énergie échangée avec la surface du sol, et 6,154 GJ/m provient du flux de chaleur géothermique. Le Tableau 3.2.2 exprime les énergies extraites en GJ/m car, comme l'étude est effectuée en 2 dimensions, elles sont des énergies linéiques en fonction de la direction orthogonale au plan formé par les axes X et Y. En outre, pour pouvoir exister en 2 dimensions, l'EG est assimilé à une plaque rectangulaire infinie d'épaisseur d_{puits} dans la direction orthogonale au plan formé par les axes X et Y. Donc cette étude bidimensionnelle examine réalistiquement la nature qualitative et non pas la nature quantitative du comportement du sol autour de l'EG. Donc, pour pouvoir loyalement décrire la réponse thermique du sol autour de plusieurs EG, une étude en trois dimensions est requise.

3.3 Modèle tridimensionnel

Dans le cas où les flux thermiques dans le sol ne sont pas uniformes suivant une direction orthogonale au plan formé par les axes X et Y, (en introduisant un troisième EG non coplanaire par exemple) une équation, prenant en compte cette non-uniformité doit être utilisée. L'équation gouvernante est donnée par l'équation de la conduction thermique tridimensionnelle transitoire avec source de chaleur. Cette équation prend la forme :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad 3.3.1$$

Où

z = l'ordonnée [m]

Comme en transfert en deux dimensions, cette équation peut être discrétisée (Patankar, 1980) en :

$$a_p T_p = a_E T_E + a_O T_O + a_N T_N + a_S T_S + a_T T_T + a_B T_B + b \quad 3.3.2$$

Où, pour rester consistant avec les notations utilisées dans l'équation 3.2.2, les indices N et S réfèrent respectivement aux points à droite et à gauche du point P étudié, les indices T et B réfèrent respectivement aux points au-dessus et au-dessous du plan formé par les vecteurs OE et SN, et où :

$$a_E = \frac{k\Delta y\Delta z}{\delta x_e}, \quad a_O = \frac{k\Delta y\Delta z}{\delta x_o}, \quad a_N = \frac{k\Delta x\Delta z}{\delta y_n}, \quad a_S = \frac{k\Delta x\Delta z}{\delta y_s}, \quad 3.3.3$$

$$a_T = \frac{k\Delta x\Delta y}{\delta z_t}, \quad a_B = \frac{k\Delta x\Delta y}{\delta z_b}$$

$$a_P^0 = \frac{\rho C_p \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t}, \quad b = S \Delta x \Delta y \Delta z + a_P^0 T_P^0 \quad 3.3.4$$

$$a_P = a_E + a_O + a_N + a_S + a_T + a_B + a_P^0 \quad 3.3.5$$

En ce qui concerne les conditions de surface, des versions modifiées des équations 3.1.73.1.8 sont adoptées en trois dimensions et ont la forme :

$$a_E = \frac{k\Delta y\Delta z}{\delta x_e}, \quad a_N = \frac{k\Delta x\Delta y}{2\delta y_n}, \quad a_S = \frac{k\Delta x\Delta y}{2\delta y_s}, \quad a_T = \frac{k\Delta x\Delta y}{2\delta z_t}, \quad 3.3.6$$

$$a_B = \frac{k\Delta x\Delta y}{2\delta z_b}$$

$$a_P^0 = \frac{\rho C_p \Delta x \Delta y \Delta z}{2\Delta t}, \quad b = h T_{ext} \Delta y \Delta z + a_P^0 T_P^0 + S \frac{\Delta x}{2} \Delta y \Delta z, \quad 3.3.7$$

$$a_P = a_S + a_N + a_E + a_P^0 + h \Delta y \Delta z$$

Ces indices sont identifiables dans la Figure 3.3.1. En ce qui concerne la condition à la frontière inférieure, la température du sol est assignée comme constante pour jouer le rôle de source de chaleur dans le cas où un gradient géothermique existe. Pour les quatre plans limites du volume de contrôle qui sont parallèles à l'axe X, ils sont considérés comme indifférents aux perturbations de température provenant de toute direction autre que celle-ci et donc, obéissent aux équations décrites dans le Modèle Unidimensionnel.

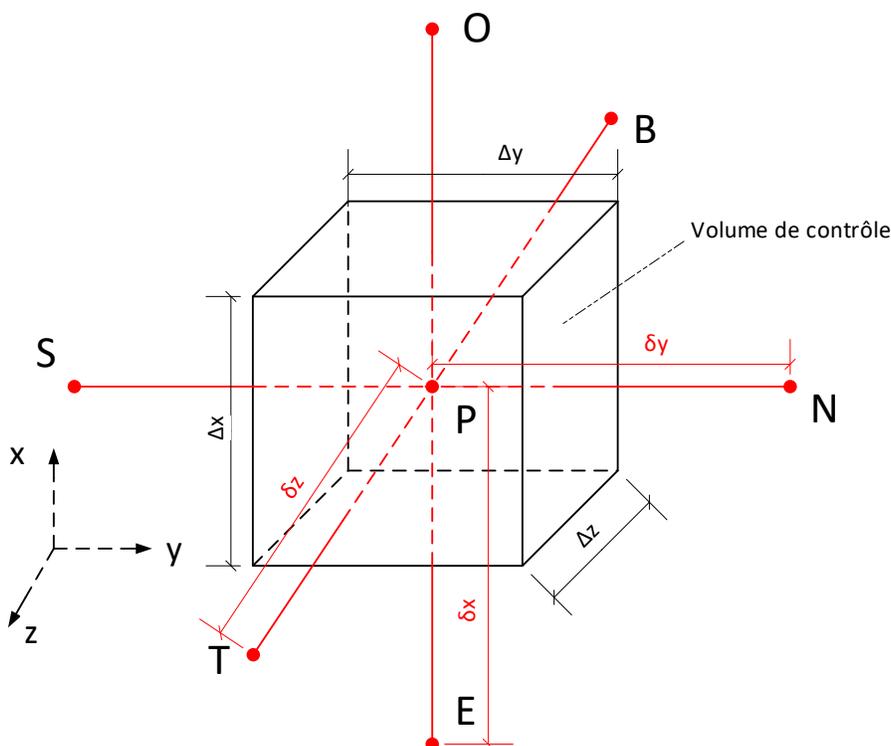


Figure 3.3.1 : Nomenclature d'un nœud pour le modèle numérique tri-dimensionnel

3.3.1 Insertion de trois EG dans le sol

Comme preuve de concept de la discrétisation de l'équation gouvernante en trois dimensions, trois EG possédants les caractéristiques spécifiées dans le Tableau 3.3.1 sont insérés dans le sol. Comme le montre la Figure 3.3.3, un maillage de type exponentiel au niveau de la surface est utilisé comme dans le cas de l'étude en deux dimensions pour raffiner les prises de températures autour de la surface où les gradients de température sont les plus grands. De plus, comme le montre la Figure 3.3.2, pour pouvoir bien mesurer les effets des EG les uns sur les autres ainsi que sur le profil de température du sol, un maillage de type exponentiel est également utilisé autour de ces derniers. Le maillage est effectué en utilisant la méthode expliquée dans le paragraphe 3.2.1 dans les dimensions x , y et z pour chaque EG inséré.

Tableau 3.3.1 : Paramètres de simulation

Paramètre	Valeur
Longueur verticale du puits (H) [m]	140
Abscisses et ordonnées des puits [m]	[0, 1] ; [-0,866, -0,5] ; [0,866, -0,5]
Diamètre des puits (d_{puits}) [m]	0,12
Profondeur d'enfouissement (D) [m]	2
Taux d'absorption de chaleur (q_{inj}) [W/m]	-7,7
Nombre de nœuds utilisés [-]	7 x 26 x 39
Conductivité thermique du sol (k) [W/m-K]	1,11
Capacité thermique du sol (C_p) [J/kg-K]	1000
Densité du sol (ρ) [kg/m ³]	1000
Diffusivité thermique du sol (α) [m ² /s]	1,11e-6
Température initiale du sol et de l'air (T_m) [°C]	14
h [W/m ² -K]	30e30
Durée simulée [ans]	10
Pas de temps Δt [h]	20

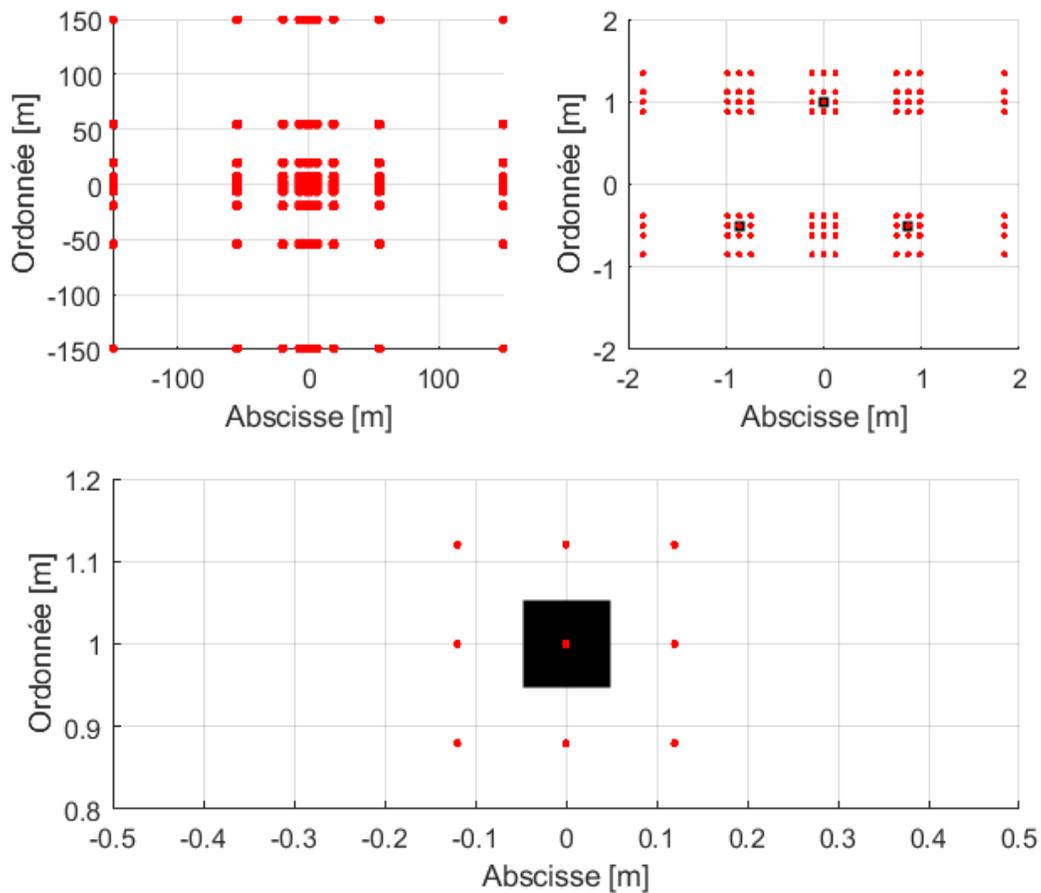


Figure 3.3.2 : Configuration de nœuds (rouge) et d'EG (noir) proposée (vue d'en haut)

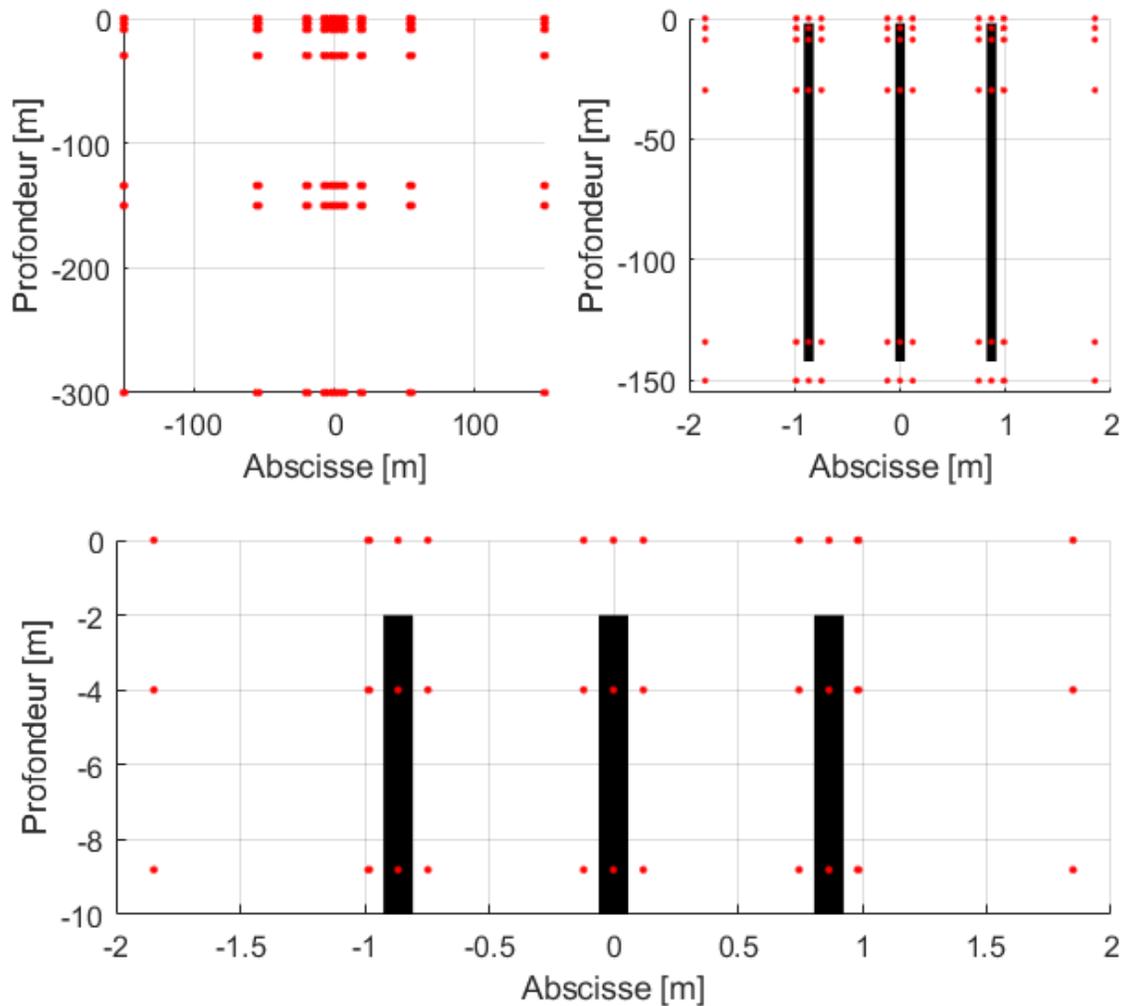


Figure 3.3.3: Configuration de nœuds (rouge) et d'EG (noir) proposée (vue de côté)

Il est important de mentionner que dans cette configuration, et comme le montre la Figure 3.3.2, les EG sont approximés à des parallélépipèdes et non pas des cylindres. En effet, l'utilisation de coordonnées cartésiennes à la place de coordonnées cylindriques facilite l'implémentation des champs d'EG et, de façon naturelle, la géométrie d'échangeur la plus convenable à modéliser suite à la mise en place d'un maillage rectangulaire est une géométrie rectangulaire. La discrétisation des équations mène à la création d'un système à 7098 inconnues ($7 \times 26 \times 39$ nœuds). Pour résoudre ce système, le solveur de MATLAB choisit la meilleure façon d'approcher le problème. Comme montré dans la Figure 3.3.4, la matrice en question est une matrice creuse et par suite le solveur

utilise un algorithme pour les matrices creuse (MathWorks, 2022) et choisi d'utiliser un solveur de type LU.

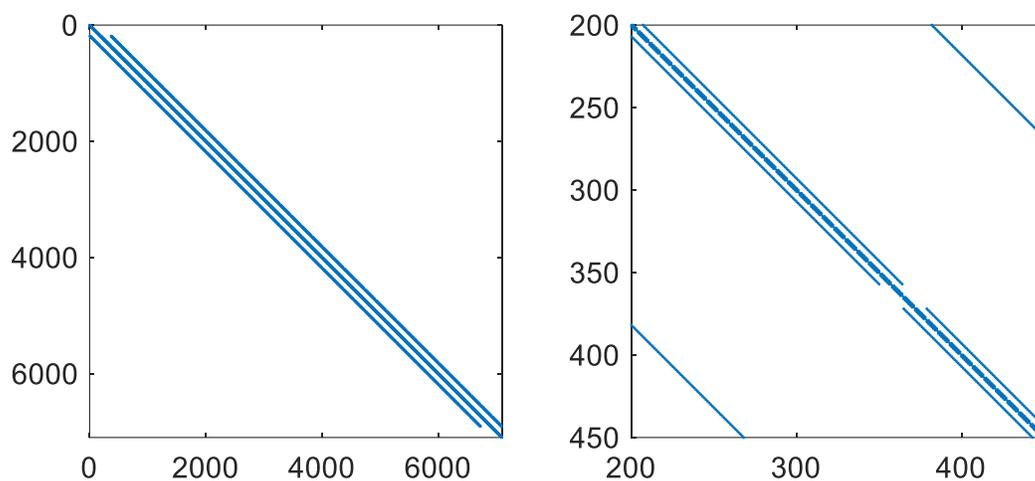


Figure 3.3.4 : Non-Zéros de la matrice de 7098x7098 éléments à résoudre (gauche) et un aperçu plus proche de sa structure (droite)

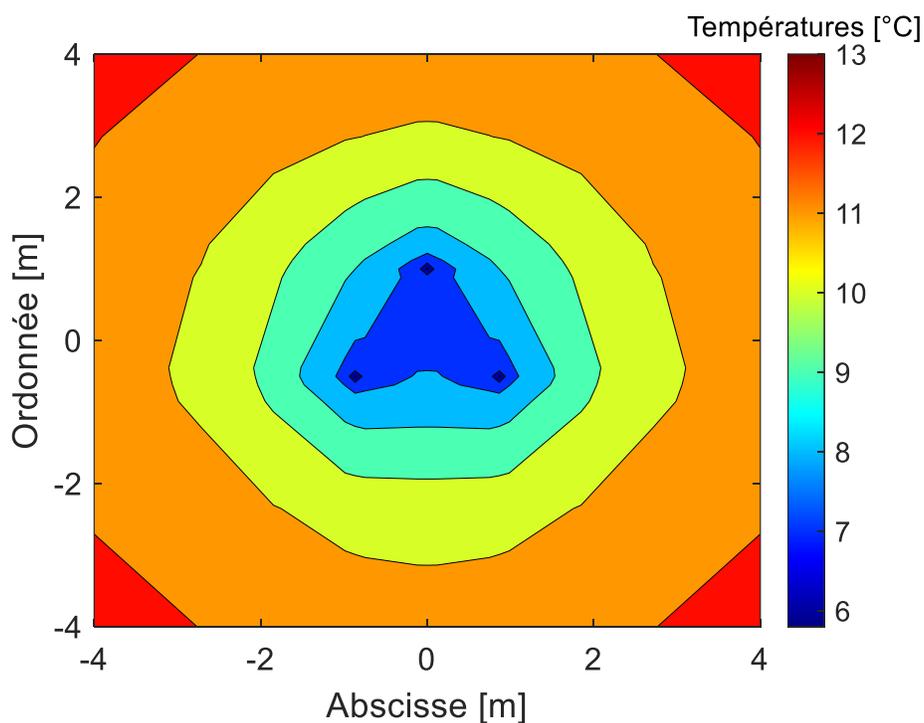


Figure 3.3.5 : Vue d'en haut du profil de température du sol à 4 mètres de profondeur et après 10 ans de puisage de chaleur

La Figure 3.3.5 montre le profil de température du sol vu d'en haut à 4 mètres de profondeur après 10 ans de puisage de chaleur. Ce plan coupe l'intérieur des 3 EG et il est possible de localiser exactement l'emplacement des EG qui sont plus froids que leur entourage. De plus, l'interférence thermique entre les 3 EG crée une zone relativement froide entre les EG. Cette partie du sol est 7 °C plus froide que le sol non perturbé et s'étend sur une surface de 1 m². En s'éloignant des EG, les isothermes perdent leur forme triangulaire pour prendre une forme circulaire.

3.3.2 Vérification des résultats

En addition d'un bilan énergétique similaire à celui étudié dans le cas bidimensionnel, une comparaison des valeurs de la « g-fonction » (Eskilson, 1987) de cette configuration de champs d'EG est réalisée. Les valeurs comparées sont celles extraites de la méthode numérique utilisée et celles calculées avec le code de Cimmino (2018).

3.3.2.1 Bilan d'énergie tridimensionnel

Dans cette configuration initiale, les seules sources d'énergie disponibles au champ à puiser sont l'énergie stockée dans le sol et l'énergie introduite au sol par convection. Le bilan d'énergie sur le volume de contrôle a alors la forme :

$$E_{stock} = E_{conv} + E_{inj} \quad 3.3.8$$

Où :

E_{stock} = Energie stockée dans le volume de contrôle [GJ]

E_{conv} = Energie transmise au volume de contrôle par la convection à la surface [GJ]

E_{inj} = Energie échangé entre le champ d'EG et le volume de contrôle [GJ]

Il est à noter que l'énergie transmise par les bords d'abscisses et d'ordonnées limites ne figure pas dans ce bilan. En effet, le volume de contrôle est dimensionné d'une façon à ce que l'influence du champ reste contenue entre ces coordonnées limites en prenant la constante C de l'équation 3.1.16 égale à 7,91 et par suite, aucune quantité de chaleur significative n'est échangée à partir de ces interfaces. Comme le flux de chaleur géothermique n'existe pas dans cette configuration, aucun échange de chaleur n'est effectué à travers la limite inférieure du volume de contrôle. D'une manière générale, pour une masse m constante et pour un milieu uniforme :

$$dE_{\text{elementaire}} = mC_p dT \quad 3.3.9$$

Pour un élément de contrôle de volume $dV = dx dy dz$ constant, l'énergie stockée, initialement nulle, pendant une durée t est :

$$\int_0^t dE_{\text{elementaire}} = \rho C_p dx dy dz \int_0^t dT \quad 3.3.10$$

Alors,

$$E_{\text{elementaire}} = \rho C_p dx dy dz (T_t - T_0) \quad 3.3.11$$

Donc l'énergie stockée dans tout le volume du sol est :

$$\begin{aligned} E_{\text{stock}} &= \int_{z_i}^{z_f} \int_{y_i}^{y_f} \int_{x_i}^{x_f} E_{\text{elementaire}}(x, y, z) \\ &= \int_{z_i}^{z_f} \int_{y_i}^{y_f} \int_{x_i}^{x_f} \rho C_p [T_t(x, y, z) - T_0(x, y, z)] dx dy dz \end{aligned} \quad 3.3.12$$

Avec les indices i et f référant respectivement aux coordonnées initiales et finales du volume de contrôle. En utilisant la discrétisation illustrée dans la Figure 3.3.1, la triple intégrale est transformée en une triple somme de la forme :

$$E_{\text{stock}} = \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n E_{\text{elementaire},i,j,k} = \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \rho C_p (T_{t,i,j,k} - T_{0,i,j,k}) \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k \quad 3.3.13$$

Où j représente l'indice de l'abscisse du nœud, k l'indice sont ordonnée et i l'indice de la profondeur du nœud dans la matrice de maillage de dimensions n fois m fois s . En ce qui concerne E_{conv} , pour une surface constante $dy dz$:

$$\frac{dE_{\text{transmise}}}{dt} = h (T_{\text{ext}}(t) - T_{\text{surface}}(t)) dy dz \quad 3.3.14$$

Ou bien

$$P_{transmise} = \left(\sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^m h (T_{ext,i,j,k} - T_{surface,i,j,k}) \Delta y_i \Delta z_k \right) \quad 3.3.15$$

Alors, l'énergie totale transmise au sol par convection est :

$$\begin{aligned} E_{conv} &= \int_{z_i}^{z_f} \int_{y_i}^{y_f} \int_{t_i}^{t_f} dE_{transmise} \\ &= \int_{z_i}^{z_f} \int_{y_i}^{y_f} \int_{t_i}^{t_f} h (T_{ext}(t, y, z) - T_{surface}(t, y, z)) dy dz dt \end{aligned} \quad 3.3.16$$

Après une discrétisation, l'équation précédente devient :

$$E_{conv} = \sum_{l=1}^p \left(\sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^n h (T_{ext,i,j,k} - T_{surface,i,j,k}) \Delta y_j \Delta z_k \right) \Delta t_l \quad 3.3.17$$

Où j est l'indice de l'abscisse du nœud dans le vecteur de maillage de n éléments, k est l'indice de l'ordonnée du nœud dans le vecteur de maillage de s éléments et l l'indice du pas de temps dans le vecteur de discrétisation temporelle contenant p pas.

Pour E_{inj} , l'équation quantifiant l'énergie échangée, à travers une surface linéique constante dx , entre un EG ayant des côtés rectangulaires et le sol est :

$$\frac{dE_{transmise}}{dt} = d_{puit}^2 q_{inj} dx \quad 3.3.18$$

Par suite, l'échange énergétique total entre un EG et le sol est :

$$E_{inj} = \int_{-D-H}^{-D} \int_{t_i}^{t_{finale}} dE_{transmise} = q_{inj} d_{puit}^2 \int_{-D-H}^{-D} \int_{t_i}^{t_{finale}} dx dt \quad 3.3.19$$

Cette équation peut être résolue sans recours à une discrétisation. Par convention, une énergie positive (négative) est une énergie entrante au (sortante du) sol.

Tableau 3.3.2 : Bilan énergétique avec différents maillages temporels et spatiaux

Maillage	Pas de temps [h]	Temps Simulé [ans]	E_{conv} [GJ]	E_{inj} [GJ]	E_{stock} [GJ]	Bilan [GJ]
7x26x39	20	10	95,8	-1019,9	-909,2	-14,8 (1,46 %)
9x34x51	2000	9,1324	85,2	-931,4	-840,1	-6,1 (0,65 %)

Le Tableau 3.3.2 montre les résultats calculés et met en avant l'importance de la finesse du maillage. En effet un maillage plus fin permet de réduire considérablement l'erreur sur le bilan d'énergie au détriment d'un temps de calcul largement plus grand. En effet, dans le Tableau 3.3.2, pour un nombre de nœuds 2 fois plus grand (15606 contre 7098) il a fallu augmenter le pas de temps de 100 fois (2000 h contre 20 h) pour aboutir au même temps de calcul. Cela s'avère intéressant pour des conditions d'extraction et de climat constantes mais inutilisable pour faire des simulations possédant la granularité horaire des besoins d'un bâtiment.

3.3.2.2 Comparaison avec une « g-fonction »

Une méthode répandue pour calculer la température au bord des EG est l'utilisation d'un facteur adimensionnel de réponse thermique à un échelon de charge appelé « g-fonction » (Eskilson, 1987). Selon ce concept, la variation de la température au bord de l'EG, $T_{q,b}$, peut être exprimée comme :

$$T_{q,b} = -q_l R_q(t) \quad 3.3.20$$

Où q_l est la charge thermique imposée sur l'EG (W/m) et R_q (m-K/W) la résistance thermique pour un pas de temps donné. Cette résistance thermique peut s'écrire de la forme :

$$R_q(t) = \frac{1}{2\pi k} g\left(\frac{t}{t_s}, \frac{r_b}{H}, \frac{D}{H}\right) \quad \text{avec } t_s = \frac{H^2}{9\alpha} \quad 3.3.21$$

Avec t_s étant le temps caractéristique de l'EG. Dans un autre document, Eskilson (1987) montre que ce nombre adimensionnel g peut aussi être calculé pour des champs d'EG. Il devient par suite dépendant des coordonnées des différents EG. La puissance de cette méthode est de dissocier les calculs des propriétés du sol et du taux d'échange thermique comme les « g-fonctions » ne sont dépendantes que de la configuration du champ de EG et de leurs géométries. Beaucoup de

méthodes ont été développées pour calculer ces « g-fonctions » et celle à laquelle la méthode numérique de ce mémoire est comparée est contenue dans la librairie à source ouverte de python (« pygfunction ») développée par Cimmino (2018).

Tableau 3.3.3 : Caractéristiques du domaine de comparaison

Paramètre	Valeur
Longueur verticale du puits (H) [m]	140
Diamètre des puits (d_{puits}) [m]	0,12
Profondeur d'enfouissement (D) [m]	2
Taux d'absorption de chaleur (q_{inj}) [W/m]	-7,7
Nombre de nœuds utilisés [-]	10 x 21 x 21
Conductivité thermique du sol (k) [W/m-K]	1,11
Capacité thermique du sol (C_p) [J/kg-K]	1000
Densité du sol (ρ) [kg/m ³]	1000
Diffusivité thermique du sol (α) [m ² /s]	1,11e-6
Température initiale du sol et de l'air (T_g) [°C]	14
h [W/m ² -K]	30e30
Durée simulée [ans]	10
Pas de temps Δt [h]	200

En ce qui concerne la méthode numérique développée dans ce mémoire, elle est utilisée pour calculer les « g-fonctions » en faisant :

$$g(t) = \frac{T_b(t) - T_g}{q_{inj}} 2\pi k \quad 3.3.22$$

Où $T_b(t)$ représente la température de bord de l'EG. Dans le modèle numérique, cette température est calculée discrètement sur le volume de contrôle :

$$T_b(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^s \beta \Delta x_i T_{i,j,k,t}}{H} \quad 3.3.23$$

Où β est une variable booléenne égale à 1 si un nœud d'indice i , j et k appartient à l'EG et égale à 0 sinon.

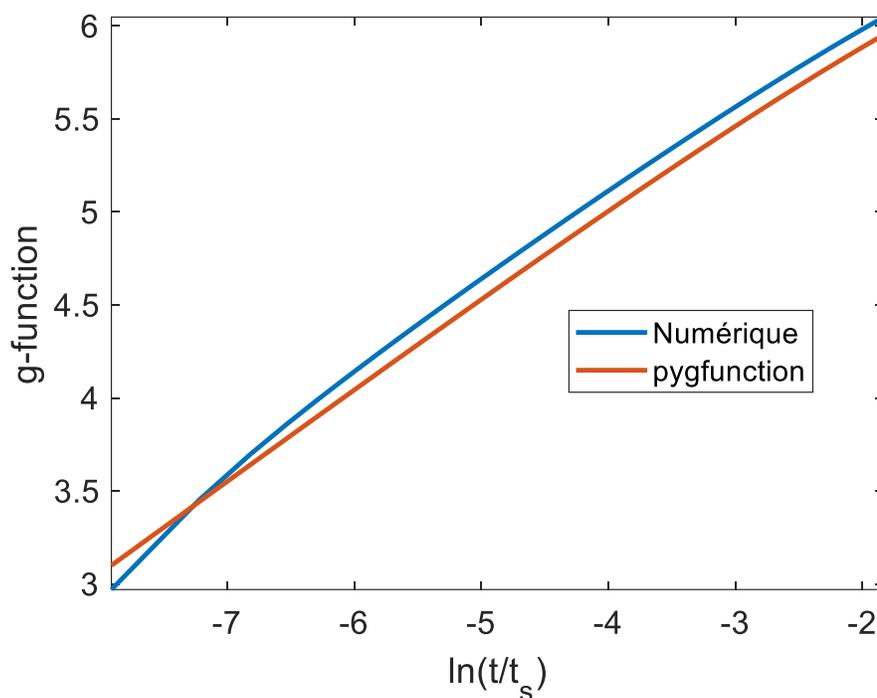


Figure 3.3.6 : Comparaison entre pygfunction et la méthode numérique pour le calcul des "g-functions"

La Figure 3.3.6 montre la différence entre les deux méthodes utilisées. Pour les premiers pas de temps, pygfunction donne des valeurs de « g-function » plus grandes que la méthode numérique. De plus, pour les longues durées, un écart qui tend à devenir constant et égal à 0,1 entre les deux approches se manifeste. Une hypothèse expliquant cet écart constant est la différence entre les géométries des deux EG simulés : l'un est un cylindre et l'autre est un prisme rectangulaire qui possèdent tous deux un diamètre et un côté de même longueur. Ainsi dans l'approche utilisant une « g-function », l'EG est modélisé par une section circulaire de diamètre d , alors que dans l'approche numérique l'EG a une section carrée de côté aussi égal à d à cause de la géométrie cartésienne. Une autre hypothèse serait les différentes conditions de frontière utilisées par les deux modèles. Une étude plus approfondie est requise pour comparer de plus près les différences et les similarités entre les deux méthodes.

3.4 Résumé du Chapitre 3

Ce chapitre décrit l'implémentation, le fonctionnement et la validation d'un modèle numérique du sol. Un modèle unidimensionnel est d'abord implémenté pour mesurer l'effet de

différentes conditions en surface, différentes propriétés thermiques du sol et différents gradients géothermiques sur le profil de température du sol non perturbé. Le modèle numérique réussit à synthétiser des résultats similaires aux approches analytiques développées dans la littérature pour la prédiction du profil de température du sol. L'avantage du modèle numérique est la possibilité de facilement affecter la surface du sol par des conditions météorologiques réelles et de créer plusieurs partitions dans le sol possédant différentes propriétés thermiques.

Pour essayer de mesurer l'effet d'un EG sur la température du sol qui l'entoure, un modèle numérique bidimensionnel est implémenté. En vue de la nature bidimensionnelle du modèle numérique, toutes les énergies échangées sont des énergies linéiques (GJ/m) en fonction de la direction orthogonale au plan formé par les axes X et Y. En outre, pour pouvoir exister en 2 dimensions, l'EG est assimilé à une plaque rectangulaire possédant une épaisseur infinie dans la direction orthogonale au plan formé par les axes X et Y. Donc cette étude bidimensionnelle examine réalistiquement la nature qualitative et non pas la nature quantitative du comportement du sol autour de l'EG.

Pour pouvoir adéquatement décrire la réponse thermique du sol autour d'un ou plusieurs EG, un modèle numérique tridimensionnel est développé. La réponse thermique du sol soumis à l'extraction thermique de trois EG est mesurée. Pour vérifier la validité du modèle, un bilan énergétique est effectué sur ce dernier. Ce bilan est sensible à la complexité du maillage du sol et il s'améliore plus le maillage est fin mais au détriment d'un temps de calcul largement plus grand. Le modèle numérique est aussi utilisé pour générer des « g-fonctions » avec une précision relativement bonne.

CHAPITRE 4 L'EFFET DU FLUX GÉOTHERMIQUE SUR LES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

Les EG sont utilisés pour collecter ou rejeter la chaleur du sol. La Figure 4.1.1 montre une représentation schématique d'un tel EG. Comme déjà mentionné, la performance de ces EG est affectée par les conditions du sol et de l'atmosphère qui les entoure. Le modèle numérique développé permet de mesurer l'effet de ces paramètres d'une façon indépendante. Ce chapitre aborde les effets du flux géothermique.

La température du sol non perturbé varie sur toute la longueur de l'EG. En général, on suppose que cette température varie de façon linéaire, comme l'indique la Figure 4.1.1. La pente de cette variation est le gradient géothermique causé par le flux de chaleur géothermique de la terre. Le flux de chaleur géothermique provient de la chaleur interne de la Terre qui émane de nombreuses sources telles que la désintégration d'éléments radioactifs et la chaleur résiduelle d'accrétion planétaire. Il est estimé que l'énergie dissipée par unité de masse de la Terre est de l'ordre de $7,38 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$, dont 80 % sont attribués à la désintégration des isotopes radioactifs présents dans la lithosphère (Turcotte & Schubert, 2002). Cela se traduit par un flux de chaleur géothermique moyen de $101 \pm 2,2 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ et $65 \pm 1,6 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ pour les océans et les continents respectivement, avec des valeurs allant de $806,4 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ dans les formations de la croûte océanique du Quaternaire à des valeurs de $49,4 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ dans les croûtes océaniques du Jurassique tardif (Pollack & Hurter, 1993). Un flux de chaleur géothermique de $65 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ conduit à un gradient géothermique de $65 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ pour un sol dont la conductivité thermique est constante et égale à $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$.

Il est courant de supposer que les températures du sol et de l'air utilisées pour évaluer les performances des EG sont égales à la température du sol prévalant à mi-hauteur (T_g sur la Figure 4.1.1). L'un des objectifs de ce chapitre est de réexaminer cette hypothèse. Le second objectif est de quantifier la quantité d'énergie provenant du flux thermique terrestre qui est réellement utilisée par l'EG.

4.1 Vérification de l'échange de chaleur en surface

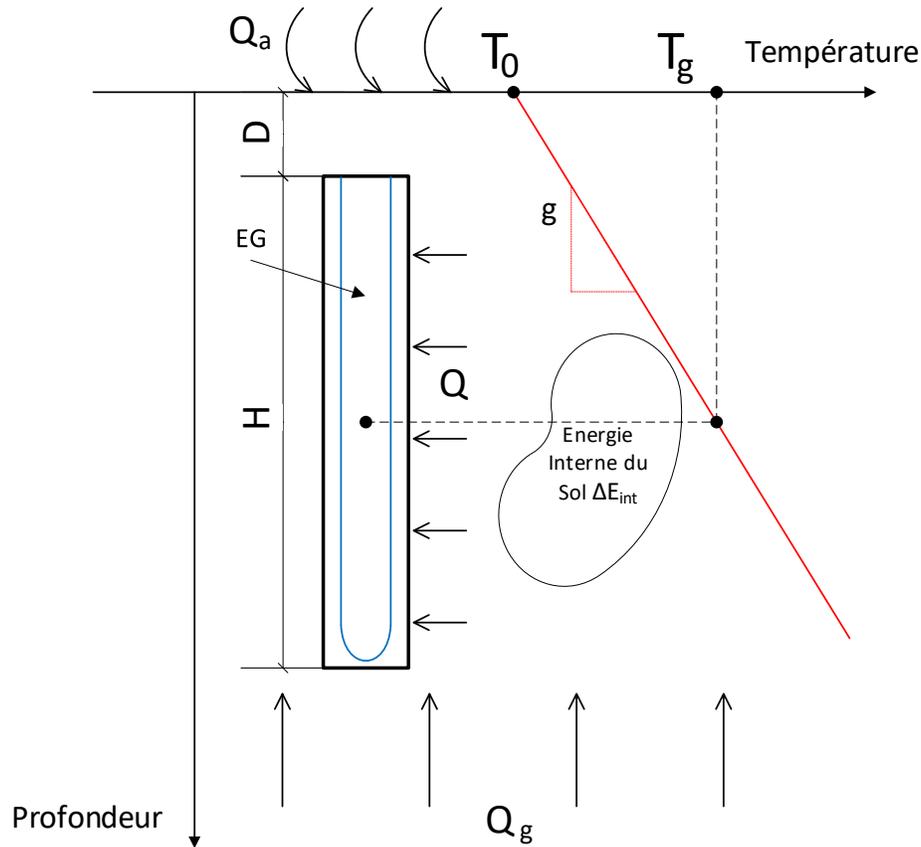


Figure 4.1.1: Représentation schématique d'un EG

Dans sa thèse, Eskilson (1987) a calculé analytiquement le flux de chaleur total à travers la surface du sol Q_a à un certain temps t dû à l'extraction de chaleur à l'aide d'un EG dans le cas d'un flux de chaleur géothermique négligeable. Cette équation a la forme :

$$Q_a = q\sqrt{4\alpha t} \left(\operatorname{ierfc} \left(\frac{D}{\sqrt{4\alpha t}} \right) - \operatorname{ierfc} \left(\frac{D+H}{\sqrt{4\alpha t}} \right) \right) \quad 4.1.1$$

Où ierfc est l'inverse de la fonction d'erreur complémentaire. D'autre part, en utilisant le modèle numérique développé dans ce mémoire, la valeur de Q_a peut être obtenue en faisant :

$$Q_a = \left(\sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^m h (T_{\text{extérieur}} - T_{\text{surface},j,k}) \Delta y_j \Delta z_k \right) \quad 4.1.2$$

Une comparaison du taux de contribution du flux de chaleur à travers la surface du sol par rapport à la chaleur totale extraite est entreprise en utilisant les deux approches pour un EG dont les paramètres sont présentés dans le Tableau 4.1.1.

Tableau 4.1.1 : Paramètres utilisés dans la comparaison

Paramètre	Valeur
Longueur H [m]	140
Profondeur d'enfouissement D [m]	2
Taux d'extraction de chaleur q [W/m]	7,7
Diffusivité thermique du sol α [m ² /s]	1,11e ⁻⁶
Rayon de l'EG r_b [m]	0,06
Température du sol non perturbé T_g [°C]	14
Conductivité thermique du sol k [W/m-K]	1,11
Capacité thermique du sol C_p [J/kg-K]	1000
Densité du sol ρ [kg/m ³]	1000
Coefficient de convection en surface h [W/m ² -K]	30

Tableau 4.1.2 : Taux de contribution du flux de chaleur en surface à la puissance totale extraite

Temps (t) [ans]	Taux calculé avec 4.1.1 [%]	Taux calculé avec 4.1.2 [%]	Différence [%]
1	3,48	3,56	0,08
5	9,30	9,54	0,24
10	13,69	14,05	0,36
50	32,08	33,15	1,07
100	44,07	45,99	1,92
1000	78,79	77,46	1,34
10000	93,15	92,53	0,62
100000	97,83	98,07	0,24
1000000	99,31	99,36	0,05

Le Tableau 4.1.2 montre le rapport entre la puissance transmise au sol depuis la surface (Q_a) et la puissance totale extraite par l'EG (Q) à différents moments dans le temps. Les deux modèles prévoient des quantités d'extraction de chaleur en surface similaires, ce qui confirme la validité de l'approche numérique. La différence la plus grande entre les 2 modèles se manifeste lors de la transition du système d'un état d'équilibre à un autre. En effet, pendant les quelques premières

années, l'EG puise la majorité de l'énergie du sol lui-même. C'est ce qui explique les faibles taux montrés dans le Tableau 4.1.2. Puis à la fin de la simulation, lorsque le profil de température dans le sol devient presque invariable et que le système atteint un équilibre thermique, l'EG puise la grande majorité de l'énergie de la surface.

Bien que la solution analytique soit attirante par sa simplicité, elle ne permet pas de traiter des conditions en surface et des taux d'extraction de chaleur variables ainsi que la possibilité d'introduire un gradient géothermique. Le modèle numérique tridimensionnel développé permet de prendre en compte ces variations.

4.2 Contribution du flux géothermique

Pour isoler l'effet et la contribution du flux de chaleur géothermique Q_g sur le bilan énergétique et la performance des EG, un tel EG dont les propriétés sont décrites dans le Tableau 4.1.1 est simulé avec et sans un flux géothermique (dont le gradient de température résultant est de $0,04 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$). De plus, des paramètres de simulation simples sont utilisés : une température initiale uniforme du sol et une température de surface constante, toutes deux égales à T_g . L'EG a initialement la même température que le sol et est affecté par un taux d'extraction de chaleur constant q . Ce taux d'extraction constant est utilisé pour simplifier le calcul de l'énergie extraite par l'EG et pouvoir isoler plus commodément la contribution du flux de chaleur géothermique au bilan énergétique du système EG-sol. Cependant, la présence du flux géothermique ajoute une difficulté à ce bilan. En effet, comme montré dans la Figure 4.2.1, un flux de chaleur constant vers le haut est présent dans le sol lorsqu'un flux géothermique est présent. Cela rend le taux d'énergie entrant dans le volume de contrôle par le biais du flux géothermique ainsi que le taux d'énergie sortant à la surface dépendants de la grandeur du volume de contrôle lui-même. Par suite, l'effet de l'extraction de chaleur d'un EG dans le sol est masqué par cet important flux de chaleur dépendant du volume simulé. Sur ce prétexte, une autre approche permettant d'isoler l'effet de l'EG sur les flux de chaleur dans le sol est utilisée. Pour commencer, il faut définir le flux de chaleur à la surface « absorbé » par l'EG. Selon Pahud (2002), les EG collectent l'énergie de nombreuses sources dans le sol. Dans son article, il divise ces sources en 2 catégories principales :

1. Une source de chaleur de « frontière » où la chaleur provient à la fois du flux de chaleur géothermique et de l'environnement. La contribution de l'environnement peut être calculée en

intégrant le flux de chaleur à la surface du sol ($Q_a - Q_g$) lorsqu'il s'écoule vers le sol (c'est-à-dire lorsque la différence entre le flux convectif et géothermique $Q_a - Q_g$ est positif).

2. L'énergie déjà présente dans la capacité thermique du sol lui-même. Cette source de chaleur est la plus immédiate des deux en termes d'extraction pour être ensuite progressivement remplacée par la source de chaleur limite lorsque le flux de chaleur dans le sol revient à un état d'équilibre.

En utilisant cette définition, la contribution de l'énergie de surface (E_a) au bilan énergétique du système EG-sol est calculée en additionnant les valeurs de Q_a sur chaque pas de temps de la simulation :

$$E_a = \sum_{l=1}^p \left(\sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^m h\beta (T_{extérieure} - T_{surface,j,k}) \Delta y_j \Delta z_k \right) \Delta t_l \quad 4.2.1$$

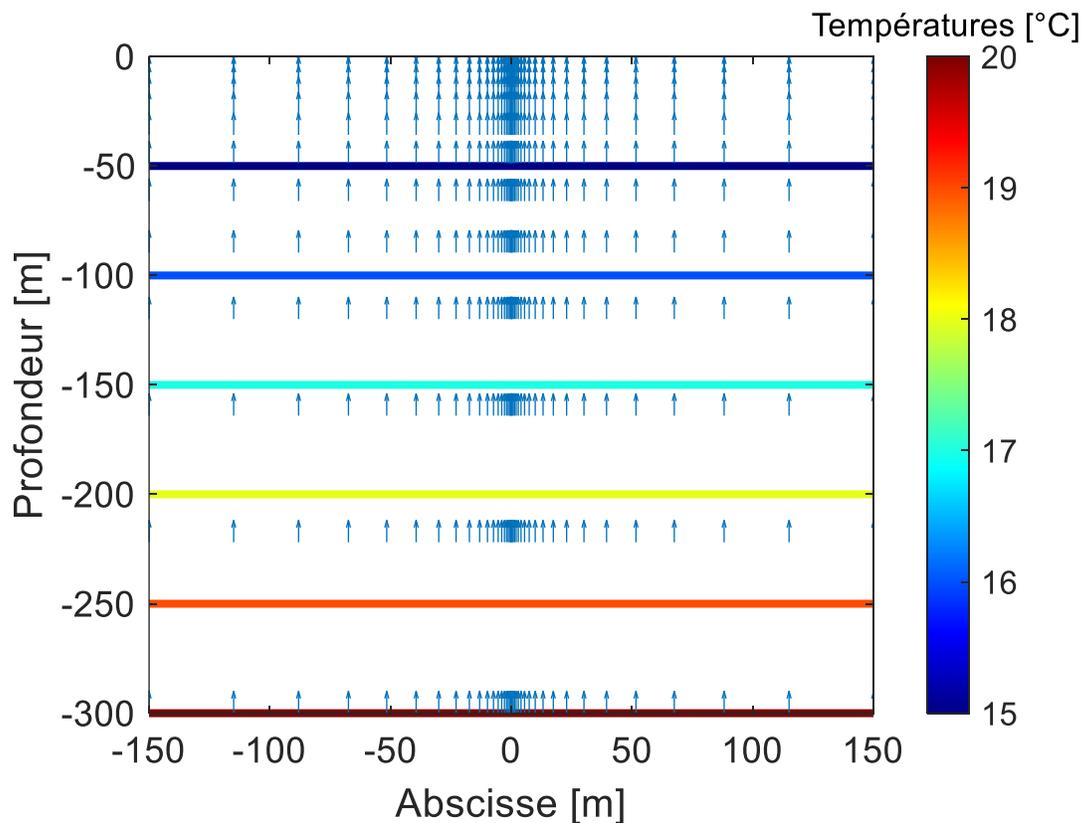


Figure 4.2.1 : Exemple de flux de chaleur initial dans le sol avec gradient géothermique

Avec β étant une variable booléenne qui est égale à 1 si $Q_a - Q_g$ est positif au nœud en question et égale à 0 sinon.

La variation de l'énergie interne (ΔE_{int}) du milieu du sol à un certain temps t par rapport à son état initial (indice 0) est calculée numériquement avec :

$$\Delta E_{int} = \int_{z_i}^{z_s} \int_{y_i}^{y_s} \int_{x_i}^{x_s} \rho C_p [T_t(x, y, z) - T_0(x, y, z)] dx dy dz \quad 4.2.2$$

Où les indices i et s réfèrent respectivement aux bornes inférieures et supérieures du volume intégré. Avec des propriétés physiques du sol uniformes, 4.2.2 est discrétisée en :

$$\Delta E_{int} = \rho C_p \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (T_{t,i,j,k} - T_{0,i,j,k}) \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k \quad 4.2.3$$

La contribution du flux de chaleur géothermique (E_g) au bilan énergétique de l'extraction de chaleur par le EG est obtenue en soustrayant la contribution du flux de chaleur de surface et la variation d'énergie interne de l'énergie totale extraite (E) qui n'est autre que le taux d'extraction Q multiplié par le temps d'extraction écoulé. Finalement, E_g est alors déduite en faisant :

$$E_g = |E| - |E_a| - |\Delta E_{int}| \quad 4.2.4$$

La Figure 4.2.1 montre les lignes de flux de chaleur traversant le sol en présence d'un gradient géothermique. Les lignes de flux possèdent toutes la même direction verticale et un sens uniforme des profondeurs du sol vers sa surface. Ces vecteurs sont utilisés comme indicateurs qualitatifs de la direction et du sens du flux de chaleur et non pas de son intensité ce qui constitue le but de cette partie.

Tableau 4.2.1 : Différents flux de chaleur et bilan énergétique sans flux géothermique

Temps [ans]	Flux de chaleur en surface Q_a [W]	Energie cumulative de surface E_a [GJ]	Changement d'énergie interne ΔE_{int} [GJ]	Energie totale extraite E [GJ]
1	38,37	0,69	33,31	34,00
5	102,91	10,12	159,84	169,98
10	151,61	30,43	309,36	339,96
50	362,73	374,15	1325,51	1699,79
100	496,13	1062,65	2334,41	3399,58
500	752,66	9337,90	7630,37	16997,90
1000	835,19	21977,04	11750,28	33995,81

Tableau 4.2.2 : Différents flux de chaleur et bilan énergétique avec flux géothermique

Temps [ans]	Flux de chaleur en surface Q_a [W]	Energie cumulative de surface E_a [GJ]	Changement d'énergie interne ΔE_{int} [GJ]	Energie géothermique cumulative E_g [GJ]	Energie totale extraite E [GJ]
1	17,52	0,33	32,39	1,27	34,00
5	36,86	4,02	157,80	8,16	169,98
10	44,72	10,55	306,48	22,93	339,96
50	66,02	84,78	1278,43	336,59	1699,79
100	72,39	194,82	2268,11	936,66	3399,58
500	72,80	1085,09	7117,22	8795,59	16997,90
1000	73,41	2239,02	11025,07	20731,71	33995,81

Le Tableau 4.2.2 et la Figure 4.2.3 montrent les différentes composantes du bilan énergétique de l'énergie cumulée extraite du sol avec la présence du flux de chaleur géothermique. Dans cette configuration, le flux de chaleur en surface plafonne à environ 75 W lorsque le sol est soumis à un flux géothermique. En revanche, le Tableau 4.2.1 et la Figure 4.2.2 montrent que le flux thermique en surface continue d'augmenter à mesure que la configuration du sol tente d'atteindre un nouvel état d'équilibre thermique. Ceci est dû au fait que, sans flux de chaleur géothermique, le flux de chaleur de surface est la seule source d'énergie autre que l'énergie interne du sol et en raison de la nature finie de la diffusivité thermique du sol, la chaleur ne peut qu'être extraite de l'atmosphère pour répondre aux demandes d'énergie de l'EG. En outre, le Tableau 4.2.1 montre que lorsque le flux de chaleur géothermique n'est pas pris en considération, l'énergie de surface contribue à 9 % de l'énergie totale extraite après 10 ans et devient la principale source d'énergie extraite après environ 500 ans d'extraction continue. En revanche, lorsque le flux de chaleur géothermique est

simulé, le Tableau 4.2.2 montre que l'énergie extraite par l'EG à partir de cette source dépasse d'emblée l'extraction de l'énergie de surface. Après 10 ans d'extraction continue, le flux de chaleur géothermique contribue à 7 % de l'énergie totale extraite contre 3 % pour l'énergie de surface. Le flux de chaleur géothermique devient la source d'énergie prédominante, étant à l'origine de plus de 50 % de l'énergie extraite après 500 ans. Par conséquent, en écartant l'effet du flux de chaleur géothermique dans la modélisation des EG, on risque de passer à côté de l'information importante concernant les différentes sources d'énergie, les profils de température du sol et les flux de chaleur.

Comme l'illustrent la Figure 4.2.4 et la Figure 4.2.5, le flux de chaleur autour de l'EG est remarquablement différent lorsqu'on prend en compte le flux de chaleur géothermique. Par exemple dans la Figure 4.2.4, le flux de chaleur à 40 mètres de l'échangeur présente une composante de profondeur négative (c'est-à-dire opposée à la surface) au point A qui se trouve à 20 mètres de profondeur. En revanche, dans la Figure 4.2.5, le point B, qui a les mêmes coordonnées que le point A, présente une déviation plutôt légère du flux de chaleur naturel déjà existant et présente toujours un flux de chaleur avec une composante de profondeur positive (c'est-à-dire vers la surface). Par conséquent, l'hypothèse de simulation traditionnelle d'avoir une température du sol initialement uniforme a tendance à surestimer l'interférence de l'EG sur le flux de chaleur déjà existant dans le sol.

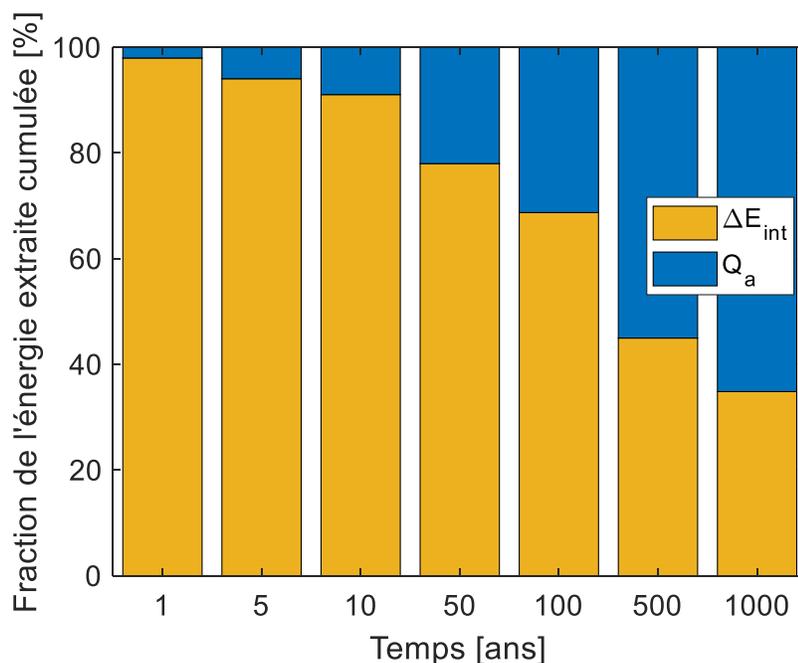


Figure 4.2.2 : Bilan énergétique sans flux géothermique

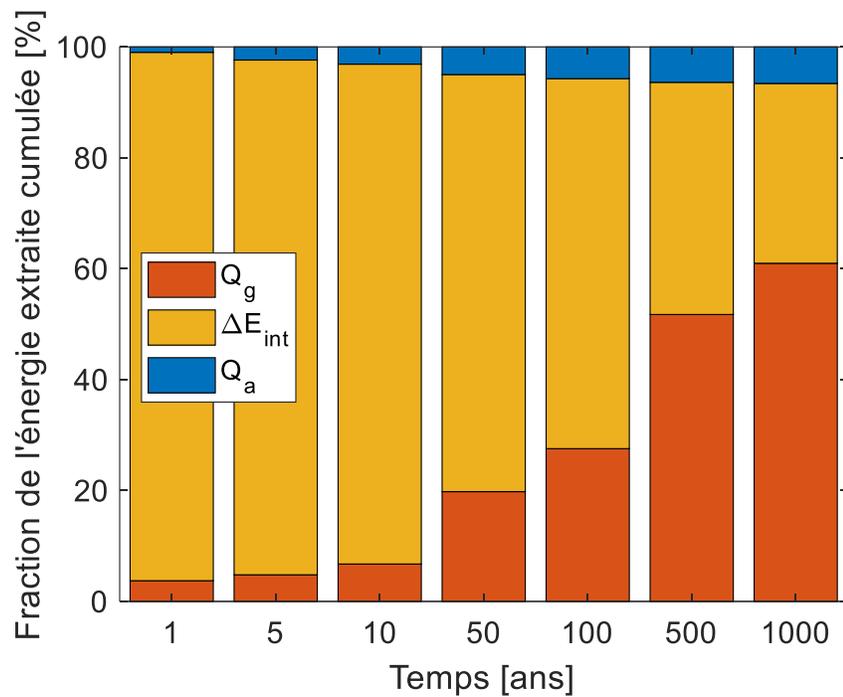


Figure 4.2.3 : Bilan énergétique avec flux géothermique

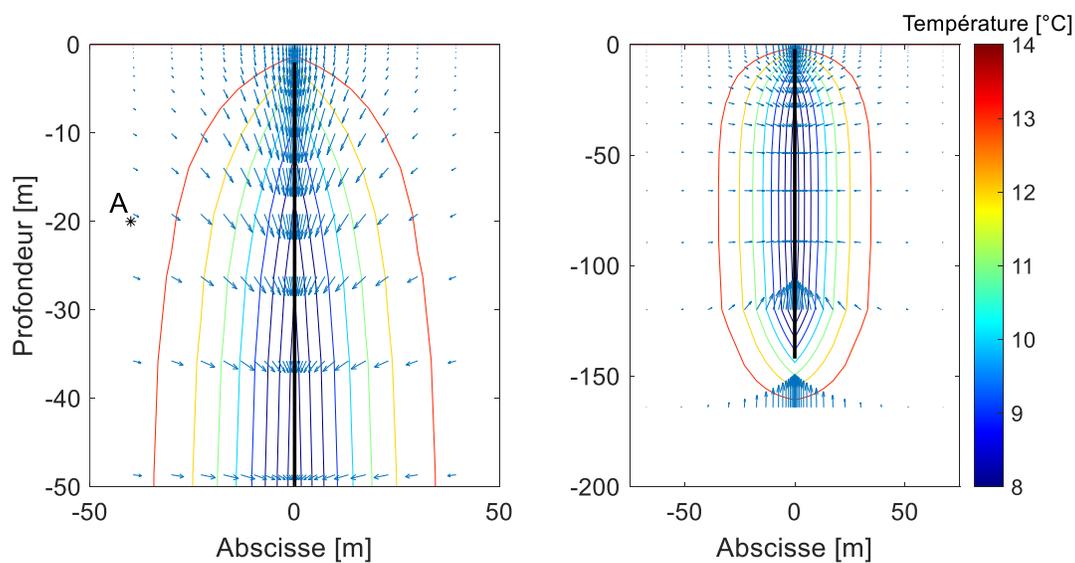


Figure 4.2.4 : Profil de température et flux de chaleur autour de l'EG après 10 ans d'extraction de chaleur, sans gradient géothermique

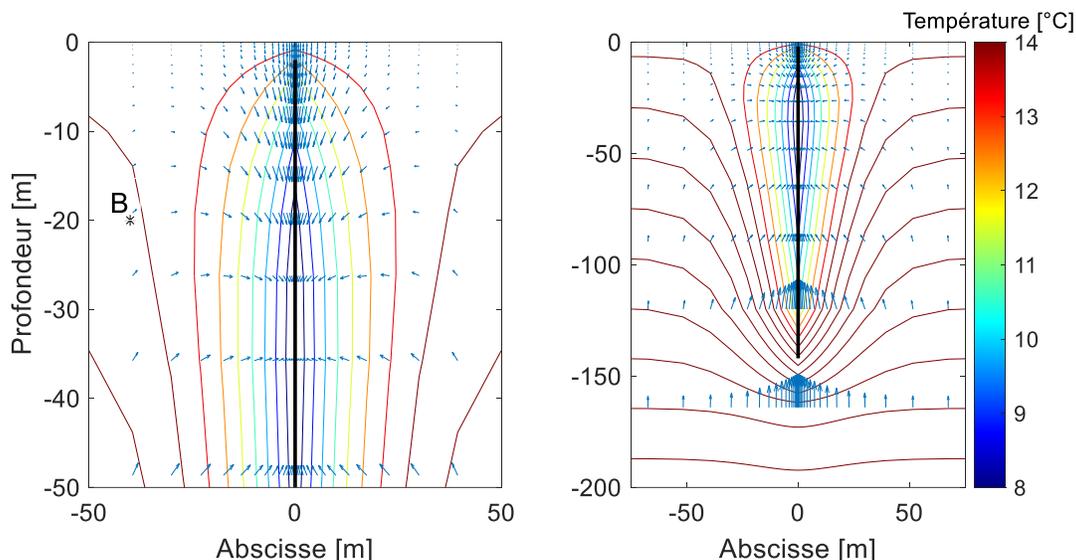


Figure 4.2.5 : Profil de température et flux de chaleur autour de l'EG après 10 ans d'extraction de chaleur, avec gradient géothermique

4.3 Effet du flux géothermique sur un EG en opération

Le but de cette partie est de mesurer l'effet du flux géothermique sur l'opération d'un EG en prenant en considération diverses hypothèses simplificatrices généralement employées dans le domaine. Ici, l'EG fonctionnera sous des conditions plus complexes : La température de l'atmosphère à la surface de l'EG est donnée par un fichier météo typique de Montréal (Montreal-CWEC-JeanDeBrebeuf.epw). L'EG ne possède pas un taux d'extraction de chaleur constant mais une température constante dans l'entièreté de son volume sur chaque pas de temps. Cette température est donnée par un fichier contenant la température de sortie de l'eau d'un système de pompes à chaleur eau-air répondant aux besoins d'un bâtiment à 3 zones thermiques aussi situé à Montréal. Le débit du fluide sera considéré comme suffisamment élevé pour ignorer la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'EG. De plus, la résistance thermique de l'EG est négligée. Le profil initial de température du sol pour ces conditions est donné par le modèle analytique de Lunardini (1981) pour $t = 0$ s :

$$T(x, t) = T_{moyen} + gx - (T_{max} - T_{moyen})e^{-x\sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau}}} \cos\left(\frac{2\pi}{\tau}(t - t_{décalage}) - x\sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau}}\right) \quad 4.3.1$$

Où τ représente la période du modèle météorologique qui est, dans ce cas, de 31 536 000 secondes (ou 1 an). Les différents paramètres T_{moyen} , T_{max} et $t_{décalage}$ sont des paramètres extraits de l'ajustement sinusoïdal du fichier météorologique, comme le montre la Figure 4.3.1 où $T_{moyen} = 5,93$ °C, $T_{max} = 21,73$ °C et $t_{décalage} = 1\,790\,640$ secondes (ou 497,4 heures). Par conséquent, la courbe qui approxime le profil de température extérieure a la forme :

$$T_{ExtAjust}(t) = T_{moyen} - (T_{max} - T_{moyen}) \cos\left(\frac{2\pi}{\tau}(t - t_{décalage})\right) \quad 4.3.2$$

Il est important de noter que l'équation 4.3.2 n'est que la courbe en noir dans la Figure 4.3.1 qui est utilisée pour confirmer la validité des paramètres choisis dans l'équation 4.3.1. La surface du sol n'est pas affectée par une température suivant cette approximation mais par les valeurs réelles horaires de la température extraites du fichier météo typique de Montréal utilisé.

Deux simulations sont abordées avec les conditions de sol non perturbé décrites dans l'équation 4.3.1 : une avec un gradient géothermique $g = 0,04$ °C-m⁻¹ et l'autre avec $g = 0$. Ces deux simulations ont pour but d'examiner l'effet du flux de chaleur géothermique sur la performance de l'EG. De plus, une troisième simulation est effectuée en utilisant un profil de température du sol non perturbé ayant la forme :

$$T(x) = T_{moyen} + gx_{mid} \quad 4.3.3$$

Où x_{mid} représente la profondeur du point médian de l'EG. Cette approximation du profil initial de température du sol est proposée par Eskilson (1987) et est couramment utilisée pour prendre en compte le gradient géothermique.

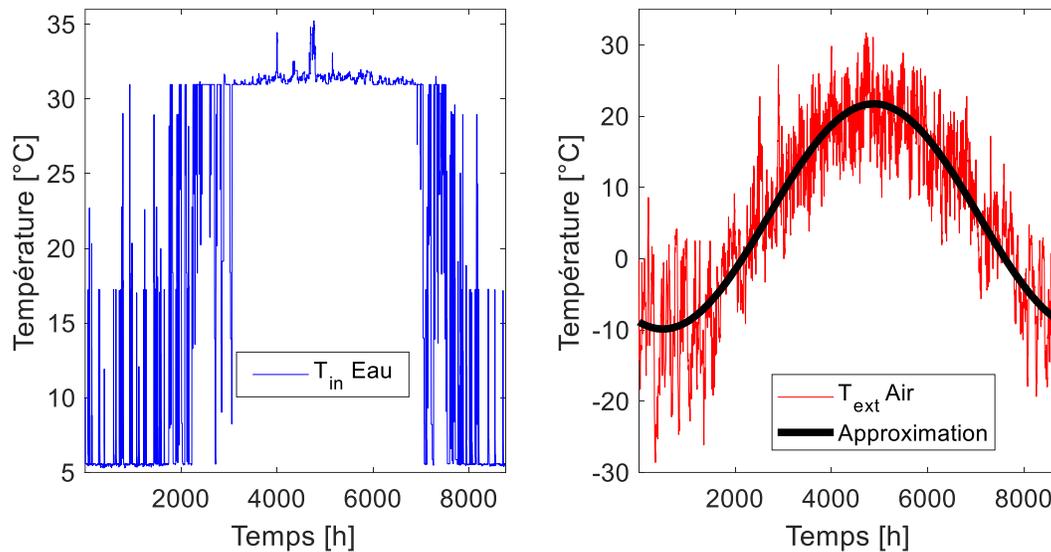


Figure 4.3.1 : Température de l'eau entrant dans l'EG (à gauche) et température de l'air ambiant (à droite)

Il est possible de distinguer à partir du profil de température de l'eau de la Figure 4.3.1 une saison de chauffage et une saison de refroidissement où l'EG servira respectivement de source et de puits de chaleur aux PAC. L'EG est modélisé comme un puits/source de chaleur suivant fidèlement le profil de température de l'eau. Cette approximation est faite afin de calculer un taux d'extraction/injection de chaleur constant sur chaque pas de temps et de ne pas se lancer dans des calculs d'état transitoire à l'intérieur des tuyaux et du coulis de l'EG. La chaleur extraite dans le cas d'une température de paroi uniforme est calculée analytiquement pour chaque côté de l'EG modélisé comme un cuboïde rectangulaire et elle est, pour une face donnée et pour un certain pas de temps t :

$$Q(t) = \int_{x=D}^{x=D+H} \int_{z=-r_b}^{z=r_b} -k \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial y} dx dz \quad 4.3.4$$

L'équation 4.3.4 est discrétisée pour être résolue numériquement en faisant :

$$Q(t) = \sum_i \sum_k -k \frac{T_{i,j,m} - T_{i,j\pm 1,m}}{\delta y_j} \Delta x_i \Delta z_k \quad 4.3.5$$

Par conséquent, l'énergie totale extraite peut être obtenue en additionnant les différentes valeurs de Q sur les pas de temps de la simulation :

$$E = \sum_{l=1}^p Q_l \Delta t_l \quad 4.3.6$$

Les différents paramètres du sol et de l'EG simulé sont donnés dans le Tableau 4.3.1. Les simulations annuelles sont réalisées avec un pas de temps d'une heure et un maillage de 7x26x39 nœuds.

Tableau 4.3.1 : Paramètres utilisés dans la comparaison

Paramètre	Valeur
Longueur H [m]	140
Profondeur d'enfouissement D [m]	2
Diffusivité thermique du sol α [m ² /s]	1,11e ⁻⁶
Rayon de l'EG r_b [m]	0.06
Conductivité thermique du sol k [W/m-K]	1,11
Capacité thermique du sol C_p [J/kg-K]	1000
Densité du sol ρ [kg/m ³]	1000
Coefficient de convection en surface h [W/m ² -K]	30

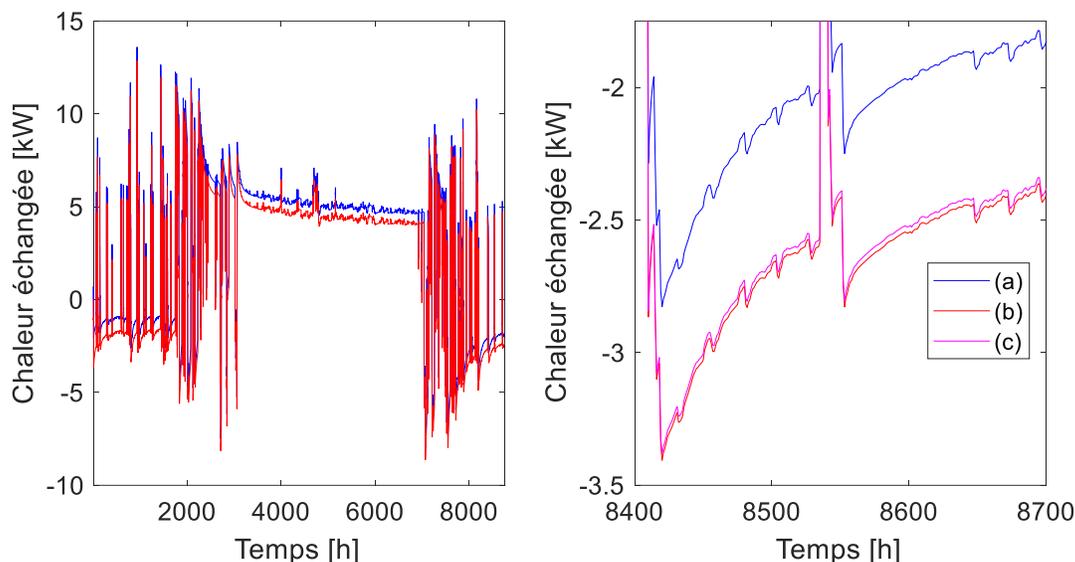


Figure 4.3.2 : Chaleur échangée par l'EG avec les profils initiaux de température du sol donnés par l'équation 4.3.1 sans (a) et avec (b) gradient géothermique, et en utilisant l'approximation du profil de température du sol de l'équation 4.3.3 (c)

La Figure 4.3.2 montre une nette différence dans l'énergie échangée par l'EG pendant son fonctionnement entre (a) et (b) en raison de l'existence d'un gradient géothermique. Cette différence est de l'ordre de 600 W pendant les saisons de chauffage et de refroidissement. Un excès d'environ 600 W pendant la saison de chauffage pourrait conduire à un surdimensionnement de l'EG. En revanche, pendant la saison de refroidissement, le gradient géothermique entraîne une diffusion moindre de la chaleur dans le sol. Ce déficit pourrait entraver la capacité de la pompe à chaleur à répondre à la demande de refroidissement nécessaire. D'autre part, l'utilisation de l'approximation de la température initiale du sol présentée dans 4.3.3 donne des résultats beaucoup plus compatibles avec le modèle qui inclut le gradient géothermique. En comparant, dans la Figure 4.3.2 les graphiques (b) et (c), une différence absolue maximale de 30 W d'échange de chaleur est calculée entre les deux approches, cimentant d'avantage la validité de la simplification de Eskilson (1987) donnée par l'équation 4.3.3. Donc, l'utilisation de la valeur moyenne de la température à mi-hauteur donne des résultats comparables à un profil de température du sol affecté par un gradient géothermique.

4.4 Résumé du Chapitre 4

Ce chapitre aborde l'effet du flux de chaleur géothermique sur un EG vertical et sa contribution au bilan d'énergie totale extraite. En ignorant le flux de chaleur géothermique, ce chapitre présume qu'un EG vertical en mode d'extraction puise de la chaleur de deux sources principales : de la surface et du sol lui-même. Le modèle numérique tridimensionnel est utilisé pour quantifier la contribution de chacune de ces deux sources. Le modèle est comparé à la méthode analytique avancée par Eskilson (1987) pour calculer la puissance thermique traversant la surface du sol. Le modèle numérique réussit à produire des résultats comparables à ceux d'Eskilson et est valable pour quantifier la quantité d'énergie extraite par l'EG de l'atmosphère.

Par la suite, un flux géothermique est introduit au sol et la contribution de ce flux sur le bilan énergétique d'un EG en mode d'extraction est mesurée. La contribution du flux géothermique au bilan énergétique de l'EG est supérieure à celle de l'énergie traversant la surface du sol et devient la principale source d'énergie extraite par l'EG après 500 ans d'opération continue. De plus le flux de chaleur circulant dans le sol avec et sans gradient géothermique est visualisé après 10 ans d'extraction continue. Quand le flux géothermique est ignoré, l'interférence de l'EG sur le flux de chaleur déjà existant dans le sol est surestimée.

L'effet du flux géothermique sur la performance d'un EG en opération est mesuré. De plus, la validité d'approximer la température du sol à sa température à mi-chemin de l'EG est mise en question. Cette approximation est avancée par Eskilson (1987) et elle est couramment utilisée. Cette partie montre qu'ignorer le flux géothermique lors du fonctionnement de l'EG peut conduire à un mauvais dimensionnement de ce dernier. L'approximation d'Eskilson (1987) est donc valable pour simplifier les calculs, donnant des résultats 20 fois plus proches du modèle complet que quand le flux de chaleur géothermique est ignoré.

CHAPITRE 5 L'EFFET DU CLIMAT SUR LES PERFORMANCES DES ÉCHANGEURS ET PAC GÉOTHERMIQUES

5.1 Introduction

Comme le suggèrent la plupart des prévisions futures, le changement climatique impliquera des altérations dans les régimes météorologiques annuels. L'augmentation de la température ambiante prévue pour la période de 2081 à 2100 par rapport à la période de 1986 à 2005 tombe entre 2,6 °C et 4,8 °C pour le scénario de changement climatique RCP8.5 (Collins, et al., 2013). Comme le montrent Robert et Kummert (2012) et Deroubaix et al. (2021), les bâtiments situés dans des climats froids connaîtront une diminution des besoins annuels de chauffage et une augmentation des besoins annuels de refroidissement. Les performances des systèmes de chauffage/refroidissement seront également influencées par les changements de la température ambiante. Dans le cas des pompes à chaleur géothermiques, l'EG sera affecté par les variations de température du sol associées aux variations de température ambiante. Le rapport changeant entre les besoins annuels de chauffage et de refroidissement affectera également la quantité de chaleur rejetée/collectée dans le sol sur une base annuelle.

L'objectif de cette partie du mémoire est d'examiner l'impact du changement climatique sur la performance énergétique d'un système résidentiel typique de PAC géothermique équipé d'un EG et situé dans un climat dominé par le chauffage (Montréal, Canada) en utilisant l'outil de simulation TRNSYS. Deux types d'EG sont étudiés : Un EG vertical en U modélisé sur TRNSYS par le Type 557b qui est étudié en profondeur à l'Annexe C et un EG horizontal basé sur le Type 952 abordé à l'Annexe D. Le Type 952 est l'objet de modification pour pouvoir prendre compte du climat à la surface du sol. Ces modifications sont détaillées dans l'Annexe E.

Dans les parties qui suivent, les quatre différents fichiers météo utilisés sont introduits : Deux fichiers météo des années 1998 à 2017 et de 2020 à 2049 et deux fichiers d'année météo typique découlant de ces périodes. Ensuite, la résidence, divisée en différentes zones thermiques, est décrite. La PAC géothermique qui répond aux besoins thermiques de la résidence est dimensionnée pour être capable de répondre à 70 % de la charge de chauffage de pointe avec une température d'entrée d'eau de 0 °C, conformément à la pratique canadienne (CSA Group, 2021).

En effet, la température d'entrée de l'eau à la PAC (qui est la température de l'eau sortant de l'EG) affecte la capacité et le COP de cette dernière. Le COP (ou coefficient de performance) de la PAC est l'efficacité de la PAC à transformer l'énergie électrique qui lui est fournie en énergie thermique de chauffage ou de refroidissement qui est en général calculée en faisant $\frac{\text{Energie thermique transférée}}{\text{Energie électrique consommée}}$. En outre, comme son nom l'indique, une pompe à chaleur a pour rôle de siphonner la chaleur contre le flux naturel de cette dernière (donc siphonner la chaleur de l'environnement froid à l'environnement chaud) analogiquement à une pompe hydraulique qui par exemple pousse de l'eau du sol à un réservoir élevé. Plus le réservoir est haut, plus la pompe hydraulique doit consommer de l'énergie électrique pour pousser l'eau vers ce réservoir. De même, pour une pompe à chaleur géothermique chauffant une résidence, plus la température de l'eau entrante est basse, plus la pompe à chaleur a besoin d'énergie électrique pour transporter la même quantité d'énergie thermique vers la résidence et donc elle possède par suite un COP plus bas. D'autre part, la capacité d'une PAC géothermique est l'énergie thermique que cette dernière peut fournir à la résidence en chauffage ou en refroidissement. En chauffage par exemple, plus la température d'entrée de l'eau à la PAC est haute, plus le débit de réfrigérant entrant le compresseur est grand. et plus la capacité de la PAC géothermique à transférer la chaleur est grande. Dans certains cas, la capacité en chauffage de la PAC sera insuffisante pour chauffer la résidence. Dans ce cas, un chauffage auxiliaire électrique est activé.

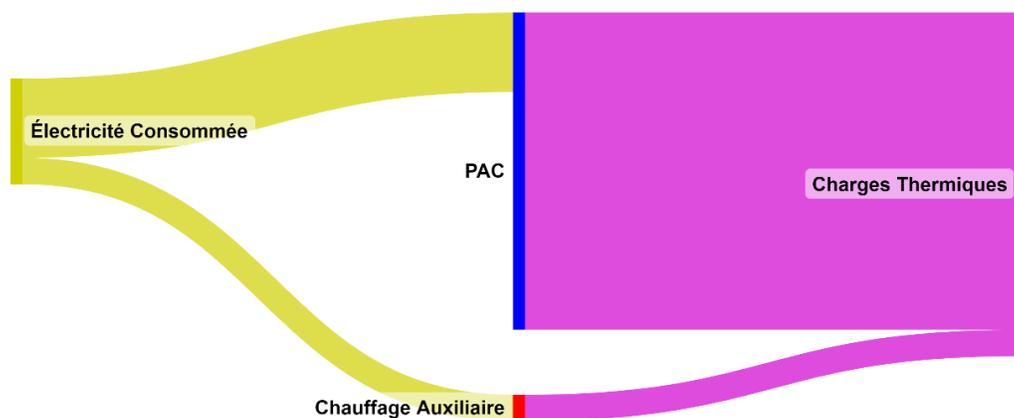


Figure 5.1.1: Schéma qualitatif de l'énergie électrique consommée par une PAC munie d'un chauffage auxiliaire pour répondre aux charges thermiques d'une résidence à Montréal en chauffage et en climatisation

La Figure 5.1.1 schématise la consommation électrique d'une PAC comparée à la consommation électrique du chauffage auxiliaire durant une année. Il est clair que l'efficacité de la PAC à transformer l'énergie électrique en énergie thermique (ou son COP) est supérieur à celui du chauffage auxiliaire. En effet, la PAC est capable de produire plus d'une unité d'énergie calorifique en chauffage et en climatisation pour chaque unité d'énergie électrique qui lui est fournie. En revanche et dans les meilleurs des cas, le chauffage auxiliaire ne peut produire qu'une unité de chaleur pour chaque unité d'électricité qui lui est fournie. D'ici viennent d'une part les bénéfices d'utiliser une PAC pour chauffer et climatiser la résidence et d'autre part de réduire le plus que possible l'utilisation du chauffage auxiliaire. En ce qui concerne la capacité du système au complet (donc de la PAC et du chauffage auxiliaire), il est important, pour conserver une température de consigne dans la résidence, que la capacité de ce système soit supérieure ou égale à la charge thermique (ou les besoins) du bâtiment en tout temps. Par la suite, les charges thermiques de la résidence sont calculées en la simulant affectée par les quatre différents fichiers météo.

Ensuite, la réponse du sol aux conditions extérieures est étudiée. Le modèle numérique unidimensionnel présenté dans la partie 3.1 est utilisé pour mesurer la température moyenne du sol jusqu'à différentes profondeurs après avoir été exposé aux conditions météorologiques de 2020 à 2049.

Par la suite, l'EG accouplé au système à PAC géothermique est dimensionné et les performances d'un EG horizontal et d'un EG vertical en U sont comparées. La consommation électrique du système de chauffage et de climatisation est mesurée en soumettant la résidence et le sol aux conditions météorologiques, d'une façon successive, des années de 1998 à 2017 et de 2020 à 2049 ainsi que sous les conditions des années typiques qui en découlent.

Pour essayer de discerner l'effet du climat sur l'EG de son effet sur le système à PAC géothermique, une deuxième série de simulation est entreprise. Dans ces simulations, le même bâtiment, le même système à PAC géothermique et les mêmes EG sont utilisés que pendant les simulations précédentes. La résidence est toujours affectée par les conditions météorologiques réelles mais cette fois, comme montré dans la Figure 5.1.2 la surface du sol est affectée par les fichiers météo typiques qui découlent des années réelles. La différence de consommation électrique du système entre ces deux séries de simulations est calculée. Cette différence de consommation est attribuée aux différents profil de température du sol autour de l'EG et donc affectant la température

d'entrée du fluide caloporteur à la PAC et résulte en un COP et une capacité différents comme discuté ci-dessus.

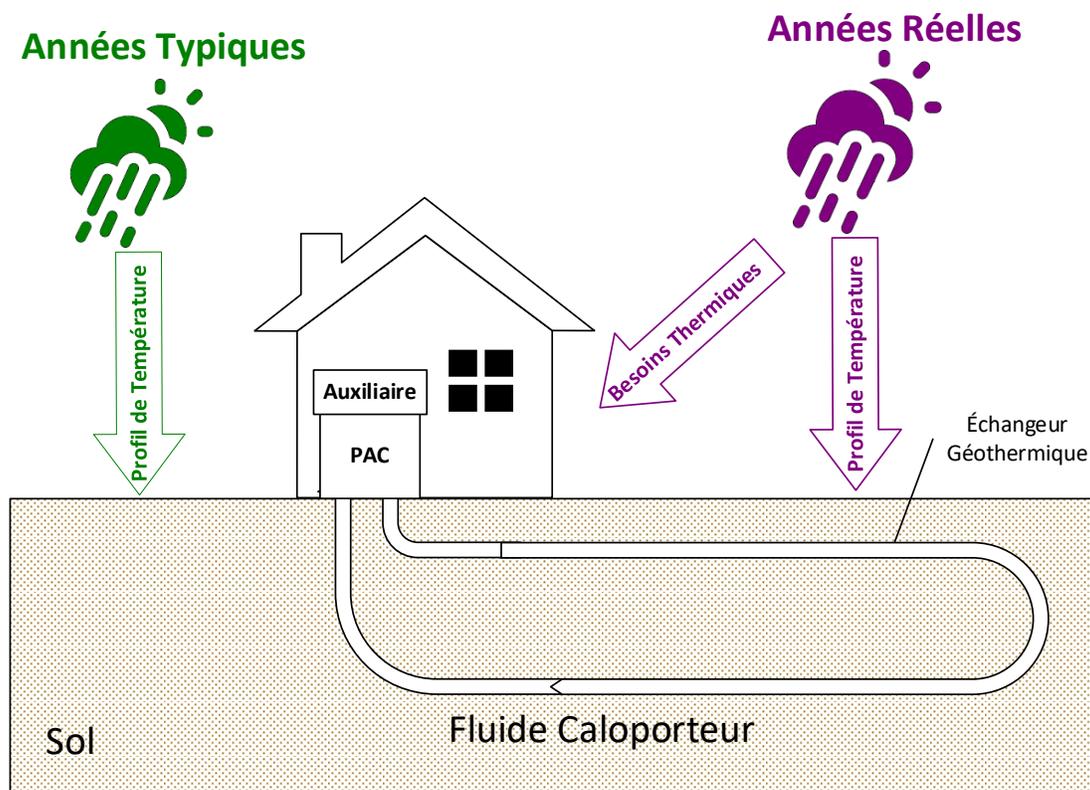


Figure 5.1.2: Séries de simulations exécutées pour dissocier l'effet du climat sur la performance de l'EG. Le climat des années réelles affecte la résidence dans tous les cas mais la surface du sol est affectée tantôt par les années réelles, tantôt par les années typiques.

Ce qui suit du chapitre 5 est inspiré et ajoute sur le contenu de l'article soumis pour la conférence IGSHPA 2022 (Sabbagh & Bernier, 2022).

5.2 Fichiers météo

Dans cette partie, quatre séries de données météorologiques pour Montréal (Canada) sont utilisées: Deux années météorologiques typiques (TMY) et deux séries de fichiers météorologiques pour des années successives. Le premier ensemble est une année météorologique typique basée sur des fichiers météorologiques réels de 1997 à 2018. Elle a été obtenue auprès d'Environnement Canada (2022) et sera appelée TMY Actuelle, c'est-à-dire celle qui serait actuellement utilisée pour concevoir et simuler des systèmes de pompes à chaleur. Le deuxième ensemble de données contient

des fichiers météorologiques futurs des années 2020 à 2049 dans le cadre d'un scénario climatique RCP 8.5. Ces fichiers ont été développés par Hosseini et al. (2021) en utilisant une approche d'apprentissage machine. Cet ensemble de données sera désigné sous le nom de RCP85-20-49. Le troisième ensemble de données est un TMY créé à partir de ces 30 années futures. Cet ensemble de données sera désigné sous le nom de TMY Future. Le quatrième ensemble, appelé AMY1998-2017, est constitué de fichiers météorologiques réels CWEEDS (Canadian Weather Energy and Engineering Datasets) pour la période de 1998 à 2017 et est disponible auprès d'Environnement Canada (2022).

5.3 Description de la résidence et du système à PAC géothermique

Le bâtiment résidentiel est une version modifiée du bâtiment exemple contenu dans la bibliothèque TESS de TRNSYS 18 (Klein, et al., 2017). Il consiste en un bâtiment de deux étages avec un sous-sol et un garage attaché ainsi qu'un solarium. Chaque étage a une superficie de 139 m². Il est modélisé dans TRNSYS à l'aide du Type 56. Le bâtiment est subdivisé en six zones thermiques : sous-sol, rez-de-chaussée, premier étage, garage, solarium et grenier. Seules les trois premières sont chauffées et refroidies. Les niveaux d'isolation initiaux ont été améliorés pour répondre au Code National Canadien de l'Énergie pour les Bâtiments (National Energy Code of Canada for Buildings NCEB) (2022) et sont donnés dans le Tableau 5.3.1.

Tableau 5.3.1 : Nouvelles valeurs des coefficients de déperdition thermique des éléments de la résidence

Élément du Type 56	U [W/m²K]	Code (U maximal) [W/m²K]
Dalle du plancher	1,13	1,136
Plafond	0,125	0,139
Mur externe	0,231	0,232
Mur sous-sol	0,311	0,334
Fenêtre	1,43	2

Le sous-sol a d'abord été modélisé à l'aide du Type 1244, employant un modèle numérique du sol détaillé pour tenir compte des pertes de chaleur traversant la paroi du sous-sol. Des simulations préliminaires ont indiqué que les pertes de chaleur du sous-sol étaient marginalement affectées par le changement climatique. Il est donc possible de remplacer le Type 1244 par des températures limites journalières appliquées aux murs et à la dalle du sous-sol, ce qui permet de réduire considérablement le temps de calcul. Ces simplifications sont par la suite imposées sur la

température de frontière des murs du sous-sol, du garage et du solarium ainsi que la dalle du sous-sol. Le profil de température de ces conditions de frontière est décrit par l'équation 3.1.17, où T_{ext} est la température de surface de l'élément considéré (mur et dalles) du côté du sol, avec les différents paramètres donnés dans le Tableau 5.3.2.

Tableau 5.3.2 : Paramètres des conditions aux frontières

	Sous-sol (mur)	Sous-sol (dalle)	Garage (mur)	Solarium (mur)
T_m [°C]	12,91	16,42	10,93	16,14
T_{max} [°C]	20,16	17,96	21,18	25,86
Φ [jours]	43,3	75,0	35,5	30,7

La maison est équipée d'un ventilateur à récupération de chaleur capable de fournir 242 kg/h d'air frais (avec une quantité équivalente évacuée) en utilisant 100 W de puissance pour les ventilateurs. L'efficacité sensible de l'échangeur de chaleur est supposée être de 65 %. Les gains de chaleur internes des personnes et des appareils à un intervalle de temps de 15 minutes ont été lus à partir d'un fichier externe. Ces données sont basées sur des études réalisées au Canadian Center for Housing Technologies (Swinton, Moussa, & Marchand, 2001).

Exposée aux conditions météorologiques de TMY Actuelle, la charge de pointe de chauffage de la résidence est de 13,1 kW et sa charge de pointe de climatisation de 6,3 kW.

La résidence est équipée d'une pompe à chaleur (PAC) géothermique eau/air. La performance énergétique de la PAC est basée sur une machine à vitesse unique de 3 tonnes (10,5 kW) disponible dans le commerce (Water Furnace, 2022). Les données du fabricant ont été traitées pour obtenir des cartes de performances normalisées de chauffage et de refroidissement à utiliser dans TRNSYS avec le Type 919. Des facteurs de correction proposés par le fabricant pour un fonctionnement en dehors des conditions nominales de débit d'air ont également été mis en œuvre. La Figure 5.3.1 montre les capacités de chauffage et de refroidissement normalisées résultantes ainsi que le COP en chauffage et en refroidissement en fonction de la température d'entrée de l'eau (i.e. température de retour de l'EG). Les capacités de chauffage et de refroidissement sont de 9,38 et 10,73 kW à 10 et 21,1 °C, respectivement (marquées d'une croix rouge sur la Figure 5.3.1). L'utilisation d'une carte de performance normalisée est utile car la capacité nominale de chauffage ou de refroidissement peut être ajustée pour des valeurs autres que 3 tonnes mais en gardant les mêmes tendances de performance. Finalement, une PAC géothermique avec une capacité nominale de chauffage de 11,6 kW pour une température d'entrée d'eau de 10 °C a été sélectionnée. Un

chauffage électrique auxiliaire de 10 kW assure le chauffage auxiliaire en période de pointe lorsque la capacité de la PAC est insuffisante.

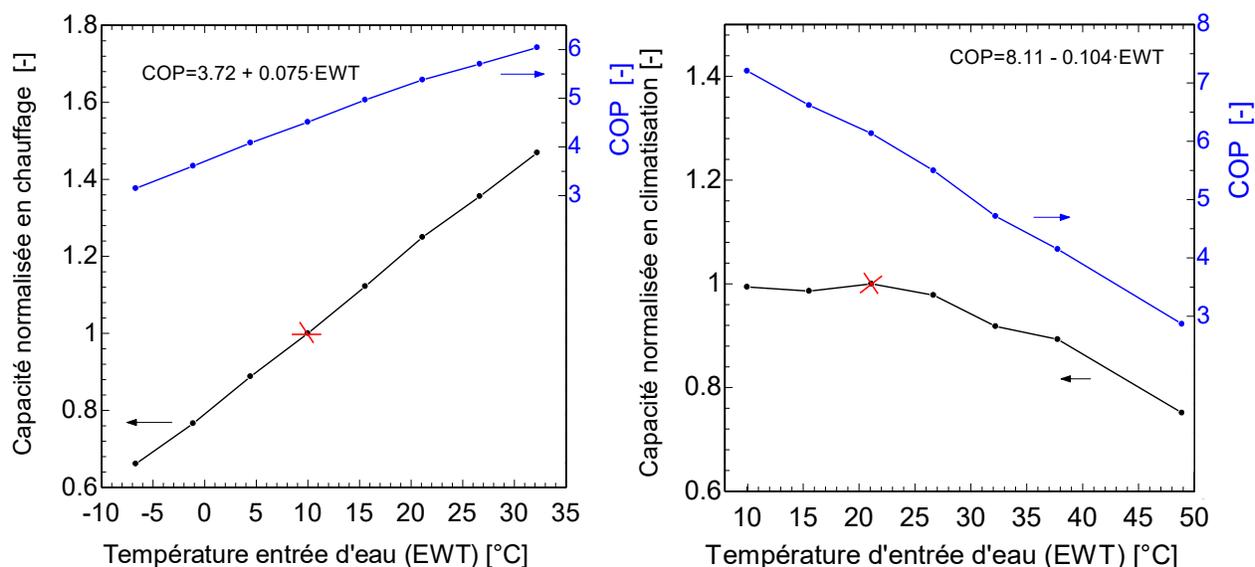


Figure 5.3.1 : Capacité normalisée et COP en chauffage et en refroidissement en fonction de la température d'entrée de l'eau

5.4 Besoins thermiques de la résidence

Pour établir une consommation d'énergie de base pour la résidence, une simulation d'un an, dont les principales composantes sont montrées dans la Figure 5.4.1, est entreprise en utilisant les fichiers météo TMY Actuelle et TMY Future. La Figure 5.4.2 montre les charges mensuelles de chauffage et de refroidissement qui en résultent. Les variations des charges de chauffage et de refroidissement ne sont pas uniformément réparties tout au long des mois de l'année. En fait, la Figure 5.4.2 montre que les conditions météorologiques futures induisent des charges de chauffage plus importantes au cours de certains mois par rapport aux conditions météorologiques actuelles. Quant aux charges de refroidissement, les conditions météorologiques futures entraînent des augmentations des charges mensuelles de refroidissement pour presque tous les mois.



Figure 5.4.1: Configuration TRNSYS utilisée pour mesurer les besoins thermiques de la résidence

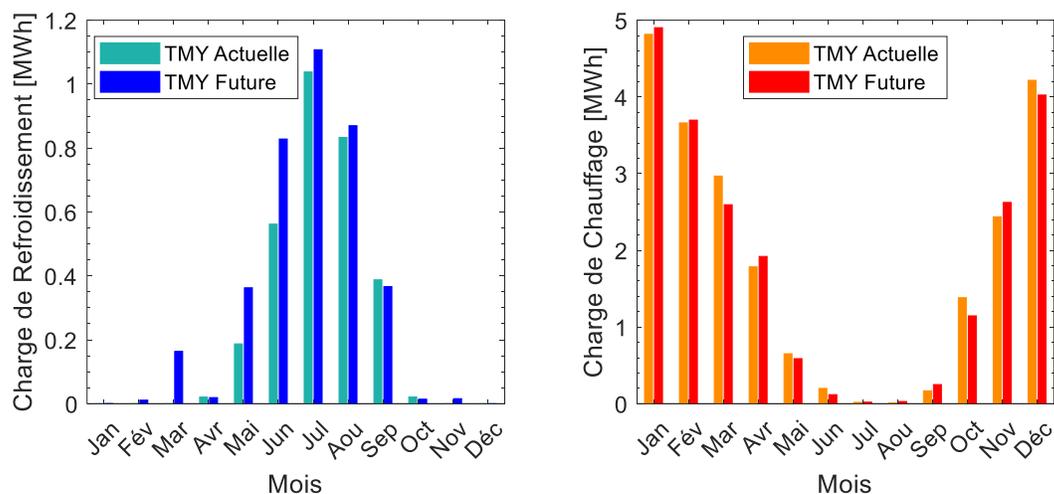


Figure 5.4.2 : Charges mensuelles de refroidissement (gauche) et de chauffage (droite) de la résidence en fonction de la TMY Actuelle et Future

Tableau 5.4.1 : Charges annuelles sous les 4 fichiers climatiques (Max, Moy et Min représentent le maximum, la moyenne et le minimum)

Charges annuelles de chauffage et de climatisation [MWh]					
		Chauffage	Relative	Climatisation	Relative
TMY Actuelle		22,30	100 %	3,10	100 %
TMY Future		21,90	98 %	3,80	123 %
AMY 1997-2018	Max	24,43	110 %	3,81	123 %
	Moy	22,31	100 %	3,10	100 %
	Min	19,77	89 %	2,03	66 %
RCP8.5 2020-2049	Max	25,60	115 %	4,81	155 %
	Moy	21,84	98 %	3,77	122 %
	Min	18,37	82 %	2,76	89 %

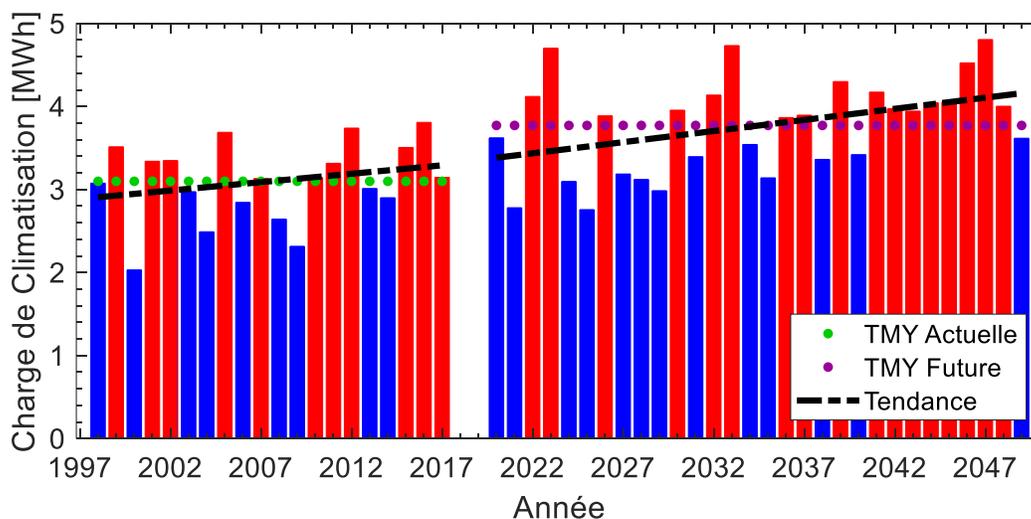


Figure 5.4.3 : Charges annuelles de refroidissement de la résidence entre 1998 et 2049 ainsi que la charge moyenne avec les conditions TMY Actuelle et Future

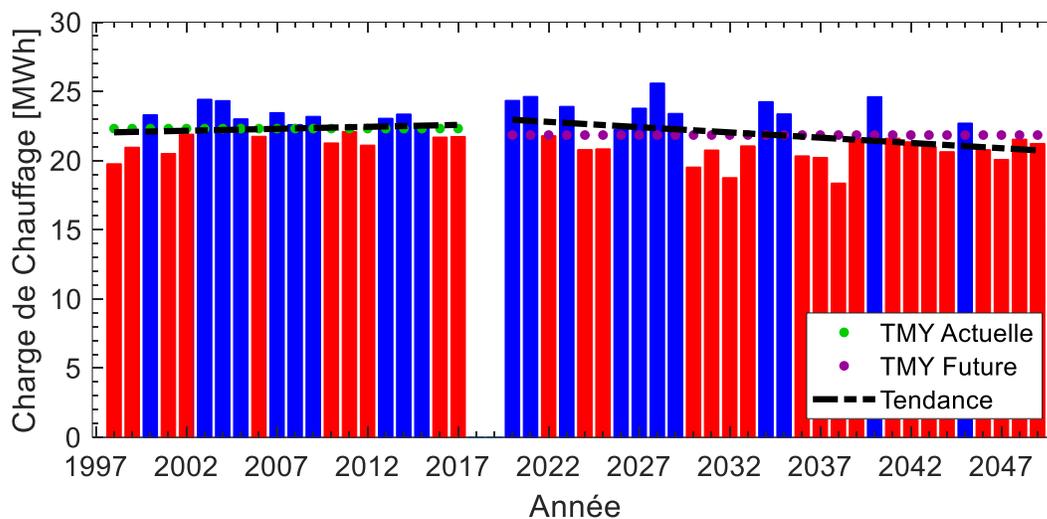


Figure 5.4.4 : Charges annuelles de chauffage de la résidence entre 1998 et 2049 ainsi que la charge moyenne avec les conditions TMY Actuelle et Future

La Figure 5.4.3 et la Figure 5.4.4 illustrent les variations annuelles des charges thermiques du bâtiment pour les quatre ensembles de données météorologiques. Comme le montre le Tableau 5.4.1, les charges augmentent de 3,1 à 3,8 MWh en climatisation et diminuent de 22,3 à 21,9 MWh en chauffage lorsque les résultats obtenus avec les fichiers TMY Actuelle et TMY Future sont comparés. Lorsque les conditions météorologiques RCP85-20-49 sont utilisées, les charges de chauffage diminuent de 3,5 % (761 kWh) par décennie (ligne de tendance en pointillé) tandis que

les charges de climatisation augmentent de 7 % (268 kWh) par décennie. Lorsque les conditions météorologiques AMY1998-2017 sont utilisées, les charges de climatisation augmentent de 7 % (200 kWh) par décennie. Cependant, les charges de chauffage de la résidence sous les conditions AMY1998-2017 semblent augmenter de 1,3 % (280 kWh) par décennie. Ceci est principalement dû au fait que 1998 a connu une saison de chauffage exceptionnellement douce et en omettant cette année de la régression linéaire, les charges de chauffage montrent une diminution de 0,5 % (120 kWh) par décennie sur les 19 années suivantes.

Le Tableau 5.4.1 montre les charges annuelles les plus élevées (Max), les plus faibles (Min) et la moyenne (Moy) de la résidence soumise aux conditions RCP85-20-49 et AMY1998-2017. Parmi les détails notables, on observe une charge de chauffage maximale plus élevée dans les conditions du RCP85-20-49 par rapport aux conditions de l'AMY1998-2017 (25,60 contre 24,43 MWh). Cependant, les charges de chauffage annuelles calculées avec les TMY Actuelle et TMY Future, et les charges de chauffage moyennes calculées à l'aide des fichiers AMY1998-2017 et RCP8.5-20-49 sont très similaires (22,30, 21,90, 22,31, 21,84 MWh). En ce qui concerne les charges de refroidissement, les conditions RCP85-20-49 conduisent à une charge de refroidissement annuelle élevée atteignant une valeur 55 % supérieure aux prédictions avec la TMY Actuelle (4,81 contre 3,1 MWh). Cette valeur est beaucoup plus élevée que la valeur la plus élevée enregistrée avec le fichier météorologique de l'AMY1998-2017 (3,80 MWh).

De plus, les années indiquées dans la Figure 5.4.3 et la Figure 5.4.4 sont codées par couleur pour refléter leurs charges de chauffage et de refroidissement par rapport à la moyenne sur toute la durée de la simulation. Les années les plus chaudes sont visualisées en rouge et les plus froides en bleu. Par exemple, une année où les charges de refroidissement sont plus élevées que la moyenne est colorée en rouge car elle est considérée comme une année de refroidissement plus chaude et une année où les charges de chauffage sont plus élevées que la moyenne est colorée en bleu car elle est considérée comme une année de chauffage plus froide. Selon cette définition, la même année peut être classée différemment en refroidissement et en chauffage. Par exemple, 2049 est considérée comme une année froide en ce qui concerne la charge de refroidissement et comme une année chaude en ce qui concerne la charge de chauffage. Cette catégorisation sera utile pour dissocier l'effet des différentes conditions climatiques sur l'EG de leur effet sur le système à PAC géothermique dans son ensemble.

5.5 Conditions du sol non perturbé

Le modèle de sol unidimensionnel simple à volume fini présenté dans la partie 3.1 est utilisé pour prédire l'évolution temporelle de la température du sol non perturbé. Le modèle suppose que les propriétés du sol restent constantes dans le temps et qu'elles ne sont pas affectées par la couverture neigeuse, le gel/dégel ou le mouvement des eaux souterraines. La chaleur est transférée de l'air au sol et se diffuse dans ce dernier uniquement par conduction. Le profil de température initial du sol est donné par l'équation 3.1.19 avec les paramètres spécifiés dans le Tableau 5.5.1. Ils correspondent à des données spécifiques à Montréal (Canada).

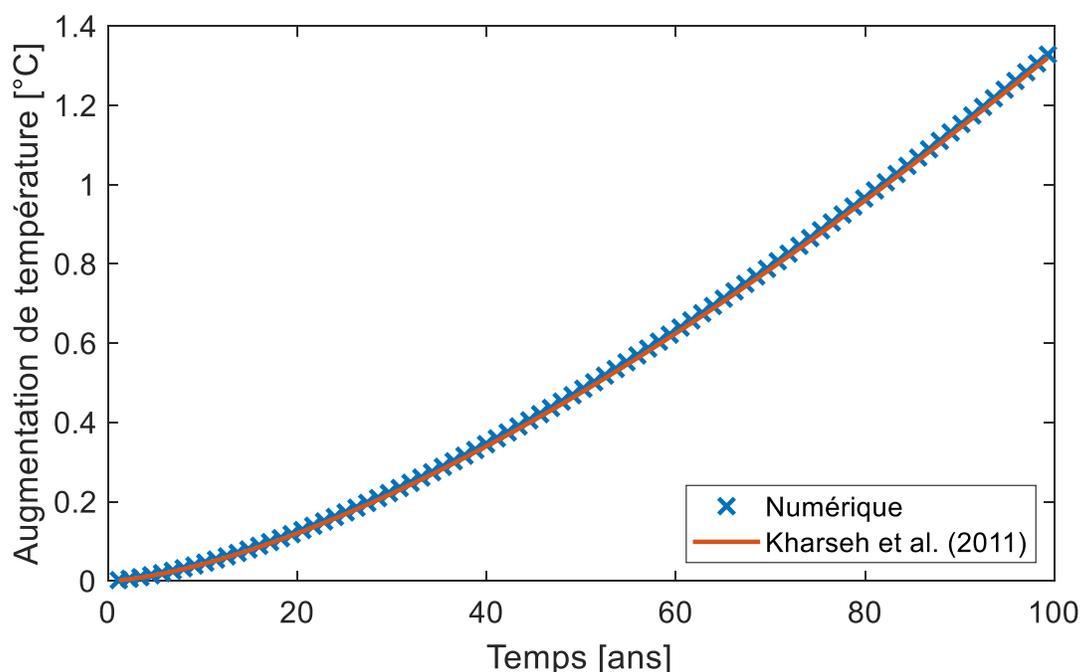


Figure 5.5.1: Augmentation de la température moyenne des 150 premiers mètres du sol soumis à une température à la surface augmentant linéairement. Les résultats sont calculés numériquement et avec la méthode de Kharseh et al. (2011).

Dans un premier temps et comme le montre la Figure 5.5.1, les résultats produits par le modèle numérique sont comparés aux résultats obtenus par la méthode analytique présentée par Kharseh et al. (2011) qui a la forme :

si $L \leq \pi\sqrt{\alpha t}$

$$\Delta T_{ave}(L, t) = \frac{\varepsilon}{6\alpha} \left(L^2 - \frac{L^3}{4\pi\sqrt{\alpha t}} - \pi\sqrt{\alpha t} L \right) + \varepsilon t \left(1 - \frac{L}{2\pi\sqrt{\alpha t}} - \frac{2\sqrt{\alpha t}}{\pi L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-n^2} \left(\cos\left(\frac{nL}{\sqrt{\alpha t}}\right) - 1 \right)}{n^4} \right) \quad 5.5.1$$

si $L > \pi\sqrt{\alpha t}$

$$\Delta T_{ave}(L, t) = \frac{\varepsilon \pi t \sqrt{\alpha t}}{2L} \left(1 - \frac{\pi^2}{12} + \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{-(2n+1)^2}}{(2n+1)^4} \right) \quad 5.5.2$$

Où $\Delta T_{ave}(L, t)$ désigne l'augmentation de température des L premiers mètres du sol après t secondes de réchauffement linéaire des conditions à la surface avec une pente de ε °C/s. Pour l'approche numérique, le sol est maillé de manière exponentielle avec des mailles plus fines près de la surface. La profondeur du sol est de 300 mètres. Le sol est divisé en utilisant 100 nœuds et est simulé pour une durée de 100 ans avec un pas de temps d'une heure. Le modèle numérique donne des valeurs pratiquement identiques (à moins de 0,01 °C près) des valeurs présentées dans l'article de Kharseh et al. (2011) ce qui permet d'utiliser le modèle numérique avec confiance.

Tableau 5.5.1: Paramètres du sol et du climat

Paramètre	Valeur	Unité
ρC_p	$2,2 \times 10^6$	J/m ³ K
k	2,5	W/m K
T_m	7,77	°C
T_{max}	22,97	°C
g	0,02	°C/m
ω	$1,99 \times 10^{-7}$	rad/s
α	$1,14 \times 10^{-6}$	m ² /s
Φ	1794240	s

Par la suite, le modèle numérique est utilisé pour calculer l'évolution du profil de température pendant les 30 années de conditions météo RCP85-20-49. Les propriétés du sol sont spécifiées dans le Tableau 5.5.1.

Les résultats sont présentés dans la Figure 5.5.2 où les températures moyennes annuelles à la surface et jusqu'à trois profondeurs sont tracées. Le choix de tracer la température moyenne jusqu'à une profondeur donnée et non pas la température moyenne à cette profondeur est fait car il reflète mieux le changement des conditions du sol autour d'un EG. En effet, les EG horizontaux

sont généralement enfouis à moins de 3 m de profondeur et tracer la température moyenne sur les 3 premiers mètres du sol encapsule la variation des conditions d'enfouissement qui affecte la majorité des EG horizontaux. Pour les EG verticaux, choisir de tracer la température moyenne du sol jusqu'à une profondeur donnée illustre adéquatement la variation de la température qui affecte ces EG. En outre, pour un EG vertical de 150 m de longueur, la température de tous les premiers 150 m de sol affectent directement le fonctionnement de cet EG parce qu'ils sont en contact direct avec ce dernier.

Il est possible de voir sur la Figure 5.5.2 que la température moyenne du sol sur les 3 premiers mètres peut connaître une variation de ~ 2 °C d'une année sur l'autre. Les variations de température sont moins importantes si l'on considère la température moyenne sur les 30 premiers mètres et quasi inexistantes sur les 150 premiers mètres. Si l'on observe les tendances (lignes pointillées de la Figure 5.5.2), la température moyenne annuelle ambiante augmente à un rythme de 0,52 °C/décennie et la température moyenne du sol des 3 premiers mètres suit de près cette tendance avec une augmentation de 0,51 °C/décennie. La température moyenne du sol des 30 premiers mètres est moins affectée par l'augmentation de la température ambiante avec une augmentation de 0,24 °C/décennie. Les 150 premiers mètres sont les moins affectés par les conditions en surface avec une augmentation de 0,05 °C/décennie. Ceci implique que les EG horizontaux situées près de la surface seront plus affectées par le changement climatique que les EG verticaux.

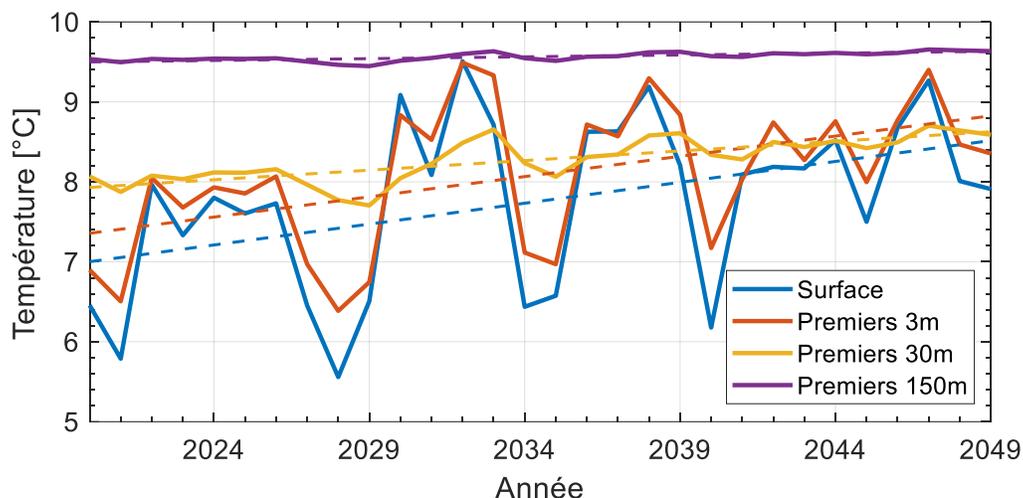


Figure 5.5.2 : Température annuelle moyenne du sol à la surface, pour les 3 premiers mètres, pour les 30 premiers mètres et les 150 premiers mètres de 2020 à 2049 sous les conditions météorologiques futures RCP85-20-49. Les lignes en pointillés représentent le résultat des régressions linéaires.

5.6 Introduction de la PAC géothermique et de l'EG à la résidence

Dans cette partie, une PAC géothermique, décrite dans le paragraphe 5.3, et un EG sont utilisés pour combler les besoins thermiques de la résidence. Deux différents EG sont étudiés : Un EG horizontal et un EG vertical.

5.6.1 EG Horizontal

5.6.1.1 Conditions météorologiques similaires affectant la résidence et la surface du sol au-dessus de l'EG

L'EG horizontal est modélisé à l'aide du Type 8952 introduit à l'Annexe E. L'EG est dimensionné sur la base d'une simulation sur 30 ans du système complet réalisée avec le fichier météo de TMY Actuelle comme se serait le cas si cet échangeur était dimensionné aujourd'hui. Par suite, un EG d'une longueur de 300 m à une profondeur de 3 m a été sélectionné. Avec ces conditions, la température d'entrée minimale du fluide à la PAC est de $-3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les composantes essentielles de l'assemblage TRNSYS sont montrées dans la Figure 5.6.1. Les différentes

composantes utilisées dans TRNSYS sont décrites dans la documentation des composantes de TESS (Thermal Energy Systems Specialists, 2013)

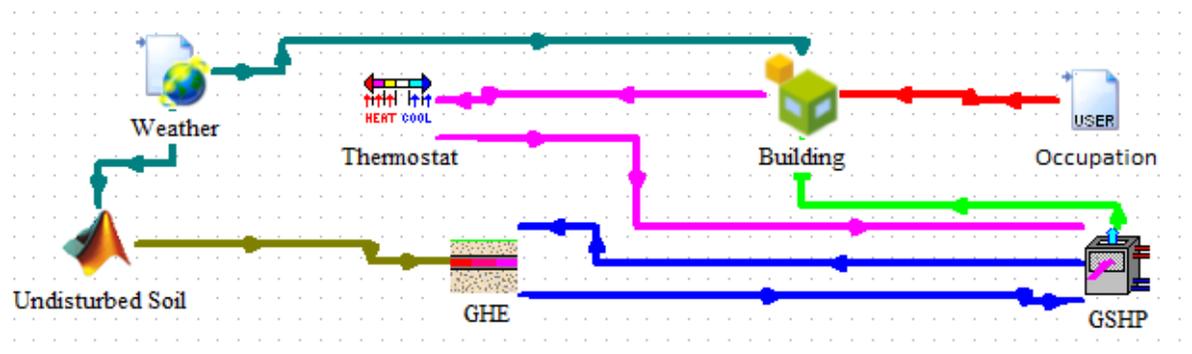


Figure 5.6.1 : Principales composantes et connexions de TRNSYS

Tableau 5.6.1 : Consommation électrique annuelle sous les 4 fichiers climatiques (Max, Moy et Min représentent le maximum, la moyenne et le minimum)

Consommation électrique annuelle [MWh]					
		Chauffage	Relative	Climatisation	Relative
TMY Actuelle		7,27	100 %	0,76	100 %
TMY Future		7,51	103 %	0,92	120 %
AMY 1997-2018	Max	8,93	123 %	0,93	122 %
	Moy	7,36	101 %	0,75	99 %
	Min	5,85	81 %	0,49	64 %
RCP8.5 2020-2049	Max	10,18	140 %	1,24	162 %
	Moy	7,51	103 %	0,93	123 %
	Min	5,22	72 %	0,65	85 %

Avant de passer à l'analyse de la consommation annuelle d'énergie, l'évolution des températures d'entrée de la PAC géothermique (c'est-à-dire la température de sortie de l'EG horizontal) est examinée dans la Figure 5.6.2 pour la TMY Actuelle et les conditions météorologiques RCP85-20-49. Dans le cas de la TMY Actuelle, le même fichier est utilisé sur la période de 30 ans, tout comme ce qui serait fait si un tel système était conçu aujourd'hui.

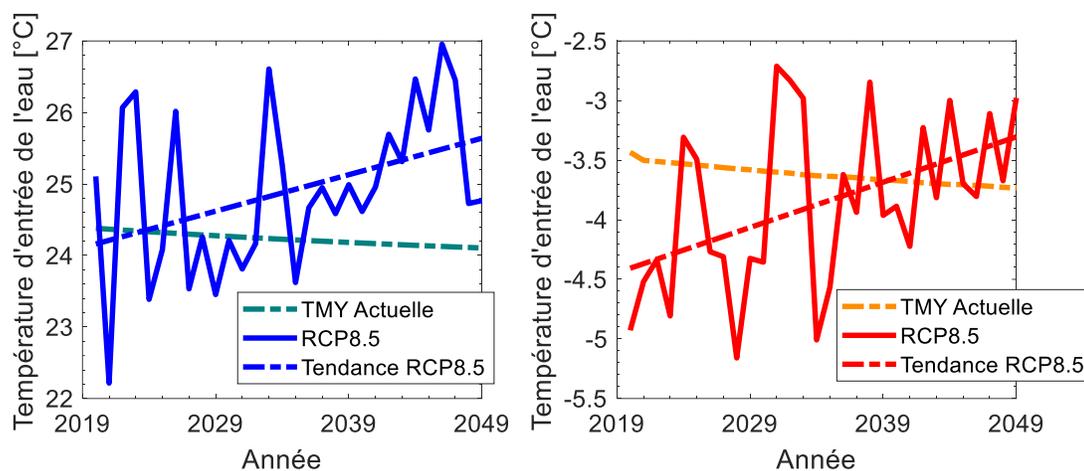


Figure 5.6.2 : Température maximale (à gauche) et minimale (à droite) annuelle d'entrée de l'eau à la PAC géothermique

Comme prévu, les températures d'entrée minimales et maximales de la PAC géothermique diminuent avec le temps ($0,09\text{ °C/décennie}$) lorsque la TMY Actuelle est utilisée dans la simulation sur 30 ans. Cette réduction est due à la nature dominante du chauffage des charges et donc à une extraction globale d'énergie du sol qui réduit à son tour la température moyenne du sol autour de l'EG.

Les températures minimales et maximales annuelles à l'entrée de la PAC géothermique subissent plusieurs fluctuations importantes sous les conditions RCP85-20-49 causées par la variabilité climatique et les températures à l'entrée de la PAC géothermique descendent bien en dessous du minimum de $-3,7\text{ °C}$ atteint dans les conditions météorologiques de TMY Actuelle, arrivant même à une valeur de $-5,2\text{ °C}$ pour les hivers froids survenant dans la première moitié de la période des 30 ans. Cette température minimale à l'entrée de la PAC géothermique est principalement due à l'effet combiné de la température ambiante sur les charges de chauffage de la résidence ainsi que sur la température du sol. Effectivement, comme le montre la Figure 5.5.2, l'année 2028 présente la température moyenne annuelle du sol à 3 mètres la plus basse. De plus, comme le montre la Figure 5.6.4, l'année 2028 présente la plus grande consommation électrique du système géothermique en chauffage et ce à la fois pour la consommation électrique du chauffage auxiliaire et la consommation électrique du système à PAC géothermique. Cela indique une saison de chauffage hivernale intense et prolongée et par conséquent une extraction de chaleur du sol plus intense et prolongée poussant la température d'entrée à la PAC au minimum de $-5,2\text{ °C}$. La

température minimale à l'entrée augmente à un taux moyen de $0,38\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ dans les conditions météorologiques RCP85-20-49 alors que, comme indiqué précédemment, l'augmentation de la température du sol sur les 3 premiers mètres est de l'ordre de $0,51\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ sans EG. Étant donné que les charges du bâtiment sont toujours dominées par le chauffage, cette différence s'explique en partie par la diminution naturelle de la température du sol autour de l'EG (de l'ordre de $0,09\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ comme indiqué précédemment) en raison de l'extraction globale d'énergie pendant un cycle complet de saison de chauffage/refroidissement comme mentionné ci-dessus.

Une image similaire est peinte par la température d'entrée annuelle maximale dans la Figure 5.6.2 avec une augmentation annuelle moyenne de $0,51\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ dans les conditions météorologiques RCP85-20-49. On aurait pu s'attendre à une augmentation moyenne similaire à la température d'entrée annuelle minimale ($0,38\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$), mais cette différence est due à un effet secondaire (illustré par la Figure 5.6.3) lié au fait que la consommation d'électricité du système à PAC géothermique en mode refroidissement augmente de 8% ($R\text{-carré} = 15,7\%$) par décennie ($+7,4\text{ kWh/an}$), ce qui implique une augmentation globale du temps de fonctionnement du système à PAC géothermique d'une année à l'autre en mode de refroidissement et, par conséquent, une injection de chaleur plus importante dans l'EG pendant l'été.

Il est possible d'en conclure que pour les climats dominés par le chauffage, où un EG est dimensionné pour la charge de chauffage, des hivers plus extrêmes induiront des contraintes sur l'EG et la PAC géothermique car la température minimale d'entrée sera inférieure à la température de conception prévue par le fichier météo TMY Actuelle. Pour les régions où la charge de refroidissement est beaucoup plus importante que la charge de chauffage, on s'attend à ce que le surplus de chaleur injecté pendant un cycle complet de saison de chauffage/refroidissement s'ajoute à la température du sol déjà en hausse en raison du changement climatique et que la température maximale d'entrée augmente d'année en année, un point à prendre en considération lors du dimensionnement de l'EG.

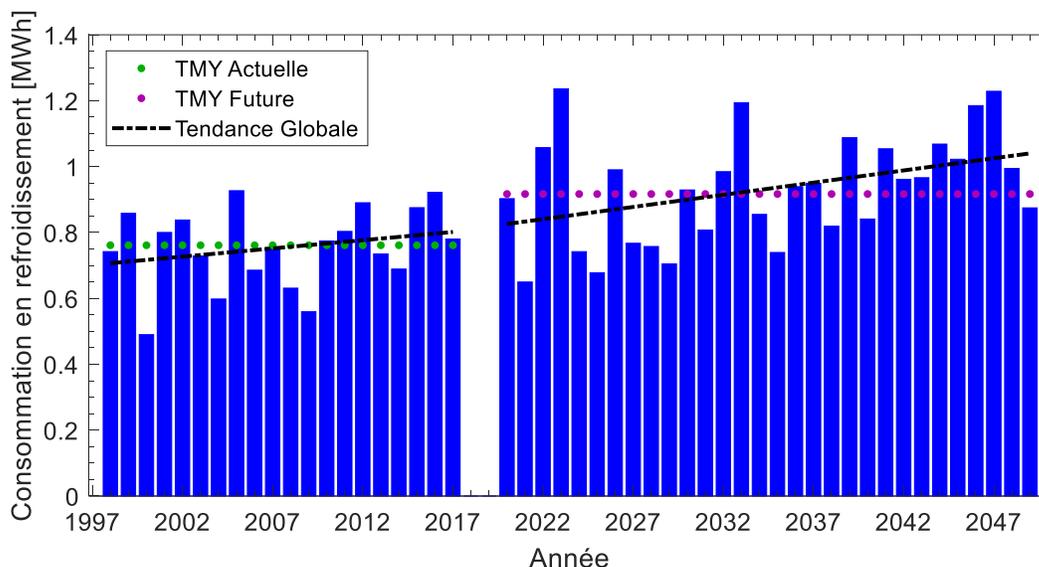


Figure 5.6.3 : Consommation électrique du système à PAC géothermique en mode de refroidissement et sa tendance globale sur la période 1998-2049 ainsi que la consommation moyenne dans le cadre des TMY Actuelle et Future

Les tendances de la consommation électrique annuelle pour le chauffage et la climatisation sur la période de 1998 à 2049 pour quatre ensembles de données météorologiques (TMY Actuelle, TMY Future, AMY 1998-2017 et RCP8.5-20-49) sont présentées dans la Figure 5.6.3 et la Figure 5.6.4. Le Tableau 5.6.1 résume ces résultats et indique la consommation électrique annuelle la plus élevée (Max), la plus faible (Min) et la moyenne (Moy) pour les ensembles de données météorologiques RCP8.5-20-49 et AMY1998-2017. La Figure 5.6.4 montre une diminution de 8 % ($R\text{-carré} = 17,8\%$) par décennie (-60 kWh/an) de la consommation électrique totale du système de PAC géothermique en mode chauffage entre 2020 et 2049. Cette baisse est due à l'effet combiné d'une diminution de 23 %/décennie (-43 kWh/an) de la consommation d'électricité du chauffage auxiliaire et d'une diminution de 3 %/décennie (-17 kWh/an) de la consommation d'électricité du système à PAC géothermique (excluant le chauffage auxiliaire) sur les 30 ans. Par conséquent, le système à PAC géothermique devient moins dépendant du chauffage d'appoint inefficace (par rapport à la PAC géothermique). Pour la période de 1998 à 2017, la consommation électrique en chauffage semble augmenter pour la même raison avancée pour les charges de la résidence qui est l'inclusion de l'année 1998 dans la régression linéaire.

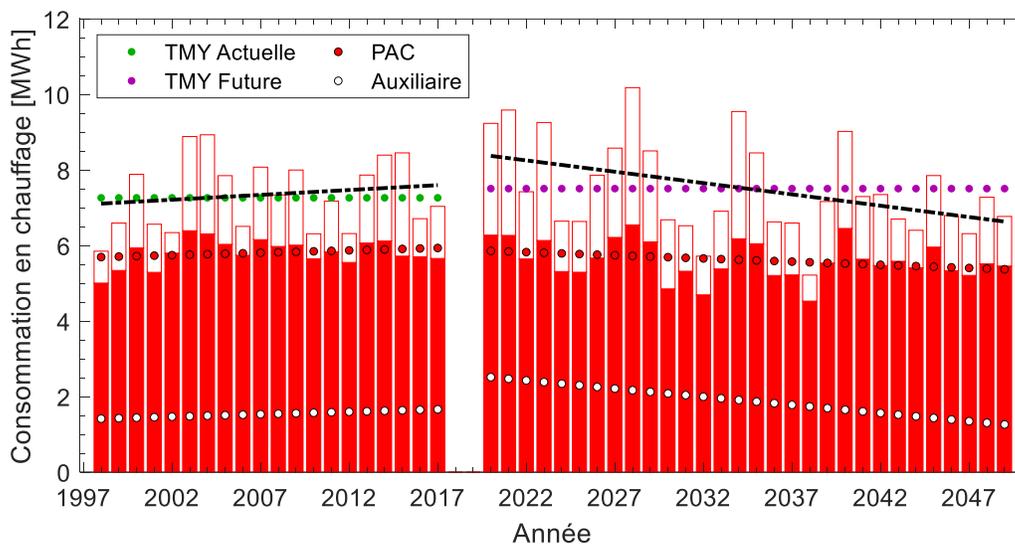


Figure 5.6.4 : Consommation électrique du système à PAC géothermique en mode de chauffage et sa tendance globale sur la période 1998-2049 ainsi que la consommation moyenne dans le cadre des TMY Actuelle et Future

La consommation future d'électricité de refroidissement est, en moyenne, sous-estimée de 20 % par rapport aux conditions TMY Actuelles (0,76 contre 0,92 MWh). Cependant, la consommation d'énergie de chauffage prévue dans les conditions TMY Futures est supérieure de 3 % (7,27 contre 7,51 MWh) à celle prévue dans les conditions TMY Actuelles. Même si la consommation d'électricité du système à PAC géothermique est en moyenne plus faible dans les conditions TMY Futures, des hivers plus extrêmes, affectant la température d'entrée de l'eau et les charges des bâtiments, réduisent le COP de la PAC géothermique et entraînent une utilisation plus importante du chauffage auxiliaire qui est moins efficace, ce qui entraîne une augmentation de la consommation d'électricité globale (7,27+0,76 contre 7,51+0,92 MWh). Par conséquent, le système de chauffage fonctionnera moins à l'avenir, mais lorsqu'il fonctionnera, il le fera dans des conditions moins favorables, ce qui réduira son efficacité globale.

Le Tableau 5.6.1 montre les consommations électriques les plus élevées (Max), les plus faibles (Min) et les charges moyennes (Moy) de la résidence dans les conditions RCP85-20-49 et AMY1998-2017. La consommation électrique annuelle de refroidissement la plus élevée dans les conditions RCP85-20-49 est 62 % plus élevée que la consommation électrique annuelle de refroidissement prévue avec les conditions de TMY Actuelle. La consommation électrique de chauffage dans les conditions météorologiques du RCP85-20-49 varie (Min à Max) de 72 % à 140

% de la prédiction obtenue avec la TMY Actuelle. Les valeurs correspondantes sont de 81 % et 123 % pour les conditions météorologiques de l'AMY1998-2017. Cela indique une plus grande variabilité de la consommation électrique dans le futur en raison de la forte variabilité du climat prédit.

5.6.1.2 Conditions météorologiques différentes affectant la résidence et la surface du sol au-dessus de l'EG

Dans le paragraphe 5.6.1.1 ci-dessus, le changement climatique affecte en même temps les charges thermiques du bâtiment et le profil de température du sol. Ces variations affectent par la suite d'une façon interconnectée la consommation électrique du système à PAC géothermique. Pour essayer de dissocier l'effet de la variabilité et du changement climatique sur la performance énergétique de l'EG, ce dernier sera affecté dans ce paragraphe par des conditions climatiques différentes à sa surface que les conditions affectant la résidence. Ainsi, pour les années de 1998 à 2049, quand le bâtiment est affecté par les conditions AMY 1998-2017, le sol à la surface de l'EG est exposé aux conditions TMY Actuelle et quand le bâtiment est affecté par les conditions RCP 85-20-49, le sol à la surface de l'EG est exposé aux conditions TMY Future.

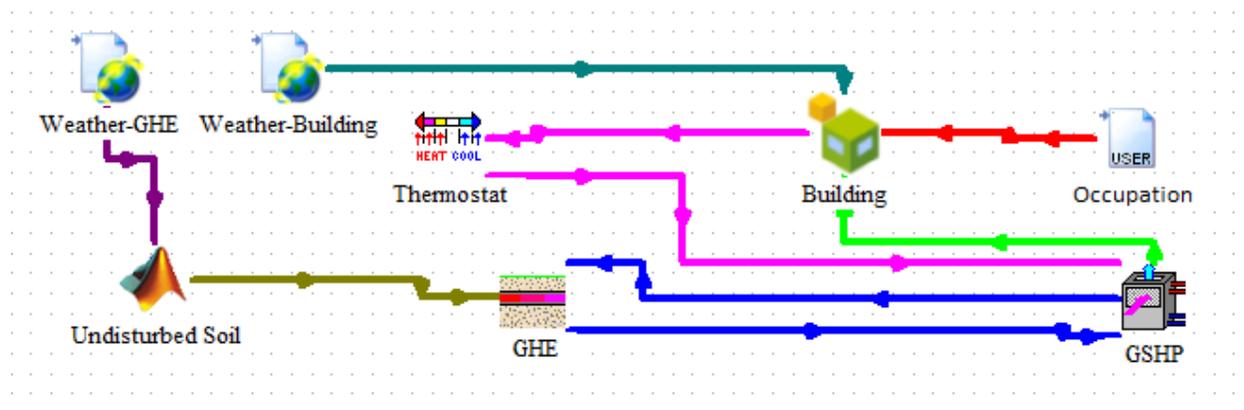


Figure 5.6.5 : Principales composantes et connexions de TRNSYS

La Figure 5.6.5 montre les principales composantes et connexions de TRNSYS utilisées pour modéliser le système. Contrairement à la Figure 5.6.1, il est important de faire une distinction entre le fichier climatique affectant la surface du sol et celui affectant la résidence.

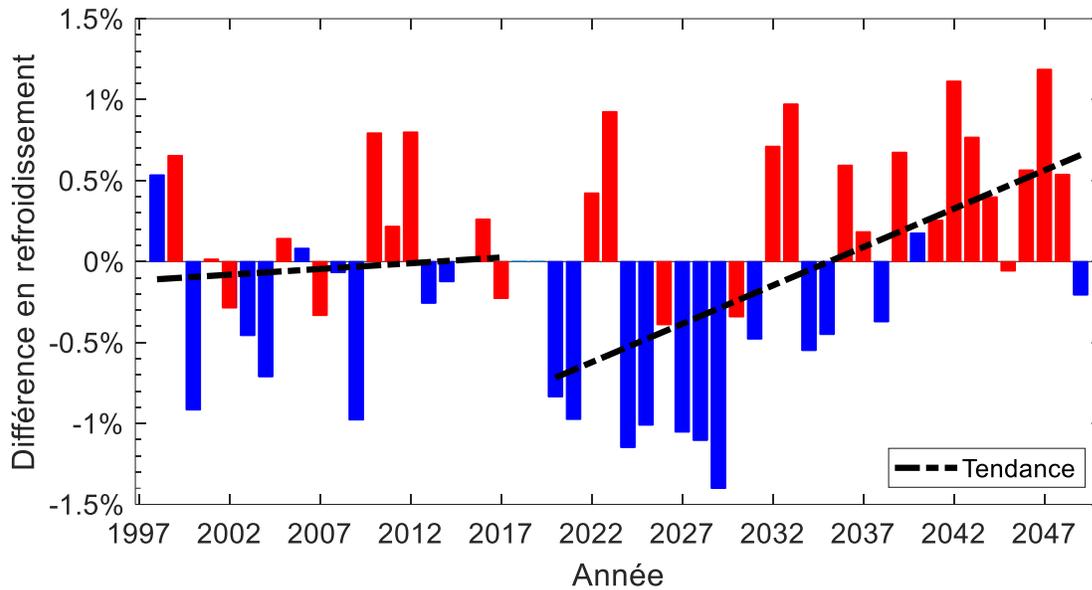


Figure 5.6.6: Différence de consommation électrique du système à PAC géothermique en climatisation causée par les différentes conditions à la surface du sol (le sol est affecté tantôt par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49, tantôt par les fichiers TMY Actuelle et TMY Future tandis que le bâtiment est toujours affecté par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49)

La Figure 5.6.6 et la Figure 5.6.7 montrent la différence de consommation électrique du système à PAC géothermique répondant aux besoins de la résidence en chauffage et en refroidissement pour différentes conditions à la surface du sol au-dessus de l'EG. Ces différences sont calculées en faisant :

$$Différence = 100 \frac{E_R - E_T}{E_R} \quad 5.6.1$$

Où E_R et E_T désignent respectivement l'énergie électrique consommée par le système quand la surface du sol est affectée par le climat des années réelles (AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49) et le climat des années typiques (TMY Actuelle et Future). Les différentes années dans la Figure 5.6.6 et la Figure 5.6.7 sont colorées en années chaudes et froides comme présenté dans le paragraphe 5.4 ainsi que la Figure 5.4.3 et la Figure 5.4.4.

Pour la différence de consommation en climatisation de la Figure 5.6.6, la variabilité du climat AMY 1998-2017 arrive à affecter la performance de l'EG jusqu'à presque 1 % avec une

année froide augmentant sa performance en moyenne de 0,32 %, et une année chaude la réduisant en moyenne de 0,19 %. De plus, l'évolution du climat entre les années 1998 et 2017 se reflète sur la performance énergétique de l'EG. Le climat semble toucher la performance de l'EG en abaissant sa performance énergétique d'une tendance de 0,07 % (R-carré = 0,7%) par décennie sur les 20 années de 1998 à 2017. Pour les années de 2020 à 2049, la variabilité du climat affecte la performance de l'EG jusqu'à presque 1,5 % avec une année froide augmentant sa performance en moyenne de 0,72 %, et une année chaude la réduisant en moyenne de 0,50 %. L'effet de l'évolution du climat sur les 30 années de 2020 à 2049 est notamment plus prononcé à cause du scénario de changement climatique RCP 8.5 encapsulé dans les conditions RCP 85-20-49. Ces conditions climatiques poussent la performance de l'EG vers une tendance de diminution de 0,47 % (R-carré = 29,9%) par décennie sur les 30 années de 2020 à 2049.

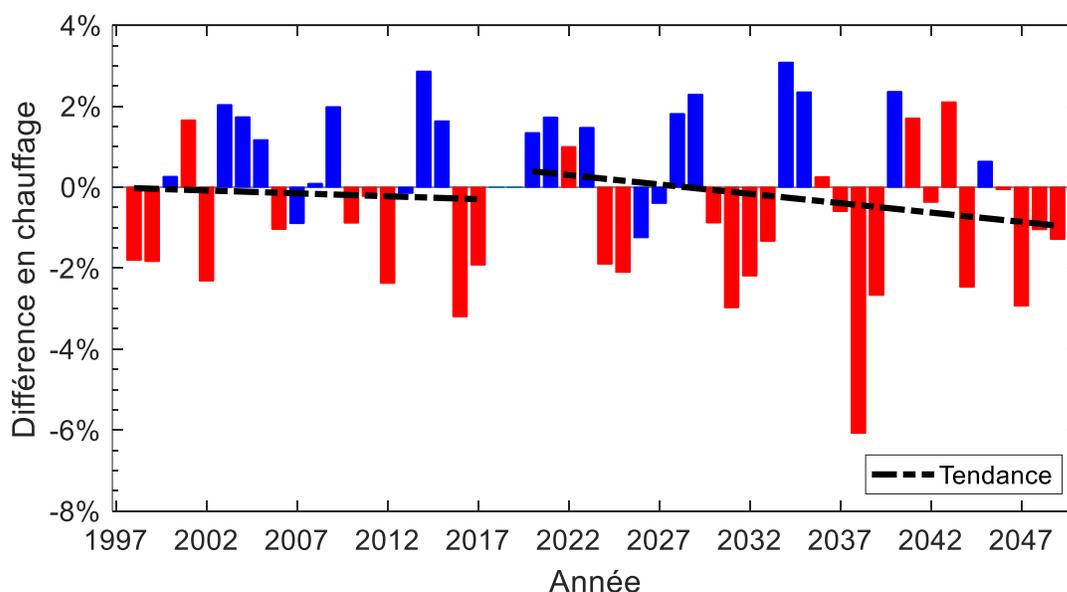


Figure 5.6.7 : Différence de consommation électrique du système à PAC géothermique en chauffage causée par les différentes conditions à la surface du sol (le sol est affecté tantôt par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49, tantôt par les fichiers TMY Actuelle et TMY Future tandis que le bâtiment est toujours affecté par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49)

En ce qui concerne la différence de consommation en chauffage montrée dans la Figure 5.6.7, pour les années de 1998 à 2017, la variabilité du climat affecte la consommation électrique du système en chauffage jusqu'à plus de 3 %. Cet effet est plus élevé en valeur relative (%) et en valeur absolue (MWh) que l'effet de la variabilité en climatisation est à cause du fait que la

variabilité du climat affecte la performance de l'EG et donc celle de la PAC géothermique en chauffage qui possède une résistance électrique comme appoint. En outre, une amélioration de la performance de l'EG se reflète par une PAC qui peut mieux répondre aux besoins du bâtiment et une diminution de l'opération de la résistance d'appoint qui est moins efficace en termes de consommation électrique. Entre les années 1998 et 2017, une année froide diminue la performance moyenne de l'EG de 1,08 % et une année chaude l'augmente en moyenne de 1,40 %. De plus, comme pour la climatisation, l'évolution du climat entre les années 1998 et 2017 se reflète sur la performance énergétique de l'EG. Le climat semble toucher la performance de l'EG en augmentant sa performance énergétique d'une tendance de 0,14 % (R-carré = 3,7%) par décennie sur les 20 années de 1998 à 2017. Pour les années de 2020 à 2049, la variabilité du climat affecte la performance de l'EG jusqu'à plus de 6 % avec une année froide réduisant sa performance en moyenne de 1,40 %, et une année chaude l'augmentant en moyenne de 1,25 %. L'évolution du climat entre les années 2020 et 2049 se reflète sur la performance énergétique de l'EG. Le climat semble toucher la performance de l'EG en l'augmentant d'une tendance de 0,46 % (R-carré = 3,7%) par décennie sur les 30 années de 2020 à 2049.

En conclusion, la variabilité du climat d'une année à l'autre affecte la performance de l'EG d'une façon plus accentuée que son évolution à cause du changement climatique. Les deux phénomènes sont néanmoins essentiels à prendre en compte lors du dimensionnement de l'EG pour des applications résidentielles. Comme le montre la Figure 5.5.2, l'EG horizontal qui est naturellement proche de la surface est assez affecté par la variation du climat. Dans la partie suivante, la même étude est entreprise pour un EG vertical.

5.6.2 EG Vertical

5.6.2.1 Conditions météorologiques similaires affectant la résidence et la surface du sol au-dessus de l'EG

L'EG vertical est modélisé à l'aide du Type 557b (tel que décrit à l'Annexe C). L'EG est conçu sur la base d'une simulation sur 32 ans du système complet réalisée avec le fichier météo de TMY Actuelle (avec 2 ans de préchauffage du sol). En effet, pour le profil de température initial du sol utilisé par le Type 557b, la Figure 5.6.9 montre une différence mesurable (plus que 0,1 °C) entre ce profil initial et le profil de température réel du sol jusqu'à une profondeur de 15 m et donc

une période de pré-conditionnement est requise pour réconcilier les deux profils. À l'aide de l'équation 3.1.16, il est possible de déterminer la durée de ce pré-conditionnement en mettant E à 15 m. On retrouve que le temps requis pour affecter la température du sol jusqu'à cette profondeur est de 4584 heures. Par suite, une valeur de 2 ans de pré-conditionnement est choisie pour largement répondre à cette condition et le sol est donc soumis à 2 années des conditions de TMY Actuelle en surface avant de démarrer la simulation du système géothermique. En outre, pour toute simulation contenant le Type 557b, ces 2 années de préchauffage du sol seront mises en place avant de simuler le système de PAC géothermique. Par la suite, un EG de 140 m de profondeur a été sélectionné. Avec ces conditions, la température d'entrée minimale du fluide à la PAC est de $-5,1$ °C. Les composantes essentielles de l'assemblage TRNSYS sont montrées dans la Figure 5.6.8.

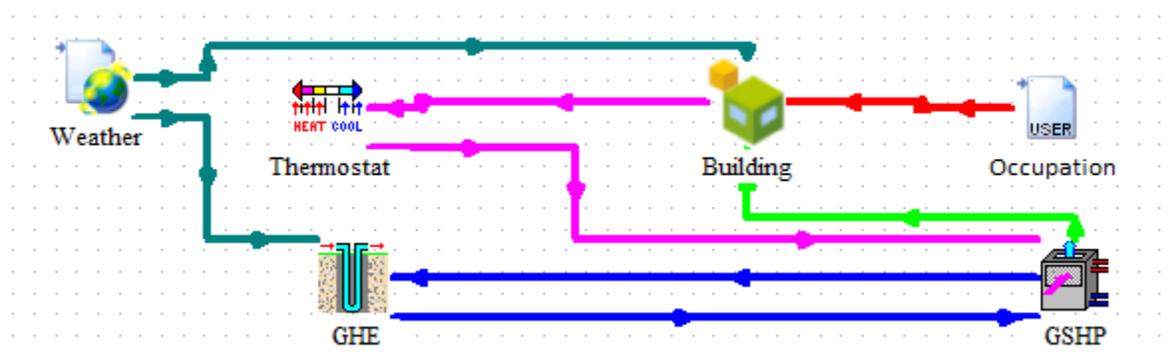


Figure 5.6.8 : Principales composantes et connexions de TRNSYS

Tableau 5.6.2 : Consommation électrique annuelle sous les 4 fichiers climatiques (Max, Moy et Min représentent le maximum, la moyenne et le minimum)

Consommation électrique annuelle [MWh]					
		Chauffage	Relative	Climatisation	Relative
TMY Actuelle		8,16	100 %	0,82	100 %
TMY Future		8,38	103 %	1,01	123 %
AMY 1997-2018	Max	9,86	121 %	1,00	122 %
	Moy	8,20	100 %	0,81	99 %
	Min	6,47	79 %	0,53	65 %
RCP8.5 2020-2049	Max	11,16	137 %	1,35	165 %
	Moy	8,29	102 %	1,01	123 %
	Min	5,88	72 %	0,70	85 %

Encore une fois, avant de passer à l'analyse de la consommation annuelle d'énergie, l'évolution des températures d'entrée de la PAC géothermique (c'est-à-dire la température de sortie de l'EG vertical) est examinée dans la Figure 5.6.10 pour la TMY Actuelle et les conditions

météorologiques RCP85-20-49. Dans le cas de la TMY Actuelle, le même fichier est utilisé sur la période de 30 ans, tout comme ce qui serait fait si un tel système était conçu aujourd'hui.

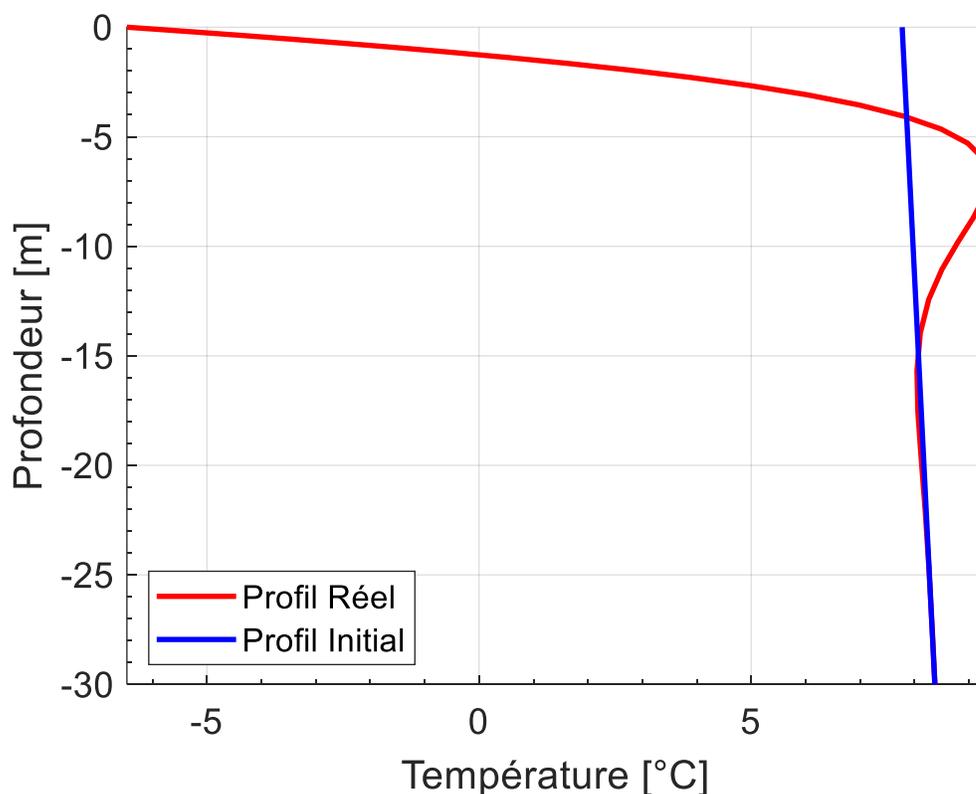


Figure 5.6.9 : Profil de température initial utilisé par le Type 557b comparé au profil de température réel du sol

Une chute importante de la température de l'eau entre la première et la deuxième année simulée avec la TMY Actuelle est visible dans la Figure 5.6.10 (~ 1 °C). En outre, pour calculer la tendance de variation de la température de l'eau sur les 30 années et pour avoir une régression plus robuste, la première année est exclue de la régression linéaire pour toutes les simulations. Cette chute brusque lorsque la TMY Actuelle est utilisé pendant 30 ans est due au fait que les EG verticaux sont, par nature, plus dépendants de la température du sol, profond et thermiquement immuable par les conditions à la surface, contrairement aux EG horizontaux qui sont grandement affectés par les conditions en surface. Cette sorte « d'extraction profonde » affecte la température du sol d'une manière assez permanente et l'effet s'accumule d'année en année plus facilement, contrairement au cas des EG horizontaux où le sol peut plus facilement regagner de l'énergie perdue en l'échangeant avec la surface. Donc cette première année est considérée comme une année

durant laquelle l'EG puise l'énergie requise, durant le cycle de chauffage/refroidissement, du réservoir d'énergie thermique stockée dans le sol lui-même avant d'arriver à un pseudo-équilibre où la réduction de température de l'eau devient plus consistante d'une année à une autre. Comme prévu, les températures d'entrée minimales et maximales de la PAC géothermique diminuent avec le temps ($0,15\text{ °C/décennie}$) lorsque la TMY Actuelle est utilisé dans la simulation sur 30 ans. Cette réduction est due non seulement à la nature dominante des charges de chauffage et donc à une extraction globale d'énergie du sol qui réduit à son tour la température moyenne du sol autour de l'EG, mais aussi à la nature de l'EG. En effet, avec l'EG horizontal, une diminution de $0,09\text{ °C/décennie}$ est observée. Cette disparité dans la réduction de la température de l'eau est causée par la longueur de l'EG (140 m de profondeur pour le vertical contre 300 m de longueur pour l'horizontal) qui est plus courte et donc une plus haute puissance d'injection/d'absorption par mètre d'EG (W/m) est atteinte avec l'EG vertical. De plus, les EG verticaux peuvent « stocker » le froid ou la chaleur dans le sol qui les entoure plus efficacement que les EG horizontaux.

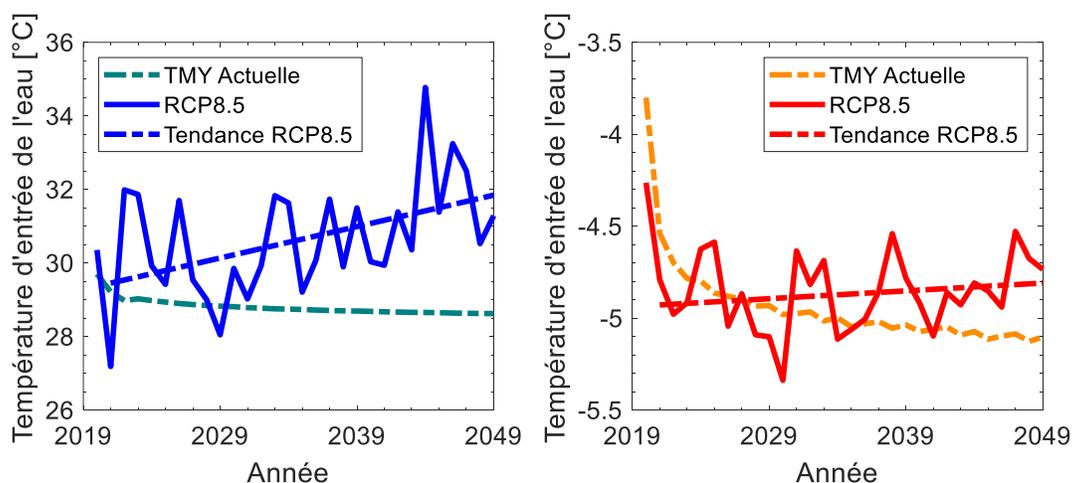


Figure 5.6.10 : Température maximale (à gauche) et minimale (à droite) annuelle d'entrée de l'eau à la PAC géothermique

Les températures minimales et maximales annuelles à l'entrée de la PAC géothermique subissent plusieurs fluctuations importantes sous les conditions RCP85-20-49 causées par l'effet de la variabilité climatique sur les charges de la résidence. La température minimale à l'entrée augmente à un taux moyen de $0,04\text{ °C/décennie}$ dans les conditions météorologiques RCP85-20-49, un taux proche du taux d'augmentation des 150 premiers mètres du sol avec $0,05\text{ °C/décennie}$. La température maximale à l'entrée augmente à un taux moyen de $0,85\text{ °C/décennie}$ dans les

conditions météorologiques RCP85-20-49. Cette augmentation est principalement causée par le fait que des saisons de climatisation plus longues et intenses se présentent d'année en année pendant la période entre 2020 et 2049. Par suite, durant une saison de climatisation, l'EG vertical, qui est moins efficace que l'EG horizontal à diffuser la chaleur à l'atmosphère environnant, accumule de la chaleur ce qui permet à la température d'entrée de l'eau durant l'apogée de la saison de climatisation d'atteindre des températures élevées.

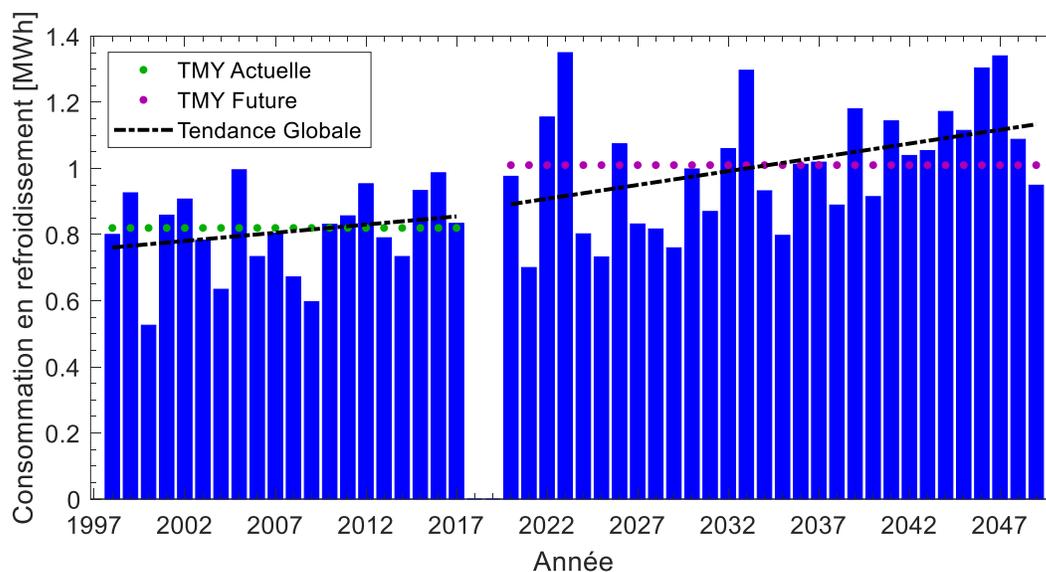


Figure 5.6.11 : Consommation électrique du système à PAC géothermique en mode de refroidissement et sa tendance globale sur la période 1998-2049 ainsi que la consommation moyenne dans le cadre des TMY Actuelle et Future

Comme pour l'EG horizontal, les tendances de la consommation électrique annuelle pour le chauffage et la climatisation sur la période de 1998 à 2049 pour quatre ensembles de données météorologiques (TMY Actuelle, TMY Future, AMY 1998-2017 et RCP8.5-20-49) sont présentées dans la Figure 5.6.11 et la Figure 5.6.12. Le Tableau 5.6.2 résume ces résultats et indique la consommation électrique annuelle la plus élevée (Max), la plus faible (Min) et la moyenne (Moy) pour les ensembles de données météorologiques RCP8.5-20-49 et AMY1998-2017. Les consommations électriques sont plus élevées pour l'EG vertical comparées à celles obtenues avec l'EG horizontal parce que ce dernier est plus long et donc plus performant thermiquement. La Figure 5.6.12 montre une diminution de 7 % ($R\text{-carré} = 16,3 \%$) par décennie (-60 kWh/an) de la consommation électrique totale du système de PAC géothermique en mode chauffage entre 2020

et 2049. Cette baisse est due à l'effet combiné d'une diminution de 19 %/décennie (-45 kWh/an) de la consommation d'électricité du chauffage auxiliaire et d'une diminution de 3 %/décennie (-15 kWh/an) de la consommation d'électricité du système à PAC géothermique (excluant le chauffage auxiliaire) sur les 30 ans. Par conséquent, le système à PAC géothermique devient moins dépendant du chauffage d'appoint inefficace (par rapport à la PAC géothermique). Pour la période de 1998 à 2017, la consommation électrique en chauffage semble augmenter pour la même raison avancée pour les charges de la résidence qui est l'inclusion de l'année 1998 dans la régression linéaire.

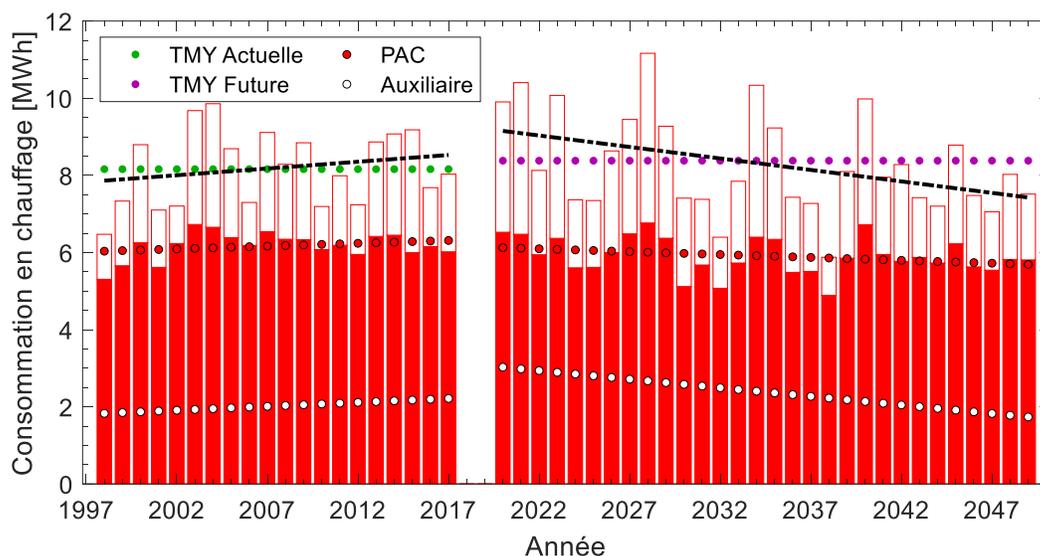


Figure 5.6.12 : Consommation électrique du système à PAC géothermique en mode de chauffage et sa tendance globale sur la période 1998-2049 ainsi que la consommation moyenne dans le cadre des TMY Actuelle et Future

La consommation future d'électricité de refroidissement est, en moyenne, sous-estimée de 23 % par rapport aux conditions TMY Actuelles (0,82 contre 1,01 MWh). Cependant, la consommation d'énergie de chauffage prévue dans les conditions TMY Futures est supérieure de 3 % (8,16 contre 8,38 MWh) à celle prévue dans les conditions TMY Actuelles. Même si la consommation d'électricité du système à PAC géothermique est en moyenne plus faible dans les conditions TMY Futures, des hivers plus extrêmes, affectant les charges des bâtiments, entraînent une utilisation plus importante du chauffage auxiliaire qui est moins efficace, ce qui entraîne une augmentation de la consommation d'électricité globale (8,16+0,82 contre 8,38+1,01 MWh). Par

conséquent, le système de chauffage fonctionnera moins à l'avenir, mais lorsqu'il fonctionnera, il le fera dans des conditions moins favorables, ce qui réduira son efficacité globale.

Le Tableau 5.6.2 montre les consommations électriques les plus élevées (Max), les plus faibles (Min) et les charges moyennes (Moy) de la résidence dans les conditions RCP85-20-49 et AMY1998-2017. La consommation électrique annuelle de refroidissement la plus élevée dans les conditions RCP85-20-49 est 65 % plus élevée que la consommation électrique annuelle de refroidissement prévue avec les conditions de TMY Actuelle. La consommation électrique de chauffage dans les conditions météorologiques du RCP85-20-49 varie (Min à Max) de 72 % à 137 % de la prédiction obtenue avec la TMY Actuelle. Les valeurs correspondantes sont de 79 % et 121 % pour les conditions météorologiques de l'AMY1998-2017. Cela indique une plus grande variabilité de la consommation électrique dans le futur en raison de la forte variabilité du climat prédit.

Il est clair qu'échanger l'EG horizontal avec un EG vertical a peu d'effet sur l'évolution et la fluctuation de la consommation électrique de système à PAC géothermique entre les années de 1998 à 2040. Il est possible de conclure que l'effet du climat est le principal moteur de changement dans la consommation électrique du système. Par la suite il est important d'essayer de dissocier l'effet du climat sur la performance énergétique de l'EG de son effet sur le système dans son ensemble.

5.6.2.2 Conditions météorologiques différentes affectant la résidence et la surface du sol au-dessus de l'EG

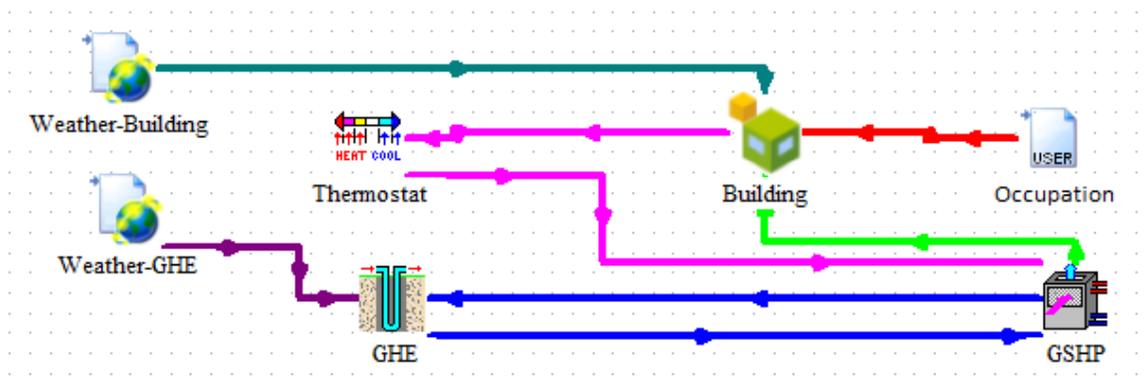


Figure 5.6.13 : Principales composantes et connexions de TRNSYS

Comme pour l'EG horizontal et pour essayer de dissocier l'effet de la variabilité et du changement climatique sur la performance énergétique de l'EG, ce dernier sera affecté dans ce paragraphe par des conditions climatiques différentes à sa surface que les conditions affectant la résidence. Par suite, pour les années de 1998 à 2049, quand le bâtiment est affecté par les conditions AMY 1998-2017, le sol à la surface de l'EG est exposé aux conditions TMY Actuelle et quand le bâtiment est affecté par les conditions RCP 85-20-49, le sol à la surface de l'EG est exposé aux conditions TMY Future. La Figure 5.6.13 montre les principales composantes et connexions de TRNSYS utilisées pour modéliser le système. Contrairement à la Figure 5.6.8, il est important de faire une distinction entre le fichier climatique affectant la surface du sol et celui affectant la résidence.

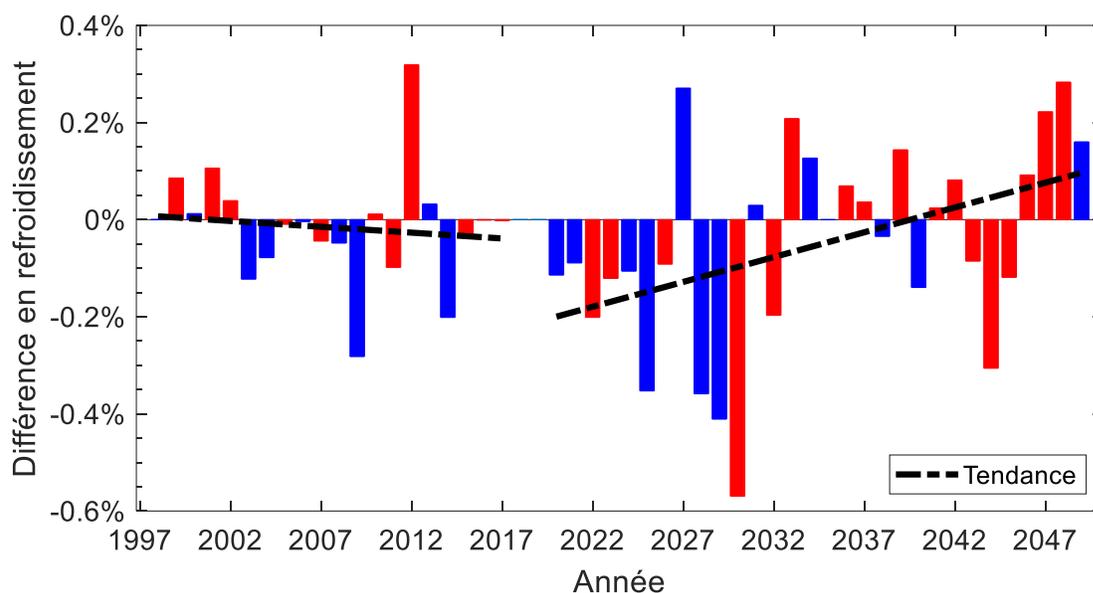


Figure 5.6.14 : Différence de consommation électrique du système à PAC géothermique en climatisation causée par les différentes conditions à la surface du sol (le sol est affecté tantôt par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49, tantôt par les fichiers TMY Actuelle et TMY Future tandis que le bâtiment est toujours affecté par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49)

La Figure 5.6.14 et la Figure 5.6.15 montrent la différence de consommation électrique du système à PAC géothermique répondant aux besoins de la résidence en chauffage et en refroidissement pour différentes conditions à la surface du sol au-dessus de l'EG. Ces différences sont calculées utilisant l'équation 5.6.1. Les différentes années dans la Figure 5.6.14 et la Figure

5.6.15 sont aussi colorées en années chaudes et froides comme présenté dans le paragraphe 5.4 ainsi que la Figure 5.4.3 et la Figure 5.4.4.

Pour la différence de consommation en climatisation de la Figure 5.6.14, la variabilité du climat AMY 1998-2017 arrive à affecter la performance de l'EG de moins de 0,4 % avec une année froide augmentant sa performance en moyenne de 0,08 %, et une année chaude la réduisant en moyenne de 0,03 %. Cependant, l'évolution du climat entre les années 1998 et 2017 se reflète différemment sur la performance énergétique de l'EG vertical que celui horizontal. Le climat semble toucher la performance de l'EG en augmentant sa performance énergétique d'une tendance de 0,02 % (R-carré = 1,4 %) par décennie sur les 20 années de 1998 à 2017, une valeur assez négligeable pour pouvoir confidemment affirmer que c'est bien le climat qui cause cette augmentation. Pour les années de 2020 à 2049, la variabilité du climat affecte la performance de l'EG jusqu'à presque 0,5 % avec une année froide augmentant sa performance en moyenne de 0,08 %, et une année chaude l'augmentant aussi en moyenne de 0,03 %. Cela implique que la variabilité du climat d'année à une autre a peu d'effet sur la performance énergétique de l'EG vertical.

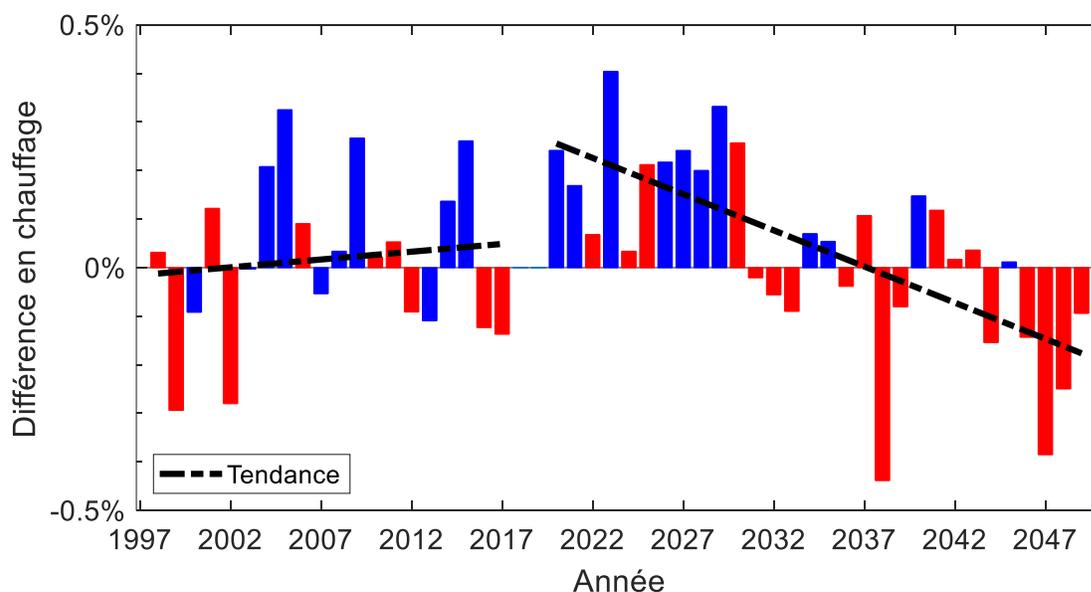


Figure 5.6.15 : Différence de consommation électrique du système à PAC géothermique en chauffage causée par les différentes conditions à la surface du sol (le sol est affecté tantôt par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49, tantôt par les fichiers TMY Actuelle et TMY Future tandis que le bâtiment est toujours affecté par les fichiers AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49)

D'autre part, l'effet de l'évolution du climat sur les 30 années de 2020 à 2049 est plus mesurable que sous les conditions AMY 1998-2017. Ces conditions climatiques poussent la performance de l'EG vers une diminution de 0,10 % (R-carré = 18,5 %) par décennie sur les 30 années de 2020 à 2049 impliquant que l'évolution du climat sur les 30 années affecte plus clairement la performance de l'EG vertical que sa variabilité d'année en année.

En ce qui concerne la différence de consommation en chauffage montrée dans la Figure 5.6.15, pour les années de 1998 à 2017, la variabilité du climat affecte la consommation électrique du système en chauffage jusqu'à 0,3 %. Une année froide entre les années 1998 et 2017 diminue la performance moyenne de l'EG de 0,1 % et une année chaude l'augmente en moyenne de 0,06 %. De plus, comme pour la climatisation, l'évolution du climat entre les années 1998 et 2017 se reflète mal sur la performance énergétique de l'EG. Le climat semble toucher la performance de l'EG en diminuant sa performance énergétique d'une tendance de 0,03 % (R-carré = 1,2 %) par décennie sur les 20 années de 1998 à 2017. Une valeur encore une fois assez négligeable pour pouvoir confidemment affirmer que c'est bien le climat qui cause cette détérioration. Pour les années de 2020 à 2049, la variabilité du climat affecte la performance de l'EG jusqu'à plus de 0,5 % avec une année froide réduisant sa performance en moyenne de 0,19 %, et une année chaude l'augmentant en moyenne de 0,05 %. L'évolution du climat entre les années 2020 et 2049 se reflète plus clairement sur la performance énergétique de l'EG vertical. Le climat semble toucher la performance de l'EG en l'augmentant d'une tendance de 0,15 % (R-carré = 45,0 %) par décennie sur les 30 années de 2020 à 2049.

En conclusion, la variabilité du climat d'une année à l'autre affecte peu la performance de l'EG vertical comparé à l'EG horizontal. L'évolution du climat entre 1998 et 2017 ne semble pas avoir d'effet sur la performance de l'EG vertical. Le climat futur prédit entre 2020 et 2049 a néanmoins plus d'impact sur la performance de l'EG vertical et semble égaler l'effet de la variabilité du climat sur cette période. Les EG verticaux sont donc, comme prévu, plus résilients à la variabilité du climat d'une année à une autre et à son évolution sur plusieurs décennies.

5.7 Résumé du Chapitre 5

Dans ce chapitre, l'impact du changement climatique sur la performance énergétique d'un système résidentiel typique de PAC géothermique équipé d'un EG est mesuré. Deux types d'EG

sont étudiés : Un EG vertical en U un EG horizontal. Différents fichiers météo sont utilisés : Deux fichiers d'années successives de 1998 à 2017 et de 2020 à 2049 (AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49) et deux fichiers d'années typiques (TMY Actuelle et TMY Future) qui en découlent. RCP 85-20-49 présument un scénario de changement climatique RCP 8.5.

La réponse du sol aux conditions RCP 85-20-49 est simulée en utilisant le modèle numérique unidimensionnel et le profil de température du sol est calculé. Les couches superficielles du sol jusqu'à 3 m de profondeur connaissent une augmentation de température similaire à celle de la température ambiante. Cela implique que les échangeurs horizontaux sont les plus affectés par le changement climatique.

Le premier EG étudié est l'EG horizontal qui est dimensionné et accouplé à la PAC géothermique. Pour discerner l'effet du climat sur l'EG de son effet sur le système à PAC géothermique, deux séries de simulations sont effectuées. Les seuls changements sont au niveau des fichiers météo utilisés. La résidence est affectée dans tous les cas par les fichiers météo AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49 mais le sol dans lequel l'EG est enfoui est tantôt affecté par les fichiers météo AMY 1998-2017 et RCP 85-20-49, tantôt par les fichiers TMY Actuelle et TMY Future. La différence de consommation électrique du système de chauffage et de refroidissement est mesurée entre les différentes simulations. La variabilité du climat d'une année à l'autre affecte la performance de l'EG d'une façon plus accentuée (jusqu'à 6 % de différence de consommation électrique) que son évolution à cause du changement climatique (jusqu'à 0,46 % par décennie de changement de la consommation électrique).

Les mêmes séries de simulations sont entreprises mais avec un EG vertical. Comme prévu, l'EG vertical est moins affecté par les conditions à la surface du sol. La variabilité du climat d'une année à l'autre affecte peu (jusqu'à 0,5%) la performance de l'EG vertical comparé à l'EG horizontal. L'évolution du climat entre 1998 et 2017 ne semble pas avoir d'effet sur la performance de l'EG vertical. L'évolution du climat futur prédit entre 2020 et 2049 a néanmoins plus d'impact sur la performance de l'EG vertical (0,10 % par décennie) et tend à égaler l'effet de la variabilité du climat sur cette période.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusion et contributions

En se basant sur la revue de littérature, il est possible de conclure que des lacunes existent dans la compréhension de l'influence de différents paramètres tels le gradient géothermique et l'évolution du climat sur le dimensionnement et la performance des échangeurs géothermiques.

Ce mémoire présente le développement d'un modèle numérique simple à implémenter mais assez puissant et flexible pour pouvoir adéquatement mesurer l'effet du gradient géothermique sur de longues périodes de temps ainsi que l'effet d'un climat variant heure par heure sur un échangeur géothermique sous l'influence de différentes charges thermiques.

Le modèle numérique peut être implémenté avec différents degrés de complexité selon le besoin : Un modèle unidimensionnel est suffisant pour quantifier l'effet de la variation du climat ou du flux géothermique sur la température du sol non perturbé. Quand un échangeur géothermique vertical unique est introduit, le modèle numérique à utiliser devient bidimensionnel pour pouvoir prendre en compte la diffusion de chaleur latérale dans le sol qui entoure l'échangeur. Pour explorer différentes configurations à échangeurs multiples, il est important d'utiliser le modèle tridimensionnel pour pouvoir prendre en compte l'influence thermique des différents échangeurs les uns sur les autres. L'avantage d'un tel modèle numérique, qui peut s'avérer plus gourmand computationnellement que les modèles analytiques, est sa versatilité à intégrer différents paramètres tel la stochasticité du climat ou la granularité des propriétés thermiques du sol.

En ce qui concerne le gradient géothermique, ce mémoire traite différentes hypothèses simplificatrices qui tendent à réduire ou rejeter catégoriquement l'existence de ce gradient. Dans un scénario d'extraction thermique continue, il est démontré que le gradient géothermique est le principal contributeur d'énergie à l'échangeur. Conséquemment l'écarter de la modélisation des échangeurs géothermiques pour divers applications affecte la précision des prédictions de la performance de ces échangeurs et peut donc conduire à un mauvais dimensionnement de ces derniers. Une hypothèse simplificatrice permettant de prendre en compte d'une façon adéquate la présence du flux de chaleur géothermique est l'hypothèse avancée par Eskilson (1987) de prendre la température du sol non perturbée uniformément égale à la température du sol à mi-chemin de l'échangeur géothermique.

Deux modèles d'échangeurs géothermiques implémentés dans TRNSYS sont étudiés dans ce mémoire. Le fonctionnement du Type 557b est expliqué pour but de pouvoir le manipuler adéquatement dans la modélisation des systèmes à échangeurs verticaux soumis à des variations climatiques. Le Type 952 qui peut modéliser un échangeur géothermique horizontal est modifié pour qu'il puisse aussi prendre compte du climat affectant la surface du sol. Le modèle numérique unidimensionnel du sol développé dans ce mémoire est utilisé pour calculer la température du sol non perturbé à différentes profondeurs. Ces températures sont introduites dans le Type 952 sous forme de paramètres changeant à chaque pas de temps.

En ce qui concerne l'effet du climat sur la performance des systèmes à pompe à chaleur résidentiels et sur celle des échangeurs géothermiques, différentes conclusions peuvent être tirées selon le type d'échangeur. Les échangeurs horizontaux sont sensibles à l'évolution du climat causé par le changement climatique qui affecte grandement les couches superficielles du sol dans lesquelles ils sont enfouis. Ils sont encore plus affectés par la variabilité du climat d'une année à l'autre rendant la prédiction de leur performance sur des longues durées de temps peu fiable. Pour les échangeurs verticaux, qui sont en général orthogonaux à la surface, le climat à la surface du sol affecte marginalement leur performance et ils sont donc plus résilients aux variations annuelles du climat et son évolution sur de longues périodes à cause du changement climatique. Par suite, l'utilisation de fichiers météo typiques en faveur de fichiers pluriannuels pour le dimensionnement de systèmes à pompe à chaleur résidentiels semble inadéquate pour comptabiliser la variabilité du climat et son évolution tout au long de la durée d'opération de ce système.

6.2 Recommandations

Plusieurs aspects abordés dans ce travail présenté peuvent être améliorés. Bien que le modèle numérique développé remplisse les objectifs liés à l'étude du gradient géothermique et de l'effet des changements climatiques, il ne prend pas en compte différents aspects affectant les propriétés thermiques du sol tel la couverture végétale, l'évapotranspiration, l'irradiation solaire, la couverture de neige, le cycle de gel/dégel du sol, l'écoulement d'eau souterrain et la variation des propriétés thermiques du sol en fonction de la température et la teneur en eau. De plus, le comportement du fluide caloporteur à l'intérieur de l'échangeur géothermique n'est pas pris en considération. Plusieurs modifications au code même du modèle numérique peuvent être

envisagées pour diminuer le temps de calcul et pour implémenter une interface graphique permettant une meilleure manipulation du modèle par l'utilisateur.

Pour l'effet du climat sur la performance des systèmes à pompe à chaleur géothermique, ce mémoire n'examine que les effets sur un bâtiment résidentiel situé dans un climat froid. Des travaux supplémentaires sont nécessaires sur différents types de bâtiments, différents emplacements, différentes configurations géométriques d'échangeurs géothermiques, différentes pompes à chaleur ainsi que différents scénarios climatiques. Le but de cette partie est principalement de proposer une méthodologie recommandée à suivre pour quantifier l'influence de différents scénarios climatiques sur le dimensionnement et le fonctionnement des systèmes de pompes à chaleur géothermiques.

RÉFÉRENCES

- Bassols, X. I. (2013). The use of heat transfer functions for heat flow computation through multilayer walls. [Master thesis]. Mons, Belgium: Polytechnique de Mons.
- Beier, R. A. (2020). Thermal response tests on deep borehole heat exchangers with geothermal gradient. *Applied Thermal Engineering*, 178, 115447.
- Chalhoub, M., Bernier, M., Coquet, Y., & Philippe, M. (2017). A simple heat and moisture transfer model to predict ground temperature for shallow ground heat exchangers. *Renewable Energy*, 103, 295-307.
- Chapuis, S. (2009). Stockage Thermique Saisonnier dans un Champ de Puits Géothermiques Verticaux en Boucle Fermée. [Mémoire de maîtrise]. Montréal, Québec, Canada: Département de Génie Mécanique, École Polytechnique de Montréal.
- Cimmino, M. (2018). pygfunction: an open-source toolbox for the evaluation of thermal response factors for geothermal borehole fields. *eSim 2018, the 10th conference of IBPSA-Canada* (pp. 492-501). Montréal: IBPSA Canada.
- Collins, M., Knutti, J., Arblaster, J.-L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., . . . Wehner, M. (2013). Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. (T. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, . . . P. Midgley, Eds.) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- CSA Group. (2021). *Design and installation of ground source heat pump systems for commercial and residential buildings*. ANSI/CSA/IGSHPA C448 Series-16 (R2021).
- Delazar, A., Hu, E., Kotousov, A., & Sofyan, S. E. (2021). A novel three-dimensional implicit numerical model of a borehole field heat exchanger that accounts for seasonal fluctuations of the soil temperature. *Geothermics*, 97, 102236.
- Deroubaix, A., Labuhn, I., Camredon, M., Gaubert, B., Monerie, P.-A., Popp, M., . . . Siour, G. (2021). Large uncertainties in trends of energy demand for heating and cooling under climate change. *Nature Communications*, 12, 5197.

- Douglas, J., & Gunn, J. E. (1964). A General Formulation of Alternating Direction Methods. Part I. Parabolic and Hyperbolic Problems. *Numerische Mathematik*, 6, 428-453.
- Environment Canada. (2022). *Engineering Climate Datasets*. Retrieved June 3, 2022, from https://climate.weather.gc.ca/prods_servs/engineering_e.html
- Eskilson, P. (1986). *Superposition Borehole Model: Manual for Computer Code*. Lund: University of Lund.
- Eskilson, P. (1987). Thermal analysis of heat extraction boreholes. [Doctoral thesis]. University of Lund, Sweden: Department of Mathematical Physics and Building Technology.
- Gehlin, S. (1998). Thermal Response Test - In Situ Measurements of Thermal Properties in Hard Rock. [Licentiate thesis]. Luleå, Sweden: Luleå University of Technology.
- Han, J.-C. (2012). *Analytical Heat Transfer*. Florida, United States of America: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Hellström, G. (1989). Duct Ground Heat Storage Model, Manual for Computer Code. Lund, Sweden: Department of Mathematical Physics, University of Lund.
- Holmberg, H., Acuña, J., Næss, E., & Sønju, O. K. (2016). Thermal evaluation of coaxial deep borehole heat exchangers. *Renewable Energy*, 97, 65-76.
- Hosseini, M., Bigtashi, A., & Lee, B. (2021). Generating future weather files under climate change scenarios to support building energy simulation – A machine learning approach. *Energy & Buildings*, 230, 110543.
- Kharseh, M., Altorkmany, L., & Nordell, B. (2009). The effect of global warming on BTES systems. *Effstock 2009: 11th International conference on Thermal Energy Storage for Energy Efficiency and Sustainability*. Stockholm: Energi- och Miljötekniska Föreningen / EMTF Förlag.
- Kharseh, M., Altorkmany, L., & Nordell, B. (2011). Global warming's impact on the performance of GSHP. *Renewable Energy*, 36, 1485-1491.
- Kharseh, M., Altorkmany, L., Al-Khawaja, M., & Hassani, F. (2015). Analysis of the effect of global climate change on ground source heat pump systems in different climate categories. *Renewable Energy*, 78, 219-225.

- Klein, S., Beckman, W., Mitchell, J., Duffie, J., Duffie, N., Freeman, T., . . . Duffy, M. (2017). TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program in.. \Tess Models\Examples\Ground Coupling Library\Type 56 Basement Example. University of Wisconsin, Wisconsin, USA: Solar Energy Laboratory. Retrieved from <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>
- Kurevija, T., Vulin, D., & Macenić, M. (2014). Impact of Geothermal Gradient on Ground Source Heat Pump System Modeling. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 28, 39-45.
- Lee, C., & Lam, H. (2008). Computer simulation of borehole ground heat exchangers for geothermal heat pump systems. *Renewable Energy*, 33(6), 1286-1296.
- Liu, J., Wang, F., Cai, W., Wang, Z., & Li, C. (2020). Numerical investigation on the effects of geological parameters and layered subsurface on the thermal performance of medium-deep borehole exchangers. *Renewable Energy*, 149, 384-399.
- Liu, Z., Li, R., Wang, D., Li, H., & Shi, L. (2020). Multilayer quasi-three-dimensional model for the heat transfer inside the borehole wall of a vertical ground heat exchanger. *Geothermics*, 83, 101711.
- Lunardini, V. J. (1981). *Heat Transfer in Cold Climates*. Van Nostrand Reinhold Company.
- Luo, Z., & Asproudi, C. (2015). Subsurface urban heat island and its effects on horizontal ground-source heat pump potential under climate change. *Applied Thermal Engineering*, 90, 530-537.
- MathWorks. (2022, January 10). *mldivide*, \. Retrieved from MATLAB Documentation: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/mldivide.html>
- Morchio, S., & Fossa, M. (2020). On the ground thermal conductivity estimation with coaxial borehole heat exchangers according to different undisturbed ground temperature profiles. *Applied Thermal Engineering*, 173, 115198.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., . . . Zhou, D. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- National Research Council of Canada. (2022). National Energy Code of Canada for Buildings: 2020. Canadian Commission On Building And Fire Codes.

- Pahud, D. (2002). *Geothermal Energy and Heat Storage*. Canobbio: Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana.
- Patankar, S. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. (W. J. Minkowycz, & E. M. Sparrow, Eds.) Hemisphere Publishing Corporation.
- Pipes, L. A. (1957). Matrix Analysis of Heat Transfer Problems. *Journal of the Franklin Institute*, 263(3), 195-206.
- Pollack, H. N., & Hurter, S. (1993). Heat Flow from the Earth's Interior: Analysis of the Global Data Set. *Reviews of Geophysics*, 31, 267-280.
- Raymond, J., Therrien, R., & Hassani, F. (2008). Overview of Geothermal Energy Resources in Québec (Canada) Mining Environments.
- Robert, A., & Kummert, M. (2012). Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past. *Building and Environment*, 55, 150-158.
- Sabbagh, G., & Bernier, M. (2022). Climate change effects on the energy performance of a residential ground-source heat pump system. *IGSHPA Annual Conference*. Las Vegas, NV.
- Seong-Kyun, K., & Youngmin, L. (2020). Evaluation of Ground Temperature Changes by the Operation of the Geothermal Heat Pump System and Climate Change in Korea. *Water*, 12(10), 2931.
- Shen, P., & Lukes, J. R. (2015). Impact of global warming on performance of ground source heat pumps in US climate zones. *Energy Conversion and Management*, 101, 632-643.
- Signorelli, S., & Kohl, T. (2004). Regional ground surface temperature mapping from meteorological data. *Global and Planetary Change*, 40(3-4), 267-284.
- Sofyan, S., Hu, E., Kotousov, A., Riayatsyah, T., & Hamdani, K. (2020). A new approach to modelling of seasonal soil temperature fluctuations and their impact on the performance of a shallow borehole heat exchanger. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22, 100781.
- Swinton, M., Moussa, H., & Marchand, R. (2001). Commissioning twin houses for assessing the performance of energy conserving technologies. *Proceedings for Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII: Integration of Building Envelopes* (pp. 1-10).

- Clearwater Beach, Florida: National Research Council Canada. Retrieved from <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=da3c9800-f6f9-4937-aa5b-84d40b7e6774>
- Thermal Energy Systems Specialists. (2013). GHP Library Mathematical Reference. *Component Libraries for the TRNSYS Simulation Environment, 4*. Madison, Wisconsin, USA.
- Thomson, W. (1862). On the Reduction of Observations of Underground Temperature, with applications to Professor Forbes' Edinburgh Observations and the Continued Calton Hill Series. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, (pp. 342-6).
- Turcotte, D. L., & Schubert, G. (2002). *Geodynamics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- VanSant, J. H. (1980). *Conduction heat transfer solutions*. Lawrence Livermore National Laboratory.
- Wagner, V., Bayer, P., Kübert, M., & Blum, P. (2012). Numerical sensitivity study of thermal response tests. *Renewable Energy*, *41*, 245-253.
- Water Furnace. (2022). *Model NS036 - Single Speed PSC (1250 CFM)*. Retrieved February 12, 2022, from <https://www.waterfurnace.com/literature/5series/sc2500an.pdf>
- Xing, L. (2014). Estimations of undisturbed ground temperatures using numerical and analytical modeling. [Doctoral thesis]. Stillwater: Oklahoma State University.
- Xing, L., & Spitler, J. D. (2017). Prediction of undisturbed ground temperature using analytical and numerical modeling. Part I: Model development and experimental validation. *Science and Technology for the Built Environment*, *23*(5), 787-808.

ANNEXE A MÉTHODE NUMÉRIQUE DE LEE & LAM (2008)

L'équation différentielle régissant le transfert de chaleur dans le sol est discrétisée en :

$$\frac{T_{i,j,m}^{n+1} - T_{i,j,m}^n}{\Delta t} = a_g \left(\frac{T_{i,j+1,m}^{n+1} - 2T_{i,j,m}^{n+1} + T_{i,j-1,m}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j,m+1}^{n+1} - 2T_{i,j,m}^{n+1} + T_{i,j,m-1}^{n+1}}{(\Delta y)^2} + \frac{T_{i+1,j,m}^{n+1} - 2T_{i,j,m}^{n+1} + T_{i-1,j,m}^{n+1}}{(\Delta z)^2} \right) \quad A.1$$

L'équation A.1 est par suite réécrite sous la forme de bilan énergétique avec un maillage irrégulier sous la forme :

$$\frac{T_{i,j,m}^{n+1} - T_{i,j,m}^n}{\Delta t} = \left(\frac{q_{x+} + q_{x-} + q_{y+} + q_{y-} + q_{z+} + q_{z-} + qs}{\rho_g c_g \Delta x_j \Delta y_m \Delta z_i} \right) \quad A.2$$

Avec :

$$q_{x+} = k_g \Delta y_m \Delta z_i \frac{T_{i,j+1,m}^{n+1} - T_{i,j,m}^{n+1}}{dx_j}$$

$$q_{x-} = k_g \Delta y_m \Delta z_i \frac{T_{i,j-1,m}^{n+1} - T_{i,j,m}^{n+1}}{dx_{j-1}}$$

$$q_{y+} = k_g \Delta x_j \Delta z_i \frac{T_{i,j,m+1}^{n+1} - T_{i,j,m}^{n+1}}{dy_m}$$

$$q_{y-} = k_g \Delta x_j \Delta z_i \frac{T_{i,j,m-1}^{n+1} - T_{i,j,m}^{n+1}}{dy_{m-1}}$$

$$q_{z+} = k_g \Delta y_m \Delta x_j \frac{T_{i+1,j,m}^{n+1} - T_{i,j,m}^{n+1}}{dz_i}$$

$$q_{z-} = k_g \Delta y_m \Delta x_j \frac{T_{i-1,j,m}^{n+1} - T_{i,j,m}^{n+1}}{dz_{i-1}}$$

Où k_g , a_g , c_g , et ρ_g désignent respectivement la conductivité, la diffusivité, la capacité thermique ainsi que la densité du sol. T désigne la température d'un nœud donné et Δt le pas de temps. L'indice n représente l'indice du pas de temps en question. Le terme de source q_s est égal au quart de la charge thermique affectée à l'EG multipliée par une constante q_{fact} pour prendre en considération la géométrie circulaire de l'EG.

ANNEXE B MÉTHODE NUMÉRIQUE DE DELAZAR ET AL. (2021)

Le transfert de chaleur autour de l'EG est établi en utilisant l'équation de transfert de chaleur conductive transitoire avec deux sources internes dans une géométrie cartésienne rectangulaire. La première source interne modélise l'effet de l'extraction ou de l'injection de chaleur de l'EG sur le profil de température du sol. La deuxième source interne modélise le transfert thermique à la surface pour les différents volumes de contrôle. L'équation a alors la forme :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{a}{k} (Q + H_i) \quad \text{B.1}$$

Pour prédire le taux de transfert de chaleur le long de l'EG lorsque le fluide caloporteur s'écoule, un modèle d'état quasi-permanent est utilisé sans tenir compte de la capacité thermique du coulis. L'équation d'équilibre énergétique de l'EG avec un seul tuyau en U en régime permanent est alors :

$$-\dot{m}c_f \frac{dTf^D}{dz} = \frac{Tf^D - Tf^U}{R^{DU}} + \frac{Tf^D - Tb}{R^{DD}} \quad \text{B.2}$$

$$\dot{m}c_f \frac{dTf^U}{dz} = \frac{Tf^U - Tf^D}{2R^{DU}} + \frac{Tf^U - Tb}{R^{UU}} \quad \text{B.3}$$

Au cas où le débit de fluide caloporteur est nul et ignorant le transfert thermique vertical, la température du fluide est :

$$-\pi r_{pi}^2 \rho_f c_f \frac{dTf^D}{dt} = \frac{Tf^D - Tf^U}{R^{DU}} + \frac{Tf^D - Tb}{R^{DD*}} \quad \text{B.4}$$

$$-\pi r_{pi}^2 \rho_f c_f \frac{dTf^U}{dt} = \frac{Tf^U - Tf^D}{R^{DU}} + \frac{Tf^U - Tb}{R^{UU*}} \quad \text{B.5}$$

Où Tf^U et Tf^D représentent la température du fluide caloporteur respectivement montant et descendant dans les tuyaux, dz la distance de maillage, Tb la température de l'EG, R^{DU} , R^{DD} , R^{UU} représentent les résistances thermiques équivalentes entre le tuyau montant et le tuyau descendant, entre le tuyau descendant et la paroi de l'EG et entre le tuyau montant et la paroi de l'EG respectivement. Ces résistances sont calculées par les méthodes avancées par Lee & Lam (2008) et Liu et al. (2020). La variable \dot{m} représente le débit massique du fluide caloporteur, c_f sa capacité

thermique et ρ_f sa densité. La variable qb représente la charge thermique affectée par l'EG et peut être calculée en faisant :

$$qb = \dot{m}c_f(Tf^U - Tf^D) \quad \text{B.6}$$

En ce qui concerne la température initiale du sol et sa température non perturbée à un nœud à une profondeur z et à un temps τ (Xing, 2014):

$$T_s(z, \tau) = T_{s,av} - \sum_{n=1}^2 e^{-z \sqrt{\frac{n\pi}{a^d t_p}}} T_a^n \cos\left(\frac{2n\pi}{t_p}(\tau - PL_n) - z \sqrt{\frac{n\pi}{a^d t_p}}\right) \quad \text{B.7}$$

Où $T_{s,av}$ est la température moyenne annuelle du sol à différentes profondeurs et instants en °C, z la profondeur en m, a^d la diffusivité thermique du sol, t_p la période du cycle de température du sol en jours (365), τ le temps de l'année en jour commençant le premier janvier, T_a^n est l'amplitude de surface d'ordre n qui peut être présumé quand n est égal à 1 comme la moitié de la différence entre la température moyenne mensuelle maximale et le minimale pendant l'année et PL_n est le déphasage d'ordre n dans le cycle de température du sol. Le terme de source de chaleur interne lié à l'EG est :

$$Q = \frac{1}{8dV} q_{fac} qb \quad \text{B.8}$$

Où Q est la puissance volumétrique de l'EG (W/m^3), dV le volume de la région de contrôle et qb la charge de l'EG (W). En ce qui concerne q_{fac} , son rôle est de prendre en compte la géométrie cylindrique de l'EG dans un repère cartésien est ce terme est égal à 1.047 (Lee & Lam, 2008). Pour le terme de source interne qui incorpore les transferts de chaleur en surface, ce terme H_i prend la forme (Sofyan, Hu, Kotousov, Riayatsyah, & Hamdani, 2020):

$$H_i = \rho_s c_s \frac{dT_s}{dt} \quad \text{B.9}$$

Où T_s est la température du sol non perturbé qui est calculée en utilisant l'équation B.7. L'équation B.1 est discrétisée en utilisant la méthode implicite à direction alternée en un instant donné utilisant

deux pas de temps intermédiaires ($n, n+1/3, n+2/3, n+1$) dans les directions x et z respectivement comme (Douglas & Gunn, 1964):

- Dans la direction x pour le pas de n à $n+1/3$

$$\begin{aligned} \frac{T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} = a & \left[\frac{1}{2} \left(2 \frac{T_{i-1,j,k}^n \Delta x_{i+1} - T_{i,j,k}^n (\Delta x_{i+1} + \Delta x_{i-1}) + T_{i+1,j,k}^n \Delta x_{i-1}}{\Delta x_{i+1} \Delta x_{i-1} [\Delta x_{i+1} + \Delta x_{i-1}]} \right. \right. \\ & + 2 \frac{T_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} \Delta x_{i+1} - T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} (\Delta x_{i+1} + \Delta x_{i-1}) + T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} \Delta x_{i-1}}{\Delta x_{i+1} \Delta x_{i-1} [\Delta x_{i+1} + \Delta x_{i-1}]} \\ & + 2 \frac{T_{i,j-1,k}^n \Delta y_{j+1} - T_{i,j,k}^n (\Delta y_{j+1} + \Delta y_{j-1}) + T_{i,j+1,k}^n \Delta y_{j-1}}{\Delta y_{j+1} \Delta y_{j-1} [\Delta y_{j+1} + \Delta y_{j-1}]} \\ & \left. \left. + 2 \frac{T_{i,j,k-1}^n \Delta z_{k+1} - T_{i,j,k}^n (\Delta z_{k+1} + \Delta z_{k-1}) + T_{i,j,k+1}^n \Delta z_{k-1}}{\Delta z_{k+1} \Delta z_{k-1} [\Delta z_{k+1} + \Delta z_{k-1}]} \right] \\ & + \frac{a}{k} (Q(i, j, k) + H_i(k, t)) \end{aligned} \quad \text{B.10}$$

- Dans la direction y pour le pas de n à $n+2/3$

B.11

$$\begin{aligned}
\frac{T_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} &= a \left[\frac{1}{2} \left(2 \frac{T_{i-1,j,k}^n \Delta x_{i+1} - T_{i,j,k}^n (\Delta x_{i+1} + \Delta x_{i-1}) + T_{i+1,j,k}^n \Delta x_{i-1}}{\Delta x_{i+1} \Delta x_{i-1} [\Delta x_{i+1} + \Delta x_{i-1}]} \right. \right. \\
&+ 2 \frac{T_{i,j-1,k}^{n+\frac{2}{3}} \Delta y_{j+1} - T_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} (\Delta y_{j+1} + \Delta y_{j-1}) + T_{i,j+1,k}^{n+\frac{2}{3}} \Delta y_{j-1}}{\Delta y_{j+1} \Delta y_{j-1} [\Delta y_{j+1} + \Delta y_{j-1}]} \\
&+ \frac{1}{2} \left(2 \frac{T_{i,j-1,k}^n \Delta y_{j+1} - T_{i,j,k}^n (\Delta y_{j+1} + \Delta y_{j-1}) + T_{i,j+1,k}^n \Delta y_{j-1}}{\Delta y_{j+1} \Delta y_{j-1} [\Delta y_{j+1} + \Delta y_{j-1}]} \right. \\
&+ 2 \frac{T_{i,j-1,k}^{n+\frac{2}{3}} \Delta y_{j+1} - T_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} (\Delta y_{j+1} + \Delta y_{j-1}) + T_{i,j+1,k}^{n+\frac{2}{3}} \Delta y_{j-1}}{\Delta y_{j+1} \Delta y_{j-1} [\Delta y_{j+1} + \Delta y_{j-1}]} \\
&+ 2 \frac{T_{i,j,k-1}^n \Delta z_{k+1} - T_{i,j,k}^n (\Delta z_{k+1} + \Delta z_{k-1}) + T_{i,j,k+1}^n \Delta z_{k-1}}{\Delta z_{k+1} \Delta z_{k-1} [\Delta z_{k+1} + \Delta z_{k-1}]} \left. \right] \\
&+ \frac{a}{k} (Q(i,j,k) + H_i(k,t))
\end{aligned}$$

- Dans la direction z pour le pas de n à n+1

B.12

$$\begin{aligned}
\frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} = a & \left[\frac{1}{2} \left(2 \frac{T_{i-1,j,k}^n \Delta x_{i+1} - T_{i,j,k}^n (\Delta x_{i+1} + \Delta x_{i-1}) + T_{i+1,j,k}^n \Delta x_{i-1}}{\Delta x_{i+1} \Delta x_{i-1} [\Delta x_{i+1} + \Delta x_{i-1}]} \right. \right. \\
& + 2 \frac{T_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} \Delta x_{i+1} - T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}} (\Delta x_{i+1} + \Delta x_{i-1}) + T_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{3}} \Delta x_{i-1}}{\Delta x_{i+1} \Delta x_{i-1} [\Delta x_{i+1} + \Delta x_{i-1}]} \left. \right) \\
& + \frac{1}{2} \left(2 \frac{T_{i,j-1,k}^n \Delta y_{j+1} - T_{i,j,k}^n (\Delta y_{j+1} + \Delta y_{j-1}) + T_{i,j+1,k}^n \Delta y_{j-1}}{\Delta y_{j+1} \Delta y_{j-1} [\Delta y_{j+1} + \Delta y_{j-1}]} \right. \\
& + 2 \frac{T_{i,j-1,k}^{n+\frac{2}{3}} \Delta y_{j+1} - T_{i,j,k}^{n+\frac{2}{3}} (\Delta y_{j+1} + \Delta y_{j-1}) + T_{i,j+1,k}^{n+\frac{2}{3}} \Delta y_{j-1}}{\Delta y_{j+1} \Delta y_{j-1} [\Delta y_{j+1} + \Delta y_{j-1}]} \left. \right) \\
& + \frac{1}{2} \left(2 \frac{T_{i,j,k-1}^n \Delta z_{k+1} - T_{i,j,k}^n (\Delta z_{k+1} + \Delta z_{k-1}) + T_{i,j,k+1}^n \Delta z_{k-1}}{\Delta z_{k+1} \Delta z_{k-1} [\Delta z_{k+1} + \Delta z_{k-1}]} \right. \\
& + 2 \frac{T_{i,j,k-1}^{n+1} \Delta z_{k+1} - T_{i,j,k}^{n+1} (\Delta z_{k+1} + \Delta z_{k-1}) + T_{i,j,k+1}^{n+1} \Delta z_{k-1}}{\Delta z_{k+1} \Delta z_{k-1} [\Delta z_{k+1} + \Delta z_{k-1}]} \left. \right) \\
& + \frac{a}{k} (Q(i, j, k) + H_i(k, t))
\end{aligned}$$

Les équations B.2, B.3, B.4 et B.5 décrivant le profil de température dans l'EG sont discrétisées en respectivement:

$$-\dot{m}c_f \frac{Tf_{k+1}^D - Tf_k^D}{dz_k} = \frac{(Tf_k^D - Tf_{k+1}^D) - (Tf_k^U - Tf_{k+1}^U)}{2R^{DU}} + \frac{(Tf_k^D + Tf_{k+1}^D) - 2Tb_k}{2R^{DD}} \quad B.13$$

$$\dot{m}c_f \frac{Tf_{k+1}^U - Tf_k^U}{dz_k} = \frac{(Tf_k^U - Tf_{k+1}^U) - (Tf_k^D - Tf_{k+1}^D)}{2R^{DU}} + \frac{(Tf_k^U + Tf_{k+1}^U) - 2Tb_k}{2R^{UU}} \quad B.14$$

$$-\pi r_{p,i}^2 \rho_f c_f \frac{Tf_{k+1}^{D,n+1} - Tf_k^{D,n}}{\Delta t} = \frac{(Tf_k^{D,n+1} - Tf_k^{U,n+1})}{R^{DU}} + \frac{Tf_k^{D,n+1} - Tb_k^n}{R^{DD*}} \quad B.15$$

$$-\pi r_{p,i}^2 \rho_f c_f \frac{Tf_{k+1}^{U,n+1} - Tf_k^{U,n}}{\Delta t} = \frac{(Tf_k^{U,n+1} - Tf_k^{D,n+1})}{R^{DU}} + \frac{Tf_k^{U,n+1} - Tb_k^n}{R^{UU*}} \quad B.16$$

Les termes de charge de l'EG et de source interne prennent donc respectivement la forme :

$$qb_k = \dot{m}c_f [(Tf_{k+1}^U - Tf_k^U) - (Tf_{k+1}^D - Tf_k^D)] \quad B.17$$

$$Q(i, j, k) = \frac{1}{8\Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k} q_{fac} (qb_{k-1} + qb_k) \quad B.18$$

La source d'énergie interne caractérisant les variations de température en surface est écrite comme :

$$H_i(k, t) = \rho_s c_s \frac{T_s(z_k, t + \Delta t) - T_s(z_k, t)}{\Delta t} \quad B.19$$

Finalement, la température d'entrée du fluide pour le pas de temps suivant est prise comme :

$$T_{in}^{n+1} = T_{out}^n + \frac{Q_{applied}}{N_b ar \dot{m}c_f} \quad B.20$$

Où $Q_{applied}$ est la charge imposée sur le champ d'EG (W), N_b est le nombre d'EG et ar est égal à 1 ou 0 pour des arrangements d'EG respectivement en parallèle et en série.

ANNEXE C TYPE 557B

Le Type 557b modélise un EG vertical en U ayant une résistance thermique entre le fluide caloporteur et le sol au bord de l'EG connue et possédant un ou plusieurs puits. Le squelette essentiel du code utilisé dans ce Type a été écrit par Hellström (1989) et a été modifié à plusieurs reprises par différents auteurs pour obtenir la version actuelle utilisée par la librairie TESS dans TRNSYS18 au temps de l'écriture de ce document. Dans le chapitre 3 de son mémoire, Chapuis (2009) décrit rigoureusement le fonctionnement de ce Type et le paragraphe qui suit aborde les conditions initiales du sol et du volume de stockage ainsi que le préchauffage de ce volume. En effet, ces conditions ne sont pas bien documentées ou incomprises. Il s'agira donc de préciser certains paramètres (qui ne varient pas dans le temps) du Type 557b.

En premier lieu, il faut souligner que le Type 557b a initialement été développé pour modéliser les champs de puits pour stockage d'énergie thermique (BTES, Borehole Thermal Energy Storage en anglais). Tel que montré à la Figure C.1, la géométrie comporte un volume de stockage cylindrique contenant les puits géothermiques. Ce volume de stockage est entouré de couches de sol (numérotée 1,2, et 3 sur la Figure C.1) dont les propriétés peuvent être différentes de celles du volume de stockage. Tel que décrit par Chapuis (2009), le Type 557b utilise une combinaison de méthodes analytique et numérique pour déterminer les échanges thermiques dans le sol. Il est également possible de simuler quelques années de préchauffage du volume de stockage.

Pour la présente étude il est important de comprendre la façon dont la température initiale du sol à différents nœuds est évaluée. En mettant le paramètre 23 qui est le nombre d'années de préchauffage du volume de stockage à 0, le volume de stockage et le sol qui l'entoure ont la même température initiale au début de la simulation TRNSYS. Cette température est calculée dans la sous-routine INDAT2 et prend la forme :

$$X(I,J) = TSTAR + ZM(J) * TGRAD \quad C.1$$

Avec X étant la température du sol à un nœud donné, $TSTAR$ est le paramètre 21 étant à la fois la température à la surface du volume de stockage et la température de sol non perturbé sans gradient géothermique, $ZM(J)$ est la profondeur de ce nœud, et $TGRAD$ est le paramètre 22 désignant le gradient géothermique dans le sol.

Si le nombre d'années de préchauffage est supérieur à 0, le paramètre 23 est arrondi et est utilisé comme durée de préchauffage IPRE dans la sous-routine CHSIN. Tous les nœuds à l'intérieur du volume de stockage sont attribués une nouvelle température initiale TST prenant la forme :

$$TST = TCM + TCA * \sin\left(\frac{2\pi}{31536000}(TT + TCPH)\right) \quad C.2$$

Avec TCM étant la température moyenne de préchauffage égale à la moyenne entre les paramètres 24 et 25, TCA étant l'amplitude de la sinusoïde donc égale au paramètre 24, qui est la température de préchauffage maximale, moins TCM . TT est la variable de temps de préchauffage initialisée ici à 0 et $TCPH$ est le déphasage de la sinusoïde donc le paramètre 26 converti en secondes. Puis pour préchauffer le volume de stockage, l'équation C.2 est réutilisée pour chaque itération de préchauffage en incrémentant TT de 99 % le pas de temps global jusqu'à ce que TT arrive au nombre d'années de préchauffage. La façon d'obtenir ce pas de temps est expliquée par Chapuis (2009). Cependant, les seules zones affectées par cette variation sont les zones appartenant à la paroi du cylindre du volume de stockage (BTES). De plus, à la surface du sol, une couche « imaginaire » de sol assure le transfert de chaleur de l'atmosphère au sol par conduction en faisant :

$$TAIR = TAIRM + ATAIR * \sin\left(\frac{2\pi}{31536000}(TT + TAPH)\right) \quad C.3$$

Avec $TAIR$ étant la température de la couche superficielle du sol, $TAIRM$ la température moyenne de l'air pendant le préchauffage donc le paramètre 27, $ATAIR$ l'amplitude de variation de la sinusoïde donc le paramètre 28 et $TAPH$ le déphasage de cette sinusoïde donc le paramètre 29. La température de la paroi du cylindre du BTES et la température de la surface sont utilisés pour préchauffer le sol entourant le BTES. L'interaction thermique entre les différents nœuds est calculée numériquement pour chaque pas de temps de préchauffage, calculant la température des nœuds figurant dans les zones 1, 2 et 3 de la Figure C.1 et en suivant l'ordre de ces zones. Cette méthode numérique utilisée est expliquée dans le manuel de Hellström (1989). Il est important de remarquer que le cœur du BTES n'est pas affecté par le préchauffage et qu'aucun transfert

thermique entre les parois du BTES suivant le profil de température de l'équation C.2 et son intérieur est effectué. Par suite, l'intérieur du BTES maintient la température $TST0$:

$$TST0 = TCM + TCA * \sin\left(\frac{2\pi}{31536000} TCPH\right) \quad C.4$$

À la fin du préchauffage, les parois du BTES qui suivaient l'équation C.2 sont assignées une température égale à $TCMIN$ qui est la température de préchauffage minimale ou le paramètre 25. La raison de ce choix de température de parois pour la fin du préchauffage et le début de la simulation TRNSYS n'est pas claire mais elle a cependant un effet majeur sur l'énergie transmise au fluide caloporteur. En effet comme les parois du BTES font partie du volume de stockage, les extrémums supérieurs et inférieurs des puits contenant le fluide caloporteur sont en contact direct avec ces parois. Donc plus la différence entre la température initiale du cœur du BTES, étant déterminée par l'équation C.4, et $TCMIN$ est grande, plus l'hétérogénéité thermique rencontrée par le fluide caloporteur en traversant ces deux zones est grande. Enfin, quelques traces du code original de Hellström qui affiche les températures du sol autour des puits existe (juste avant la sous-routine BHRES) mais ne sont pas entièrement implémentés dans le Type 557b. Une avenue intéressante pour étudier plus profondément le Type 557b serait de réinstaurer cette partie du code original dans TRNSYS.

Tableau C.1 : Paramètres du Type 557b utilisés dans ce mémoire. Les paramètres non mentionnés ne sont pas utilisés. Le paramètre 19 dépend du fichier météo utilisé (AMY 1998-2017 ou RCP-85-20-49).

Numéro	Nom	Valeur	Unité
1	Storage Volume	3054,545445	m ²
2	Borehole Depth	140	m
3	Header Depth	1	m
4	Number of Boreholes	1	-
5	Borehole Radius	0.1016	m
6	Number of Boreholes in Series	1	-
7	Number of Radial Regions	1	-
8	Number of Vertical Regions	10	-
9	Storage Thermal Conductivity	2,5	W/m.k
10	Storage Heat Capacity	2200	kJ/m ³ /K
11	Fluid to Ground Resistance	0,03661	any
12	Negative of Pipe-to-Pipe Resistance	0	any
13	Fluid Specific Heat	4,19	kJ/kg.K
14	Fluid Density	1000	kg/m3
15	Insulation Indicator	0	-
19	Number of Simulation Years	22 ou 32	-
20	Maximum Storage Temperature	100	°C
21	Initial Surface Temperature of Storage Volume	7,773	°C
22	Initial Thermal Gradient of Storage	0,02	any
23	Number of Preheating Years	0	-
30	Number of Ground Layers	1	-
31	Thermal Conductivity of Layer	2,5	W/m.K
32	Heat Capacity of Layer	2200	any
33	Thickness of Layer	1000	m

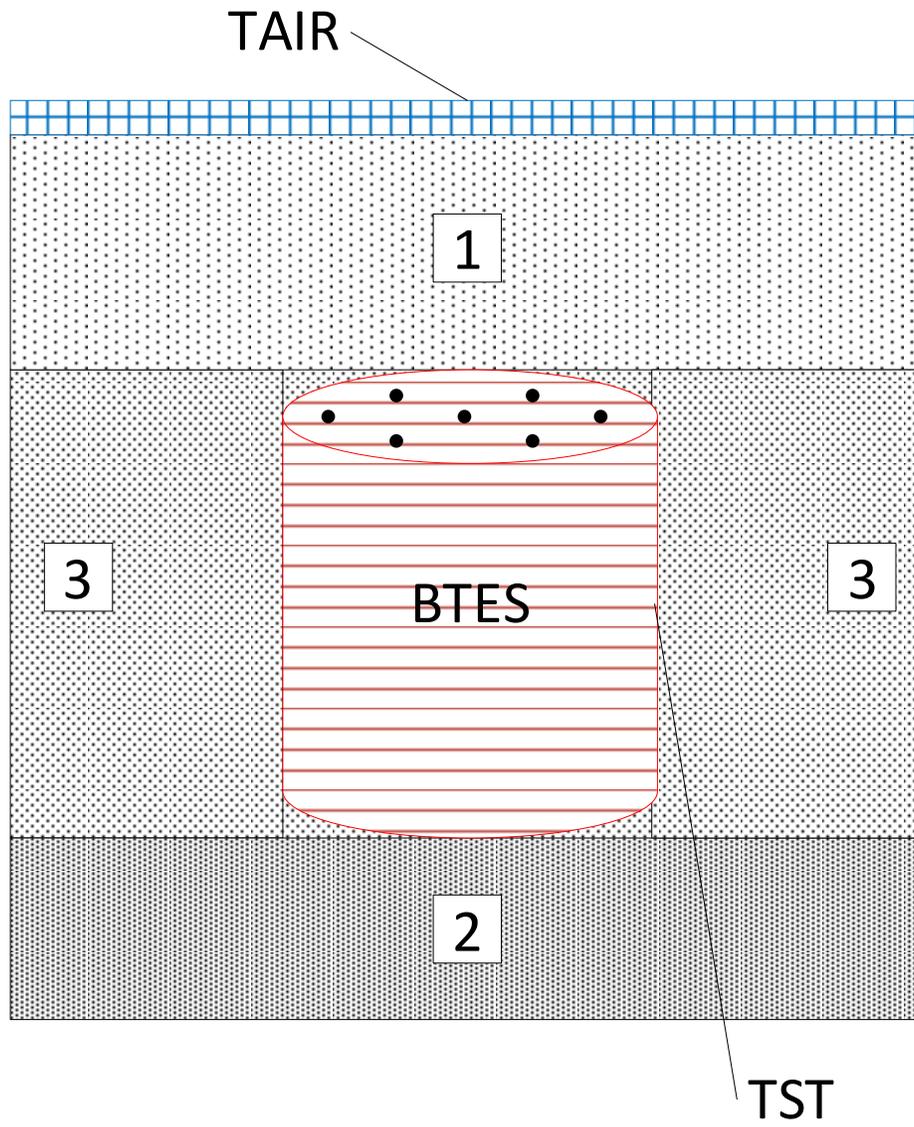


Figure C.1: Division des zones de préchauffage

ANNEXE D TYPE 952

Le Type 952 modélise un tuyau enfoui horizontalement dans le sol. La documentation principale expliquant le fonctionnement de cette composante se trouve dans le manuel de la librairie TESS pour TRNSYS (2013). Le transfert de chaleur entre le tuyau et le sol qui l'entoure est présumé être purement sous forme de conduction. Le modèle utilise une méthode de différences finie tridimensionnelle pour calculer le transfert de chaleur par conduction entre les différents volumes de contrôle.

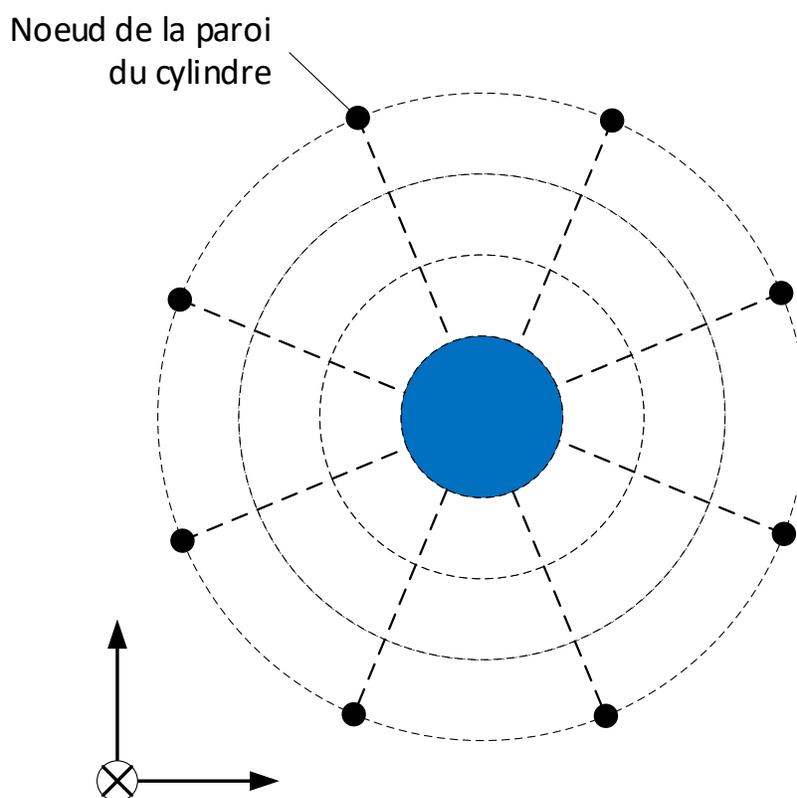


Figure D.1 : Coupe verticale du tuyau (bleu) et des volumes de contrôle qui l'entourent

Comme le montre la Figure D.1, les différents volumes de contrôle sont concentriques et répartis horizontalement suivant l'axe du tuyau. L'utilisateur du Type 952 a la possibilité de déterminer le nombre de nœuds (les intersections entre les différents segments pointillés dans la Figure D.1) qui divisent les volumes de contrôle. Ces nœuds sont catégorisés en 3 types : les nœuds axiaux qui sont parallèles à l'axe du tuyau, les nœuds radiaux qui sont orthogonaux à l'axe du tuyau et les nœuds circonférentiels qui appartiennent aux différents disques concentriques au tuyau. Par exemple, dans

la Figure D.1, le domaine comprend 3 niveaux de nœuds radiaux et 8 niveaux de nœuds circonférentiels pour un total de 24 nœuds. Les températures des différents volumes de contrôle (démarqués par les traits pointillés fins et gras de la Figure D.1) sont calculées en utilisant un bilan énergétique de la forme :

$$mC_p \frac{dT}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad \text{D.1}$$

Où m est la masse du volume de contrôle, C_p la capacité thermique de ce volume et T sa température. Q_{in} et Q_{out} désignent la puissance entrante et sortante du volume de contrôle respectivement. Par convention, Q_{in} suit le trièdre de la Figure D.1 tandis que Q_{out} est de sens opposé. La température du sol qui entoure les volumes de contrôle (ou température du sol non perturbé) est considérée in affectée par la chaleur transmise par ses volumes de contrôle et ne dépend que de la profondeur et du temps de l'année. En d'autres mots, la paroi du cylindre des volumes de contrôle est considérée comme une source ou un puits de chaleur. Par suite, la température de chaque nœud de la paroi du cylindre (montré dans la Figure D.1) des volumes de contrôle suit l'équation 3.1.18 avec le gradient géothermique g égal à 0. L'utilisateur du Type 952 doit alors insérer les valeurs de T_m , T_{max} , α et Φ comme paramètres d'entrés (voir l'équation 3.1.18). La température du sol autour des volumes de contrôle est alors prédéterminée au début de la simulation et ne dépend pas des conditions extérieures. Pour cette raison, un Type modifié du Type 952 est conçu pour prendre en considération l'effet de la température ambiante sur la température du sol non perturbé : le Type 8952.

ANNEXE E TYPE 8952

Le Type 8952 est une version modifiée du Type 952 qui a pour but de prendre en compte la variation de la température ambiante à la surface de l'EG. Le Type 8952 fonctionne essentiellement de la même manière que le Type 952 mais l'équation 3.1.18, interne au Type 952, utilisé pour calculer la température du sol non perturbé en fonction de la profondeur et pour chaque pas de temps de l'année, est remplacée. La nouvelle température du sol est calculée à l'extérieur du Type 8952 en utilisant une routine programmée sur Matlab à l'aide de la méthode numérique développée dans la partie 3.1 en imposant la température ambiante du fichier météo utilisé dans les différentes simulations comme conditions à la surface du sol. Ensuite, la température du sol aux différentes profondeurs est introduite à chaque pas de temps comme paramètre externe au Type 8952. Ce nouveau calcul est décrit aux paragraphes suivants.

Pour commencer, les distances R_n entre les différents nœuds radiaux et le centre du tuyau sont calculées en faisant :

$$R_n = e^{\frac{\ln(h+1)}{N_r+1}n} - 1 \quad \text{E.1}$$

Où h est la profondeur d'enfouissement du tuyau et N_r le nombre total de nœuds radiaux défini par l'utilisateur. Ensuite l'utilisateur du Type 8952 a à entrer les différentes distances D_n entre les nœuds comme paramètres du Type en faisant :

$$D_n = R_n \quad \text{si } n = 1 \quad \text{ou} \quad D_n = R_n - R_{n-1} \quad \text{si } n > 1 \quad \text{E.2}$$

Pour calculer la profondeur des différents nœuds radiaux et circonférentiels, il est requis de calculer l'angle A en degrés entre les différents nœuds circonférentiels en faisant :

$$A = \frac{180}{N_c} \quad \text{E.3}$$

Où N_c est le nombre de nœuds circonférentiels défini par l'utilisateur. Pour positionner les différents nœuds circonférentiels, il faut considérer la Figure D.1 comme une horloge puis se décaler d'un angle $\frac{A}{2}$ à partir de 12 heures dans le sens horaire pour placer le premier nœud circonférentiel. Le reste des nœuds sont ajoutés sur le demi-cercle de droite (de 12 heures à 6

heures) en se décalant successivement d'un angle A . Les nœuds du demi-cercle complémentaire sont assignés par symétrie. Donc lorsque l'utilisateur définit 4 nœuds circonférentiels, il est important de clarifier que le modèle prend en compte 4 nœuds dans le demi-cercle droit puis place 4 autres nœuds dans le demi-cercle gauche par symétrie pour un total de 8 nœuds circonférentiels. Il est par suite possible de calculer la profondeur P_{ij} de chacun des nœuds radiaux et circonférentiels dans le plan formé par ces nœuds en faisant :

$$P_{ij} = h - R_i * \cos\left(\frac{A}{2} + A * (j - 1)\right) \quad \text{où } i \in \llbracket 1; N_r \rrbracket \text{ et } j \in \llbracket 1; N_c \rrbracket \quad \text{E.4}$$

Ces profondeurs sont ensuite utilisées en premier lieu pour calculer le profil de température initial du sol en les insérant dans l'équation 3.1.18. L'utilisateur du Type 8952 doit modifier les valeurs initiales des températures en entrées (les entrées 3 à 3 + $N_r N_c$) du Type 8952 pour qu'elles correspondent à ces températures calculées. Ces températures en entrées du Type 8952 sont ensuite calculées à chaque pas de temps par le Type 155 qui a pour rôle d'introduire à TRNSYS la routine MATLAB à travers laquelle la méthode numérique unidimensionnelle de calcul de la température du sol est effectuée en prenant en entrée la température à la surface du sol.

Tableau E.1 : Paramètres du Type 8952 utilisés dans ce mémoire. Les paramètres non mentionnés ne sont pas utilisés.

Numéro	Nom	Valeur	Unité
1	Length of Buried Pipe	300	m
2	Inner Diameter of Pipe	0,0274	m
3	Outer Diameter of Pipe	0,0334	m
4	Thermal Conductivity of Pipe Material	1,5122	kJ/hr.m.K
5	Buried Pipe Depth	3	m
6	Thickness of Insulation	0	m
8	Density of Fluid	1000	kg/m ³
9	Thermal Conductivity of Fluid	2,16	kJ/hr.m.K
10	Specific Heat of Fluid	4,19	kJ/kg.K
11	Viscosity of Fluid	3,6	kg/m.hr
12	Initial Fluid Temperature	10	°C
13	Thermal Conductivity of Soil	9	kJ/hr.m.K
14	Density of Soil	2200	kg/m ³
15	Specific Heat of Soil	1	kJ/kg.K
19	Number of Fluid Nodes	100	-
20	Number of Radial Soil Nodes	4	-
21	Number of Axial Soil Nodes	10	-
22	Number of Circumferential Soil Nodes	4	-
23	Number of Disk Nodes	16	-
24	Radial Distance of Node -1	0,3195	m
25	Radial Distance of Node -2	0,4216	m
26	Radial Distance of Node -3	0,5563	m
27	Radial Distance of Node -4	0,7340	m

Tableau E.2 : Valeurs initiales des entrées du Type 8952 utilisés dans ce mémoire. Ces valeurs doivent être spécifiés avant le début de la simulation pour son bon fonctionnement.

Numéro	Nom	Valeur	Unité
1	Inlet Fluid Temperature	15	°C
2	Inlet Fluid Flowrate	0	kg/hr
3	Soil Temperature Mid Pipe	6,32	°C
4	Soil Temperature -1	5,98	°C
5	Soil Temperature -2	6,19	°C
6	Soil Temperature -3	6,46	°C
7	Soil Temperature -4	6,65	°C
8	Soil Temperature -5	5,07	°C
9	Soil Temperature -6	5,84	°C
10	Soil Temperature -7	6,76	°C
11	Soil Temperature -8	7,30	°C
12	Soil Temperature -9	3,64	°C
13	Soil Temperature -10	5,35	°C
14	Soil Temperature -11	7,12	°C
15	Soil Temperature -12	8,00	°C
16	Soil Temperature -13	1,33	°C
17	Soil Temperature -14	4,64	°C
18	Soil Temperature -15	7,55	°C
19	Soil Temperature -16	8,62	°C