



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Peoples Démocratique Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté of Sciences and Technologie
قسم الهندسة المدنية
Civil engineering département

N° d'ordre : M/GC/2024

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie civil

Spécialité : Structure

Thème :

*intérêts et Apports de l'énergie géothermique
superficielle aux bâtiments résidentiels*

Présenté par :

- HAMMADI KAMEL
- BERRADIA ALI

Soutenu Le 25/06/2024 Devant Le Jury Composé De

- **Président** : LAREDJ NADIA
- **Examineur** : MALIKI MUSTAPHA
- **Encadrant** : MISSOUM HANIFI
- **Invité** : BELHAMIDECHE KHEIRA

Année universitaire (2023/2024)

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nos remerciements à nos parents, pour leurs soutiens et leurs encouragements pendant toute la vie et qui continueront à nous aider dans tous les projets de l'avenir.

Ainsi que tous les membres de nos familles qui ont participé de près ou de loin à nous encourager et nous aider dans notre projet.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre professeur Mr. MISSOUM pour l'encadrement de ce mémoire son aide, sa patience et sa confiance qu'elle nous a accordée.

ce travail ne serait pas aussi enrichissant et n'aurait pu voir le jour sans Madame BELHAMIDECHE que nous tenons à remercier tout particulièrement pour sa patience, sa rigueur, sa disponibilité ainsi que son sens de l'écoute et de l'échange qui ont été d'une importance capitale durant la préparation de ce mémoire.

Nous tenons à remercier les membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Mes sincères remerciements vont également à tous les enseignants, du département de Génie Civil de l'université de Mostaganem, qui ont participé à notre formation.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon chère père charef

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non âmes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux : mon adorable mère nacira

A mes frères hichem et rachid qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A mon adorable petite sœur leila qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.

A tous mes nombreux amis de ma promoqui m'ont aidé pour l'élaboration de ce projet et pour la totalité des réussites atteintes dans ma vie.

Sans oublier mon binôme Ali pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet

KAMEL

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail A La mémoire de ma mère dont j'aurais souhaité partager ce moment de joie, repose en paix.

A mes chers parents qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui et qui m'ont soutenu depuis mon premier jour à l'école, aucun remerciement n'est à la hauteur d'exprimer votre dévouement et vos sacrifices.

A mes chers frères pour vos encouragements et gratitudes tout au long de ma vie, que du bonheur et de la réussite pour vous.

A mon binôme Kamel pour les moments vécus et les projets réalisés ensemble dans des ambiances inoubliables, A nos futurs projets.

A ma grande famille, mes cousins et mes tantes qui m'ont toujours soutenu dans mon cursus et dans ma vie.

A mes enseignants qui m'ont accompagnée et orienté durant mes études depuis le cycle primaire.

A mes nombreux amis qui m'ont aidé pour l'élaboration de ce projet et pour la totalité des réussites atteintes dans ma vie.

Ali

Résumé

L'utilisation de l'énergie géothermique superficielle pour chauffer ou climatiser les bâtiments résidentiels présente plusieurs avantages significatifs. Voici un résumé des principaux points à considérer :

Énergie Renouvelable et Propre : La géothermie superficielle utilise la chaleur naturelle stockée dans le sol ou les eaux souterraines, une ressource renouvelable et propre. Elle réduit ainsi la dépendance aux combustibles fossiles et diminue l'empreinte carbone des bâtiments.

Économies d'Énergie : En exploitant la chaleur constante du sol, les systèmes géothermiques peuvent réduire de manière significative les coûts énergétiques associés au chauffage et à la climatisation des bâtiments. Cela peut conduire à des économies substantielles à long terme pour les propriétaires.

Performance Énergétique Améliorée : Les systèmes géothermiques sont connus pour leur efficacité énergétique élevée. Ils peuvent fournir un chauffage et une climatisation uniformes et stables tout au long de l'année, indépendamment des fluctuations des conditions météorologiques extérieures.

Longévité et Fiabilité : Les composants des systèmes géothermiques sont généralement installés à l'intérieur des bâtiments ou sous terre, ce qui les protège des intempéries et de l'usure. Cela contribue à une durabilité accrue et à une réduction des besoins d'entretien comparé aux systèmes traditionnels.

Réduction des Émissions de Gaz à Effet de Serre : En remplaçant les systèmes conventionnels basés sur les combustibles fossiles, l'énergie géothermique aide à réduire les émissions de CO₂ et autres gaz à effet de serre, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique.

Adaptabilité et Polyvalence : Les systèmes géothermiques peuvent être adaptés à différents types de bâtiments résidentiels, qu'il s'agisse de maisons individuelles, d'immeubles à appartements ou de complexes résidentiels plus importants. Ils peuvent également être intégrés à des rénovations ou des nouvelles constructions.

Abstract

Using surface geothermal energy to heat or cool residential buildings has several significant advantages. Here is a summary of the main points to consider:

1. Renewable and Clean Energy: Surface geothermal energy uses natural heat stored in the ground or groundwater, a renewable and clean resource. It thus reduces dependence on fossil fuels and reduces the carbon footprint of buildings.

2. Energy Savings: By harnessing constant heat from the ground, geothermal systems can significantly reduce energy costs associated with heating and cooling buildings. This can lead to substantial long-term savings for homeowners.

3. Improved Energy Performance: Geothermal systems are known for their high energy efficiency. They can provide uniform and stable heating and cooling throughout the year, regardless of fluctuations in outdoor weather conditions.

4. Longevity and Reliability: The components of geothermal systems are generally installed inside buildings or underground, which protects them from bad weather and wear. This contributes to increased durability and reduced maintenance requirements compared to traditional systems.

5. Reduction of Greenhouse Gas Emissions: By replacing conventional systems based on fossil fuels, geothermal energy helps reduce CO2 and other greenhouse gas emissions, thereby contributing to the fight against change climatic.

6. Adaptability and Versatility: Geothermal systems can be adapted to different types of residential buildings, whether they are single-family homes, apartment buildings or larger residential complexes. They can also be integrated into renovations or new construction.

ملخص

إن استخدام الطاقة الحرارية الأرضية السطحية لتدفئة أو تبريد المباني السكنية له العديد من المزايا الهامة. وفيما يلي ملخص للنقاط الرئيسية التي يجب مراعاتها:

1. الطاقة المتجددة والنظيفة: تستخدم الطاقة الحرارية الأرضية السطحية الحرارة الطبيعية المخزنة في الأرض أو المياه الجوفية، وهي مورد متجدد ونظيف. وبالتالي فهو يقلل من الاعتماد على الوقود الأحفوري ويقلل من البصمة الكربونية للمباني.
2. توفير الطاقة: من خلال الاستفادة من الحرارة الثابتة من الأرض، يمكن لأنظمة الطاقة الحرارية الأرضية أن تقلل بشكل كبير من تكاليف الطاقة المرتبطة بتدفئة وتبريد المباني. وهذا يمكن أن يؤدي إلى وفورات كبيرة على المدى الطويل لأصحاب المنازل.
3. تحسين أداء الطاقة: أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية معروفة بكفاءتها العالية في استخدام الطاقة. يمكنها توفير تدفئة وتبريد موحد ومستقر طوال العام، بغض النظر عن التقلبات في الظروف الجوية الخارجية.
4. طول العمر والموثوقية: يتم تركيب مكونات أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية بشكل عام داخل المباني أو تحت الأرض، مما يحميها من سوء الأحوال الجوية والتآكل. ويساهم ذلك في زيادة المتانة وتقليل متطلبات الصيانة مقارنة بالأنظمة التقليدية.
5. الحد من انبعاثات الغازات الدفينة: من خلال استبدال الأنظمة التقليدية المعتمدة على الوقود الأحفوري، تساعد الطاقة الحرارية الأرضية على تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وغيره من الغازات الدفينة، مما يساهم في مكافحة التغير المناخي.
6. القدرة على التكيف وتعدد الاستخدامات: يمكن تكييف أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية مع أنواع مختلفة من المباني السكنية، سواء كانت منازل لأسرة واحدة أو مباني سكنية أو مجمعات سكنية أكبر. ويمكن أيضاً دمجها في التجديدات أو البناء الجديد.

Sommaire

Introduction générale :	14
<i>CHAPITRE I</i>	18
I-1. Introduction :.....	19
I-2. Les énergies renouvelables :	19
I-3. Description technique des différentes sources d'énergies renouvelables	22
I-3.1. Le soleil :.....	22
I-3.2. Types d'énergie solaire :	22
I-3-2.1. Le solaire photovoltaïque :.....	22
I-3-2.2. Le solaire thermique :	24
I-3-2.3. Potentiel solaire en Algérie :	25
I-3-3. L'éolien :.....	25
I-3-3.1. Potentiel éolienne en Algérie :	26
I-3-4. La petite hydroélectricité :	26
I-3-4.1. Potentiel hydroélectrique en Algérie :	28
I-3-5. La biomasse :	28
I-3-5. 1. Le Potentiel de la biomasse en Algérie :	30
I-3-6. La géothermie :	30
I-3-6.1. Potentiel géothermique en Algérie :	32
I-4. Avantages et inconvénients des énergies renouvelables :	32
I-5. Les énergies renouvelables dans le monde :	33
Conclusion :.....	34
<i>CHAPITRE II</i>	35
<i>Généralités sur la géothermie</i>	35
II-1. Introduction :.....	36
II-2. Principe :.....	36
II-3. Avantages/inconvénients :	37
II-3.1Avantage :	37
II-3.2 Inconvénients :	37
II-4. La Géothermie dans l'avenir :.....	38
II-5. Les différents types de géothermie :.....	38
II-5.1. La géothermie haute énergie	38

II-5.2. La géothermie moyenne énergie	38
II-5.3. La géothermie de basse énergie.....	39
II-5.4. La géothermie de très basse énergie	39
II-6.La géothermie dans le monde :	40
II-6.1. Les applications :	40
II-6.2.La capacité énergétique :	40
II-7. Forage géothermique :	41
II-7.1Avantage :	41
II-8. La géothermie en Algérie :	42
II-8 L'exploitation :	43
II-9.Géothermie superficielle :	44
II-9.1.Introduction :	44
II-9-2.Fonctionnement technique ou scientifique :	44
II-9-2.1. Fonctionnement :	45
II-9-2.2. Caractéristiques :	46
II-9-3. Le puits canadien ou puits provençal :	48
II-9-4. Avantages et inconvénients :	49
II-9-5. Le coefficient de performance COP :	50
II-9.6. Température initiale du sol :	51
<i>Chapitre III</i>	54
<i>TRANSFERT DE CHALEUR ENTRE LE FLUIDE ABSORBANT ET BÉTON/SOL</i>	54
III-1. Introduction :	55
III-3. Transfert de chaleur par convection :	58
III-4. Transfert de chaleur par convection forcée :	60
III-5. Simulations numériques :	64
III-6. PROJET PILOTE DE RECHERCHE A : CHAUFFAGE ET RAFFRAICHISSEMENT D'UN CENTRE DE RÉÉDUCATION :	65
III-7. Chauffage et climatisation d'un centre d'art :	67
III.8. RECOMMANDATIONS POUR LA PRATIQUE :	68
<i>Chapitre IV</i>	70
<i>Les pompes a chaleur</i>	70
IV-1.Introduction :	71
IV-2. Les différents types de pompe à chaleur :	72
IV-2.1Pompe à chaleur air / air :	72

IV-2.2 Pompe à chaleur air / eau :	73
IV-2.3 Pompe à chaleur sol / air :	74
IV-2.4 Pompe à chaleur sol / eau :	75
IV-2. 5 Pompe à chaleur eau / eau :	76
IV-2. 6 Pompes à chaleur géothermiques	77
IV-3. Cycle thermodynamique idéal du fluide qui circule dans la pompe à chaleur :	79
IV-3.1 Principe de fonctionnement :	79
IV-3.2 Notions de diagramme enthalpique :	80
IV-3.3 Description du cycle :	81
IV-4 Efficacité énergétique de la pompe à chaleur :	84
IV-4.1 Le coefficient de performance :	84
IV-4.2 Rentabilité et capacités de la pompe à chaleur avec électro compresseur :	86
IV-5 Les performances environnementales :	88
<i>Chapitre v</i>	90
V-1.Introduction :	91
V-2.Définition du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS :	92
V-3.Le modèle Mathématique :	92
V-3.1. Le transfert de chaleur dans les Tuyaux :	92
V-3.2. Le transfert de chaleur dans le sol :	93
V-3.3. Le transfert d'humidité dans le sol :	93
V-4.Résolution numérique :	93
V-4.1.Géométrie et maillage du domaine de calcul :	93
V-4.2.Les conditions initiales et limites :	96
V-4.2.1.Climatologie de la ville de Mostaganem :	96
V-4.2.2.Conditions limites du sol et de l'échangeur de chaleur :	97
V-5.Résultats et analyse :	97
V-6.Conclusion :	102
Conclusion générale :	104

Liste des figures :

Chapitre I

Figure I. 1: Panneaux solaires pour la production d'électricité.	22
Figure I. 2: Panneau solaire photovoltaïque : fonctionnement et description.	23
Figure I. 3 : Fonctionnement de l'énergie solaire thermique.	24
Figure I. 4: Les éoliennes qui produisent de l'électricité.	26
Figure I. 5: Principe de la centrale hydroélectrique.	28
Figure I. 6: la biomasse.	30
Figure I. 7: La géothermie énergie renouvelable sur les bâtiments.	32
Figure I. 8: Les énergies renouvelables dans le monde.	34

Chapitre II

Figure II. 1: Principe de la géothermie.	37
Figure II. 2: Schéma expliquant la géothermie haute énergie.	38
Figure II. 3 : Schéma expliquant la géothermie basse énergie.	39
Figure II. 4: La géothermie de très basse énergie.	40
Figure II. 5: Principales Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie.	42
Figure II. 6: Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur.	45
Figure II. 7: Schéma des pompes à chaleur à capteurs horizontaux et verticaux.	47
Figure II. 8: Schéma des pompes à chaleur sur nappes d'eau.	48
Figure II. 9: Schéma d'un puits canadien.	49
Figure II. 10: Le profil de Température dans le sol.	52

Chapitre III

Figure III. 1: Schéma de chauffage/refroidissement d'une petite maison familiale avec fondations énergétiques. D'autres systèmes géothermiques thermoactifs sont également indiqués (brandl 2006).	55
Figure III. 2: Transfert de chaleur du sol vers le fluide caloporteur dans le tuyau absorbeur d'un tas d'énergie (GW, eau souterraine).	56
Figure III. 3: vitesse d'écoulement et répartition de la température dans l'absorbeur tuyaux remplis de fluide caloporteur (brandl 2006).	57
Figure III. 4 : Viscosité cinématique en fonction de la température pour différents mélanges d'eau et d'Antifrogen L (brandl 2006).	58
Figure III. 5: Schéma d'une centrale géothermique avec des pieux énergétiques et un flux d'énergie pour COP _p = 4 de la pompe à chaleur. Coefficient de performance COP _p définissant le rendement de la pompe à chaleur (brandl 2006).	61
Figure III. 6 : Distribution de la vitesse d'écoulement dans les conduites (parabole de Hagen-Poiseuille).	62
Figure III. 7: Conditions de chaleur à la paroi d'un tuyau d'absorbeur pour : (a) une température constante ; b) densité de flux de chaleur constante (brandl 2006).	63
Figure III. 8: Transfert de chaleur de la paroi du tuyau absorbeur au caloporteur fluide pour différentes conditions. Numéro Prandtl Pr = 75 (brandl 2006).	64

Figure III. 9: Schéma d'un système énergétique pour une maison ; symboles pour études paramétriques (brandl 2006).....	65
Figure III. 10: Plan du centre de rééducation de Bad Schallerbach, Autriche, avec les fondations A à J et une partie des murs de soutènement, équipés de pieux énergétiques. L'aire F repose sur une fondation de radeau sur pilotis ; les autres zones ne sont fondées que sur des radeaux (brandl 2006) .	66
Figure III. 11: Vue partielle d'un mur de pieux d'énergie ancré sur le côté en amont du bâtiment, faisant partie du système de chauffage/rafraichissement correspond à la section transversale A-A (brandl 2006) .	67
Figure III. 12: Schéma d'essai d'un « puits d'énergie » avec GB 2/97 comme puits d'extraction de chaleur et GB 4/97 comme puits de chaleur puits (brandl 2006).....	69

Chapitre IV

Figure IV. 1: les avantages et les inconvénients de différentes sources d'énergie.	72
Figure IV. 2: Pompe à chaleur air / air.....	73
Figure IV. 3: Pompe à chaleur air / eau.	74
Figure IV. 4: Pompe à chaleur sol / air (Captage horizontal).....	75
Figure IV. 5: Pompe à chaleur sol / air (Captage vertical).....	75
Figure IV. 6: Pompe à chaleur sol / eau.....	76
Figure IV. 7: Pompe à chaleur eau / eau.....	77
Figure IV. 8: Schéma de la pompe à chaleur géothermique (en mode chauffage).	78
Figure IV. 9: Diagramme enthalpique.	81
Figure IV. 10: cycle frigorifique en rapport avec le diagramme enthalpique.....	82
Figure IV. 11: Variation de l'efficacité des pompes à chaleur.....	86
Figure IV. 12: Les émissions de CO2 pour les différentes sources d'énergie.	88

Chapitre V

Figure V. 1: Domaine et geometrie.....	94
Figure V. 2: Temperature du sol et du fluid caloporteur.....	95
Figure V. 3: Température en 2023 à Mostaganem.....	96
Figure V. 4: Précipitation en 2023 à Mostaganem.....	97
Figure V. 5: La variation de la charge de pression en fonction de la profondeur.....	98
Figure V. 6: Conductivité thermique e en fonction de la teneur en eau.....	99
Figure V. 7: Capacité thermique en fonction de la teneur en eau.....	99
Figure V. 8: Les variations saisonnières de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps.....	100
Figure V. 9: les températures d'entrée et de sortie de l'air pour l'échangeur de chaleur air-sol.	101
Figure V. 10 : Le coefficient de performance en mode de chauffage et de rafraichissement.	101
Figure V. 11 : Le taux d'échange de chaleur en mode de chauffage et de rafraichissement.....	102

Liste des tableaux :

Chapitre I

Tableau I. 1: les différentes sources renouvelables employées à des fins énergétiques21

Chapitre II

Tableau V. 1 : Les propriétés hydro thermiques du sol.....95

Tableau V. 2 : Paramètres physiques de l'échangeur de chaleur.....95

Références bibliographiques

- Aresti, L., Christodoulides, P., & Florides, G. (2018). A review of the design aspects of ground heat exchangers. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 92, pp. 757–773). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.053>
- Association Française des Professionnels de la Géothermie, & syndicat des énergies renouvelables. (2020). *LA GÉOTHERMIE DE SURFACE*. www.afpg.asso.fr
- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81–122. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81>
- Cunha, R. P., & Bourne-Webb, P. J. (2022). A critical review on the current knowledge of geothermal energy piles to sustainably climatize buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158(January). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112072>
- Lebbihiat, N., Atia, A., Arıcı, M., & Meneceur, N. (2021). Geothermal energy use in Algeria: A review on the current status compared to the worldwide, utilization opportunities and countermeasures. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 302). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126950>
- Marwan, C. (2012). Modélisation, conception et étude expérimentale d'une pompe à chaleur industrielle à eau à haute température. *Thesis*.
- Melissa Climo, L. L. B. C. S. B. (2012). *The rise and rise of geothermal heat pumps in New Zealand*. <https://www.researchgate.net/publication/316919670>
- Mustafa Omer, A. (2008). Ground-source heat pumps systems and applications. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 12, Issue 2, pp. 344–371). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.003>
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2014). General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. In *Energy and Buildings* (Vol. 70, pp. 441–454). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>
- Self, S. J., Reddy, B. V., & Rosen, M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*, 101, 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.048>
- Valancius, R., Singh, R. M., Jurelionis, A., & Vaiciunas, J. (2019). A Review of Heat Pump Systems and Applications in Cold Climates. *Energies*.

Les logiciels :

- *Comsol Multiphysics*

Introduction générale :

L'énergie géothermique superficielle représente une formidable opportunité pour répondre aux besoins énergétiques des bâtiments résidentiels de manière efficace, durable et respectueuse de l'environnement. Cette forme d'énergie renouvelable exploite la chaleur emmagasinée dans le sol à faible profondeur, généralement jusqu'à quelques dizaines de mètres, pour chauffer ou refroidir les habitations. Cette introduction générale explorera les avantages et les intérêts de l'utilisation de l'énergie géothermique superficielle dans le secteur résidentiel.

D'abord, l'un des principaux attraits de cette technologie est sa durabilité. Contrairement aux sources d'énergie fossile qui s'épuisent avec le temps, la chaleur du sol constitue une ressource inépuisable. En outre, son exploitation n'entraîne pas de rejets de gaz à effet de serre ou de polluants atmosphériques, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique et à la préservation de la qualité de l'air.

Ensuite, l'énergie géothermique superficielle offre une grande stabilité des coûts à long terme. Une fois le système installé, les dépenses liées à son fonctionnement sont considérablement réduites par rapport aux combustibles fossiles, dont les prix sont souvent soumis à des fluctuations importantes sur le marché mondial. Cette stabilité financière représente un avantage significatif pour les propriétaires de bâtiments résidentiels, leur offrant une plus grande prévisibilité et une meilleure maîtrise de leurs dépenses énergétiques.

De plus, l'utilisation de l'énergie géothermique superficielle peut contribuer à réduire la dépendance aux combustibles fossiles importés, renforçant ainsi la sécurité énergétique des communautés locales et des nations dans leur ensemble. En favorisant l'indépendance énergétique, cette technologie offre également une plus grande résilience face aux perturbations extérieures telles que les fluctuations des prix du pétrole ou les conflits géopolitiques.

Enfin, l'adoption de systèmes géothermiques superficiels peut également générer des retombées économiques positives pour les communautés locales, en stimulant la création d'emplois dans le secteur des énergies renouvelables et en favorisant le développement de compétences spécialisées dans l'installation et la maintenance de ces systèmes.

En somme, l'apport d'énergie géothermique superficielle aux bâtiments résidentiels présente un ensemble d'avantages significatifs, allant de la durabilité environnementale à la stabilité

financière, en passant par la sécurité énergétique et le développement économique local. Ces avantages font de cette technologie une solution attrayante et prometteuse pour répondre aux défis énergétiques du XXI^e siècle tout en créant un avenir plus propre, plus durable et plus résilient pour les générations futures.

Notation

T = température

η = Le coefficient de proportionnalité est la viscosité

A = La section intérieure du tuyau

ρ_F = La densité du fluide

C_{P-f} = La capacité thermique spécifique du fluide

T_f = La température du fluide

u_f = La vitesse d'écoulement du fluide

k_f = La conductivité thermique du fluide

f_D = Le coefficient de perte de charge linéaire de Darcy

d_h = Le diamètre hydraulique

h_{int} = Le coefficient de transfert thermique du film

Z = Le périmètre intérieur de la conduite

T_{i-p} = La température intérieure de la conduite

Q = La densité de flux de chaleur

λ = La conductivité du fluide en mouvement

x = La coordonnée locale

q_w = La densité de flux de chaleur au niveau de la paroi du tuyau

α = Le coefficient de transfert de chaleur

Nu = Le nombre de Nusselt

Re = Le nombre de Reynolds

ρ = La masse volumique

C = La capacité thermique spécifique

Pr = Le profil de vitesse le long d'un chemin d'écoulement x

Q_{HP} = La puissance thermique (capacité) de la pompe à chaleur

P_e = La puissance d'entraînement de la pompe à chaleur

Q_0 = La puissance frigorifique de la pompe à chaleur

η_g = Le rendement global

ρ_s = la densité du sol

C_{ps} = la capacité thermique du sol,

k_s = la conductivité thermique du sol,

T_s = la température du sol (°C),

ρ_w = le poids volumique de l'eau,

C_{pw} = la capacité thermique spécifique de l'eau,

u_w = la vitesse de l'eau dans le sol

Q_s = la source de

ψ = La capacité spécifique d'humidité

H_p = La charge hydraulique (succion)

K = La conductivité hydraulique

k_r = La conductivité hydraulique relative

H_k = La charge cinétique.

CHAPITRE I

Les énergies renouvelables

I-1. Introduction :

Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstitués plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux **énergies fossiles** dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine.

Les énergies renouvelables sont également parfois désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres », par abus de langage. En effet, si les énergies renouvelables ont bien souvent des avantages écologiques, elles ne sont pas pour autant « vertes » ou « propres » dans le sens où elles ont aussi des conséquences environnementales importantes.

I-2. Les énergies renouvelables :

Dans ce tableau on a les types de l'énergie renouvelable

Source	Moyens de captation	Emploi
Thermique	• serres, murs capteurs	• chauffage
	• capteurs solaires basse température • capteurs solaires haute température	• eau chaude sanitaire • chauffage par le plancher • électricité injectée dans le réseau • chaleur à très haute température dans un Four
Eolien	• moulin à vent	• force mécanique (mouture)

Chapitre I : l'énergie renouvelable

		de céréales...)
	• éolienne mécanique	• force mécanique (pompage de l'eau)
	• aérogénérateur	• électricité directe ou stockée en batteries • électricité injectée dans le réseau
Hydraulique	• moulin à eau	• force mécanique (mouture de céréales...)
	• petite centrale hydroélectrique • grande centrale hydroélectrique	• électricité directe ou stockée en batteries • électricité injectée dans le réseau • électricité injectée dans le réseau
	• marémotrice (courants marins et vagues)	• électricité injectée dans le réseau
Photovoltaïque	• cellules photovoltaïques	• électricité directe ou stockée en batteries • électricité injectée dans le réseau
Biomasse	• distillerie, unité	• biocarburants pour les

Chapitre I : l'énergie renouvelable

	d'estérification (blé, betterave, colza, tournesol)	transports
	• chaudière biocombustibles (bois, sciure, paille, rafles de maïs...)	• chauffage • électricité (cogénération) injectée dans le réseau
	• bio digesteur, méthaniser (déchets organiques, poubelles)	• biogaz pour les transports, pour le chauffage ou l'électricité
Géothermie	• pompes à chaleur (source à moins de 30 °C)	• chauffage • climatisation
	• centrales basse et moyenne énergie (130 °C à 150 °C)	• chauffage
	centrales haute énergie (plus de 150 °C)	• chauffage • électricité injectée dans le réseau

Tableau I. 1: les différentes sources renouvelables employées à des fins énergétiques

I-3. Description technique des différentes sources d'énergies renouvelables

I-3.1. Le soleil :

Le rayonnement entrant peut utiliser principalement de deux manières. Le rayonnement solaire est directement converti en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques et le rayonnement solaire est converti en énergie thermique puis en électricité ou en d'autres applications. De nombreux concepts différents explorés dans une tentative d'exploiter l'énergie du soleil, avec le plus il convient de noter le récepteur central, le photovoltaïque, les collecteurs paraboliques et le Fresnel linéaire réflecteur, la cheminée solaire. A peine 0.01% de l'énergie solaire annuelle l'énergie atteignant la Terre peut satisfaire les besoins énergétiques du monde entier



Figure I. 1: Panneaux solaires pour la production d'électricité.

I-3.2. Types d'énergie solaire :

I-3-2.1. Le solaire photovoltaïque :

Le solaire photovoltaïque fut développée à la fin des années 50 dans le cadre de programmes spatiaux pour lesquels il fallait disposer d'une source d'énergie fiable et inexorable, la technologie photovoltaïque (PV) est à présent utilisée pour des applications terrestres, comme l'alimentation d'habitations isolées ou dans le cadre de panneaux installés sur des bâtiments et reliés au réseau électrique déjà existant. Le fonctionnement des dispositifs photovoltaïques se

Chapitre I : l'énergie renouvelable

base sur la capacité de certains matériaux semi-conducteurs, traités spécialement, de convertir l'énergie de la radiation solaire en énergie électrique (courant continu) sans avoir recours à des organes mécaniques en mouvement. Le matériel semi-conducteur le plus couramment employé dans ce but est la silice. Le composant de base d'une installation PV est la cellule photovoltaïque, capable de reproduire environ 1,5 W de puissance en conditions standards, c'est à dire à une température de 25°C et soumise à une puissance de la radiation égale à 1000 W/m². La puissance en sortie d'un dispositif PV quand celui-ci travaille en conditions standards prend le nom de puissance de pic (WP) et est une valeur qui est utilisée comme référence. Le gain électrique réel en fonctionnement est en réalité inférieur à la valeur de pic à cause des températures plus élevées et des valeurs plus basses de la radiation. Plusieurs cellules assemblées et reliées entre elles en une seule structure unique forment le module photovoltaïque.

Le module PV traditionnel est constitué d'une liaison en série de 36 cellules pour obtenir une puissance en sortie égale environ à 54 Watt. Mais aujourd'hui, surtout pour des exigences architectoniques, les producteurs mettent sur le marché des modules constitués d'un nombre de cellules bien plus élevé et donc, de puissance plus élevée, jusqu'à 200 Watt pour chaque module. Selon la tension nécessaire à l'alimentation des installations électriques, plusieurs modules peuvent être reliés en série en une chaîne. La puissance électrique réclamée détermine ensuite le nombre de chaînes à relier en parallèle pour réaliser un générateur PV.



Figure I. 2: *Panneau solaire photovoltaïque : fonctionnement et description.*

I-3-2.2. Le solaire thermique :

La technologie pour l'utilisation thermique de l'énergie solaire a atteint une maturité et une fiabilité telle qu'elle peut rentrer à présent parmi les moyens les plus rationnels et propres pour chauffer l'eau ou l'air à usage domestique et productif.

La radiation solaire, malgré sa faible densité (qui atteint 1kW/m^2 seulement dans le cas des journées ensoleillées) reste la source énergétique la plus abondante et propre sur la surface terrestre. Le rendement des panneaux solaires a augmenté de 30% au cours de la dernière décennie, rendant ainsi compétitives les applications dans le bâtiment, la construction d'habitations et de résidences, et l'agriculture.

L'application la plus commune est celle du capteur solaire thermique utilisé pour réchauffer l'eau courante.

Un mètre carré de panneau solaire peut réchauffer à $45\text{-}60^\circ\text{C}$ entre 40 et 300 litres d'eau en une journée selon le rendement (celui-ci varie en fonction des conditions climatiques et de la typologie de collecteur, entre 30 et 80%).

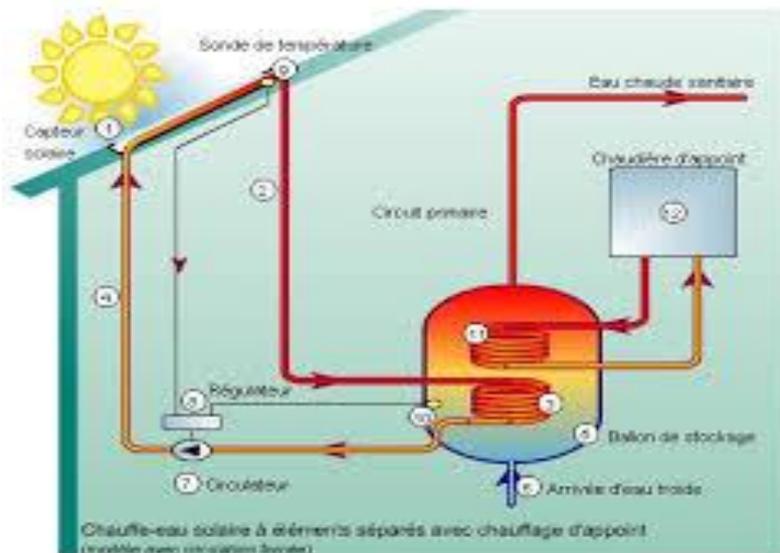


Figure I. 3 : Fonctionnement de l'énergie solaire thermique.

I-3-2.3. Potentiel solaire en Algérie :

De par sa situation géographique, Le pays possède un potentiel très important en énergie solaire. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kW h sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kW h.m⁻²an⁻¹ au Nord et 2263 kW h.m⁻²an⁻¹ au Sud du pays. Ce qui correspond à une capacité électrique 8 fois supérieur aux réserves de gaz naturel du pays, et au plus grand champ solaire du monde d'une manière globale, l'Algérie dispose d'un potentiel énergétique solaire d'environ 169 900 TW h.an⁻¹, soit 3900 fois sa consommation actuelle en électricité pour le CSP et 13.9 TW h.an⁻¹

I-3-3. L'éolien :

Les aérogénérateurs convertissent la force du vent en électricité, précieuse pour alimenter les sites isolés, mais aussi les grands réseaux nationaux. Les éoliennes modernes connaissent un important succès, avec à la clef des progrès technologiques et économiques remarquables depuis ces 20 dernières années. Les plus grands industriels sont danois et allemands. En 1999, le marché mondial des grandes éoliennes reliées au réseau électrique a augmenté de 38 % (3695 MW supplémentaires installés), la moyenne sur les quatre dernières années étant de 30 %. L'électricité éolienne est la moins coûteuse des utilisations actuelles des énergies renouvelables. Elle est "presque" compétitive, comparée à l'électricité issue des énergies traditionnelles.

De petites éoliennes, mécaniques et non productrices de courant, sont également utilisées pour pomper l'eau dans les pays en développement ou touchés par de faibles pluviométries.



Figure I. 4: Les éoliennes qui produisent de l'électricité.

I-3-3.1. Potentiel éolienne en Algérie :

La ressource éolienne en Algérie est caractérisée par de fortes variations d'un endroit à l'autre, 78% de la surface de l'Algérie est caractérisée par des vitesses supérieures à 3 m. s^{-1} avec environ 40% de ces vitesses dépassant 5 m. s^{-1} . La région Sud est caractérisée par des vitesses plus élevées (plus de 6 ms.^{-1}) que la région Nord, ce qui la rend favorable à l'utilisation de l'énergie éolienne comme les parcs éoliens ou les systèmes hybrides

I-3-4. La petite hydroélectricité :

Elle désigne les centrales ne dépassant pas 10 MW de puissance. Des turbines installées sur les cours d'eau utilisent la force motrice des chutes pour générer de l'électricité. Celle-ci est injectée dans le réseau où alimentent des sites qui n'y sont pas raccordés. Les petites centrales avec les grands barrages et les usines marémotrices forment la filière hydraulique, deuxième source d'énergie renouvelable dans le monde.

Les installations hydrauliques exploitent l'énergie potentielle mécanique contenue dans un débit d'eau, disponible à un certain niveau par rapport à celui où sont positionnées les turbines. La puissance d'une installation hydraulique dépend de deux paramètres : le saut(c'est à dire la différence entre le niveau auquel est disponible la ressource hydrique et le

Chapitre I : l'énergie renouvelable

niveau auquel l'eau est restituée après un passage à travers la turbine) et le débit (la masse d'eau qui passe à travers la machine, exprimée par unité de temps).

Sur la base de la puissance nominale de la centrale, les installations hydrauliques se divisent en :

- Micro installations (puissance inférieure à 100 kW)
- Mini installations (puissance comprise entre 100 et 1000 kW)
- Petites installations (puissance comprise entre 1000 et 10000 kW)
- Grandes installations (puissance supérieure à 10000 kW)

En général, beaucoup d'installations de petites tailles sont réalisées dans des zones démontées sur des cours d'eau à régime torrentiel ou permanent et l'introduction du contrôle à distance, de la surveillance à distance et de la commande automatique permet de les utiliser à pleine productivité en économisant sur les coûts de personnel de gestion, qui se limite souvent à l'entretien périodiques. A énergie produite égale, une centrale hydroélectrique qui génère 6 GWh permet de réduire l'émission de dioxyde de carbone de 4000 tonnes/an par rapport à une centrale au charbon.

Pour une production de 1900 GWh/an, celle qui serait réalisée en développant le potentiel cité ci-dessus, la réduction de dioxyde de carbone serait de 1,27 Matonnes/an et 3800 tonnes d'oxyde d'azote, en plus des 535 tonnes de particules diverses.

Un impact sur l'environnement des installations est cependant lié à la transformation du territoire et à la dérivation ou captation des ressources hydriques de corps hydriques superficiels. Ainsi, le flux minimum vital constitue un élément d'évaluation important pour l'estimation de l'incidence réelle qu'ont les dérivations sur les corps hydriques concernés.

En général, les installations mini hydro présentent un impact plus faible que celles de dimensions supérieures car elles s'insèrent à l'intérieur de schémas hydriques déjà existants et donc, éventuellement, déjà caractérisés par un impact limité.

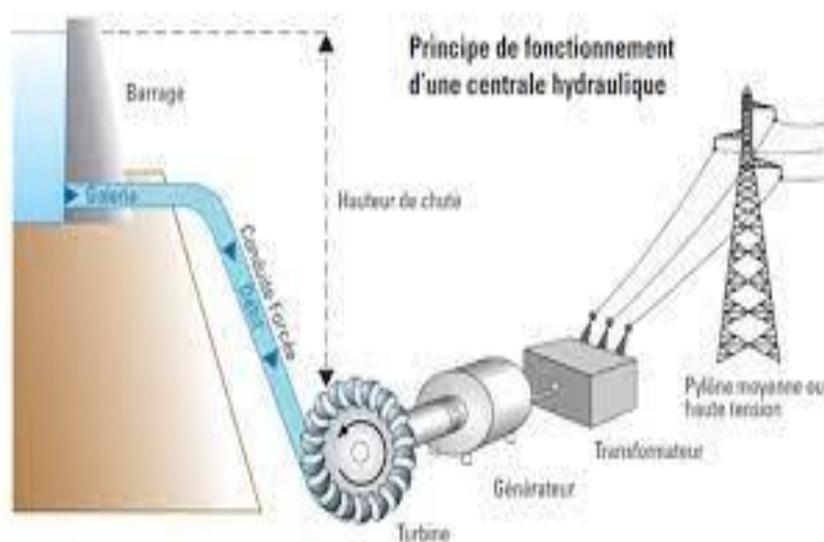


Figure I. 5: Principe de la centrale hydroélectrique.

I-3-4.1. Potentiel hydroélectrique en Algérie :

Les quantités globales de chutes de pluies tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m³, mais finalement profitent peu au pays en raison du nombre réduit de jours de précipitation, des concentrations sur des espaces limités, de la forte évaporation et de l'évacuation rapide vers la mer. Schématiquement, les ressources de surface décroissent du Nord au Sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m³ dont environ 2/3 pour les ressources en surface. 103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation

I-3-5. La biomasse :

La biomasse est un terme qui réunit une grande quantité de matériaux, de nature extrêmement hétérogène.

La biomasse utilisable à des fins énergétiques correspond à tous les matériaux organiques pouvant être employés directement comme combustibles, soit transformés en autres substances (solide, liquide ou gazeuse), d'utilisation plus facile dans les installations de conversion. D'autres formes de biomasses peuvent également être constituées par des résidus de cultures destinées à l'alimentation humaine ou animale (paille) ou de plantes cultivées seul but énergétique.

Chapitre I : l'énergie renouvelable

Les types de biomasse les plus importants sont les résidus forestiers, les restes d'industrie de transformation du bois, les restes des entreprises zootechniques, les restes des marchés et les résidus ménagers solides.

La biomasse représente la forme la plus sophistiquée d'accumulation de l'énergie solaire.

Cela permet en effet aux plantes de convertir le CO₂ atmosphérique en matière organique, à travers le processus de photosynthèse, durant leur croissance. De cette manière, environ 2·10¹¹ tonnes de carbone sont fixées globalement par an, avec un contenu énergétique de l'ordre de 70·10³ Mtep.

L'utilisation des biomasses à des fins énergétiques ne contribue pas à l'effet de serre puisqu'el quantité de CO₂ relâché durant la décomposition, ou la conversion énergétique est équivalente à celle absorbée durant la croissance de la biomasse même. Il n'y a donc aucune contribution nette à l'augmentation du niveau de CO₂ dans l'atmosphère.

□ **Bois énergie** : il s'agit de l'énergie renouvelable la plus utilisée dans le monde. Essentiellement développées autour des usages thermiques, les applications utilisant le bois comme combustible s'étendent des chaudières individuelles aux installations collectives en passant par des chaufferies industrielles de plus de 15 MW de puissance unitaire.

□ **Biocarburants** : le développement des biocarburants est souvent corrélé aux cycles de variation des prix du baril de pétrole. Aujourd'hui éthanol (betterave, blé...) et biodiesel (colza, tournesol...) offrent des avantages environnementaux appréciables dans le contexte de la lutte contre l'effet de serre. L'Union européenne projetted'atteindre une production de 17 millions de tonnes de biocarburant par an en 2010 par rapport au million produit actuellement.

□ **Biogaz** : véritablement située à la charnière des problèmes environnementaux et énergétiques, l'exploitation du biogaz en Europe est devenue un secteur industriel à part entière. Les déchets de l'agro-industrie, de l'agriculture, des décharges d'ordures ménagères ou des boues provenant des eaux usées peuvent être mis à fermenter pour produire chaleur et électricité. Le potentiel européen exploitable est estimé à 18 millions de tep par an d'ici à 2020.

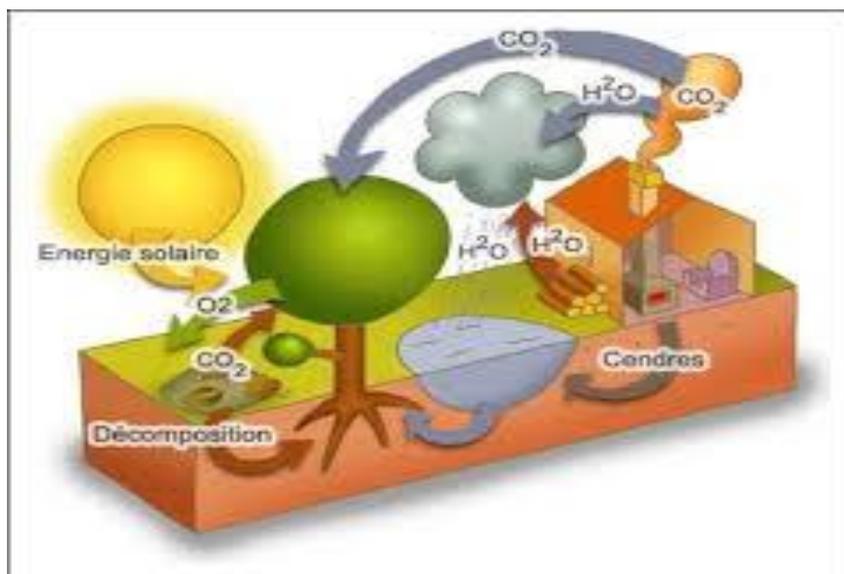


Figure I. 6: la biomasse.

I-3-5. 1. Le Potentiel de la biomasse en Algérie :

Le potentiel de la biomasse est relativement limité. La surface boisée couvre environ 250 millions d'hectares et qui représente 10% de la superficie totale du pays ou le Sahara couvre presque 90% du territoire. Les forêts occupent une superficie de l'ordre de 4.2 millions d'hectares représentant ainsi 1.8% de cette surface, alors que les zones alfatières n'occupent que près de 2.5 millions d'hectares, c'est à dire un peu plus de 1% de l'étendue du territoire. Le potentiel actuel est évalué à environ 37 M tep.an⁻¹. Le potentiel récupérable est de l'ordre de 3.7 M tep.an⁻¹. Le taux de récupération actuel

I-3-6. La géothermie :

L'énergie géothermique est la forme d'énergie due à la chaleur endogène de la Terre. Les volcans, sources thermales et geysers illustrent la présence de chaleur emmagasinée dans la croûte terrestre et qui se dirige vers l'extérieur par le biais de fluides vecteurs tels que l'eau et la vapeur.

La température, à l'intérieur de notre planète, augmente avec la profondeur selon un gradient géothermique de 3°C par 100 m, même si des zones atteignent des gradients géothermiques anormaux avec des flux de chaleur supérieurs (9-12°C par 100 m). En moyenne, la chaleur terrestre calculée est égale à 0,06 W/m² donc, en considérant toute la superficie, on arrive à

Chapitre I : l'énergie renouvelable

des valeurs de 30 000 milliards de W. Cette énergie thermique, par unité de temps et de surface constitue le flux géothermique et est exprimée en HFU (Heath Flow Unit, soit une micro calorie par centimètre carré par seconde, ce qui équivaut à dire quela terre, en une seconde, disperse une micro calorie par centimètre carré).

L'exploitation de l'énergie géothermique consiste en l'utilisation de la chaleur contenue dansdes roches relativement proche de la surface, où elle arrive en se propageant depuis des zonesplus profondes de la terre. Pour atteindre la superficie, la chaleur a besoin d'un vecteur fluide (eau ou vapeur), naturel ou injecté, qui doit pouvoir s'infiltrer en grande quantité dans desroches poreuses et perméables. Ces roches doivent être à leur tour protégées par des roches imperméables qui empêchent ou limitent la dispersion des fluides et de la chaleur. Dans un système géothermique, l'eau pénètre dans le sous-sol à travers des roches perméables formant des nappes souterraines et, par effet de la chaleur transmise aux roches par une fonte (une masse magmatique), elle se réchauffe jusqu'à atteindre des températures de plusieurs centaines de degrés. Le fluide (eau et/ou vapeur) dans ces conditions remonte le long desfailles et des fractures en donnant lieu aux manifestations géothermiques. Le fluide capté decette manière, après plusieurs traitements, est envoyé vers les installations d'utilisation(production d'énergie électrique ou utilisations directes).Une centrale géo thermoélectrique diffère de celle traditionnelle thermoélectrique par les appareils nécessaires au traitement du fluide naturel provenant du sous-sol et par l'extraction des gaz non condensables (surtout CO₂) toujours présents dans la vapeur.

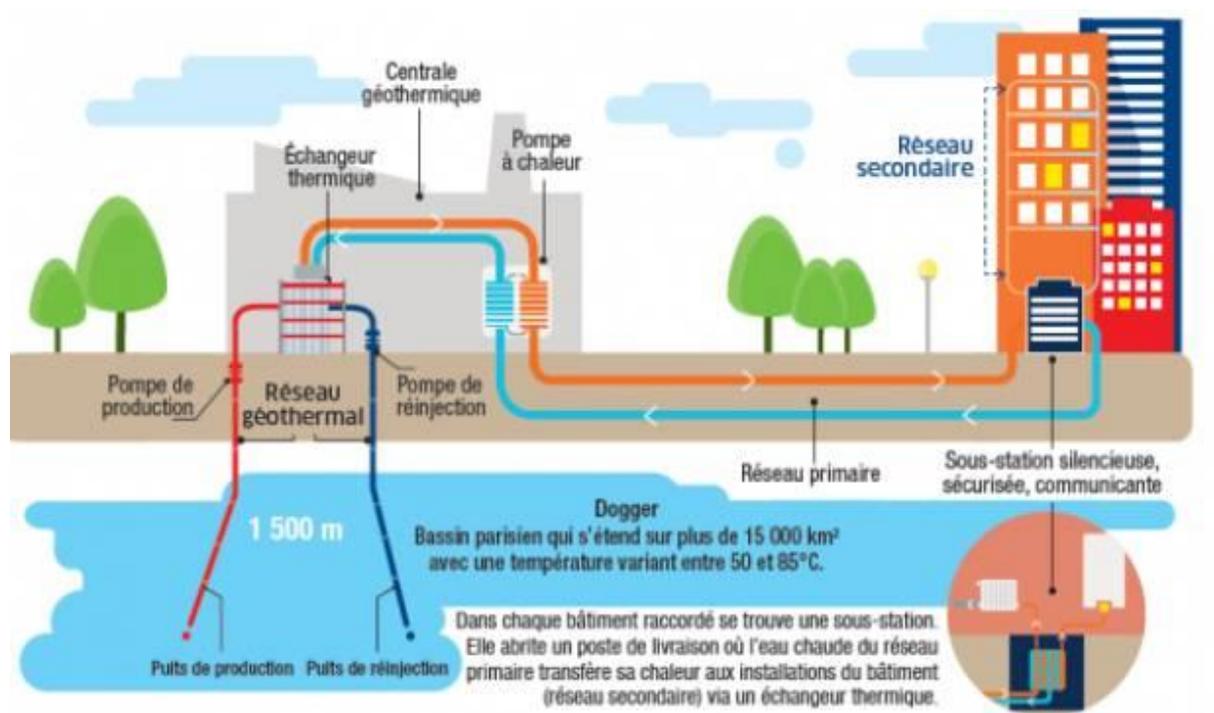


Figure I. 7: La géothermie énergie renouvelable sur les bâtiments.

I-3-6.1. Potentiel géothermique en Algérie :

L'inventaire des sources thermales a été mis à jour pour afficher plus de 240 emplacements. Les températures de l'eau chaude algérienne varient de 22 à 98 degrés Celsius. Les températures printanières les plus élevées enregistrées sont : 68 oC pour la région occidentale (Hammam Bouhnifia), 80 OC pour la région centrale (Hammam Al-Bibans) et 98 oC pour la région orientale (Hammam Maskoutaine) dans le nord de l'Algérie. Dans la région sud.

I-4. Avantages et inconvénients des énergies renouvelables :

Outre le fait qu'elles ne soient théoriquement pas épuisables comme les énergies fossiles, les énergies renouvelables ont d'autres avantages sur le plan écologique. Par exemple, l'électricité produite à partir de sources de production d'énergie renouvelable émet très peu de CO2 notamment lorsqu'on la compare aux énergies fossiles comme le charbon. Pour cette raison, les énergies renouvelables sont notamment une des **solutions au réchauffement climatique**, et un outil indispensable de la lutte contre le **réchauffement climatique**. Elles sont aussi considérées comme un facteur de **résilience** car elles permettent des productions décarbonnées et décentralisées.

Chapitre I : l'énergie renouvelable

Pour mesurer les émissions de CO₂ des énergies renouvelables, on utilise **l'outil d'ACV (Analyse de Cycle de Vie)** qui permet de connaître les émissions de CO₂ par kWh d'électricité produite, en intégrant les émissions de CO₂ issues de la fabrication des infrastructures, de l'extraction des ressources et de la fin de vie. D'après le rapport du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Étude du Climat), les énergies renouvelables bénéficient d'ACV favorables par rapport à beaucoup d'énergies.

Voici la liste des principales sources de production d'électricité en fonction de leurs émissions de CO₂ d'après **le rapport du GIE, Annexe 3** (de la moins polluante à la plus polluante, en valeurs médianes) :

- Éolien terrestre : 11 gCO₂eq/kWh
- Nucléaire : 12 gCO₂eq/kWh
- Hydroélectricité : 24 gCO₂eq/kWh
- Solaire thermodynamique : 27 gCO₂eq/kWh
- Géothermique 38 gCO₂eq/kWh
- Solaire photovoltaïque : 41-48 gCO₂eq/kWh
- Biomasse : 230 gCO₂eq/kWh
- Gaz naturel : 490 gCO₂eq/kWh
- Charbon : 820 gCO₂eq/kWh

I-5. Les énergies renouvelables dans le monde :

En 2014, les énergies renouvelables couvraient 19,2 % de la consommation d'énergie mondiale. La part des énergies renouvelables en 2015 a marqué une forte croissance pour la production d'électricité (23,7 %). Cet essor s'appuie principalement sur l'éolien et le solaire photovoltaïque (75 % de la progression globale).

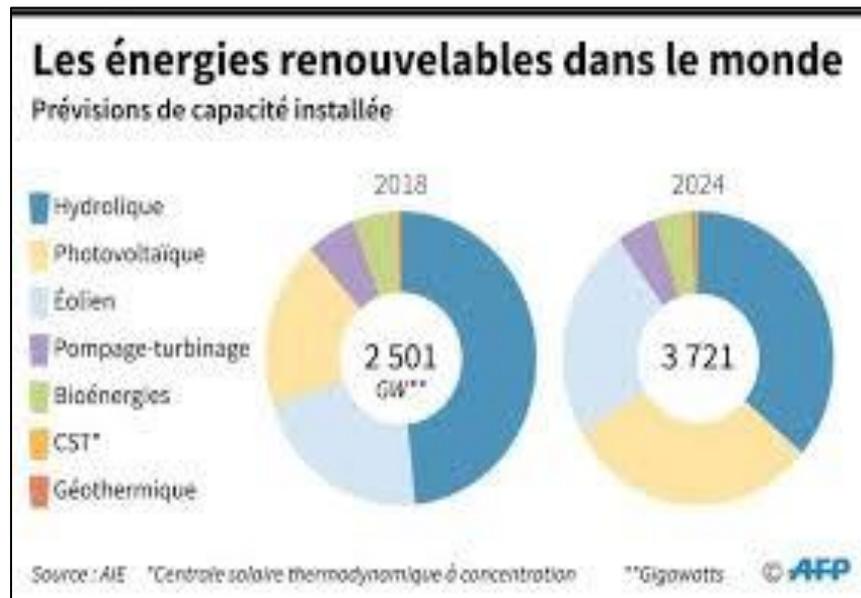


Figure I. 8: Les énergies renouvelables dans le monde.

Conclusion :

Ce chapitre s'est consacré à la présentation des énergies renouvelables avec une explication brève de leur notion de production d'électricité dans les différentes centrales.

CHAPITRE II

Généralités sur la géothermie

II-1. Introduction :

La chaleur terrestre est une source d'énergie durable pour la production de chaleur et d'électricité, qui ne dépend ni des conditions climatiques, ni de la saison ou du moment de la journée. La diversité des températures et des profondeurs autorise une multitude de variantes d'utilisation. L'énergie géothermique, c'est la chaleur stockée au-dessous de la surface du sol. Cette chaleur provient pour l'essentiel de la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre, et pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones plus profondes de la Terre. Ce que l'on appelle géothermie, c'est l'utilisation de cette chaleur. Dans la plupart des régions, les roches possèdent une température d'environ 25-30°C à 500 m de profondeur, et de 35-45°C à 1000 m. Dans d'autres régions, où les conditions géologiques sont différentes (écorce terrestre amincie, volcanisme), ces températures peuvent atteindre 100°C, voire 200°C ou plus ! La chaleur terrestre est une source d'énergie quasiment inépuisable. Sur la base de ce constat, la géothermie a sensiblement gagné en importance ces dernières années et suscite de grands espoirs dans le domaine de l'approvisionnement en énergie. L'importance de la géothermie dans les scénarios d'avenir en matière de politique énergétique ne cesse de croître.

II-2. Principe :

Il existe deux grands types de Géothermie

- La Géothermie de Surface : Le rayonnement du soleil et le ruissellement de l'eau de pluie permettent au sol de jouer un rôle d'inertie thermique, il y règne à quelques mètres de profondeur une température pratiquement constante tout l'année. La géothermie de surface utilise cette inertie pour obtenir des températures plus basses que les températures à la surface en été, et à l'inverse obtenir des températures plus élevées que les températures à la surface en hiver. En Hiver, la chaleur du sol ou de l'air est captée par une tuyauterie conduisant un fluide caloporteur. La chaleur est restituée dans le logement par la pompe à chaleur. En été, L'excès de chaleur dans la maison est restitué dans l'air par la pompe à chaleur.

La Géothermie dite « verticale » ou en profondeur Le principe est de récupérer la chaleur en profondeur dans les nappes d'eau chaudes

Chapitre II : Généralités sur la géothermie

Cette chaleur traverse « l'échangeur de chaleur » (système de pompe à chaleur), où l'excès de chaleur est rejeté dans le tuyau de réjection. La chaleur restante est envoyée aux radiateurs situés dans le logement. Ce type de géothermie est très pratique pour le chauffage, mais, contrairement à la géothermie de surface, on ne peut pas abaisser la chaleur dans la maison.

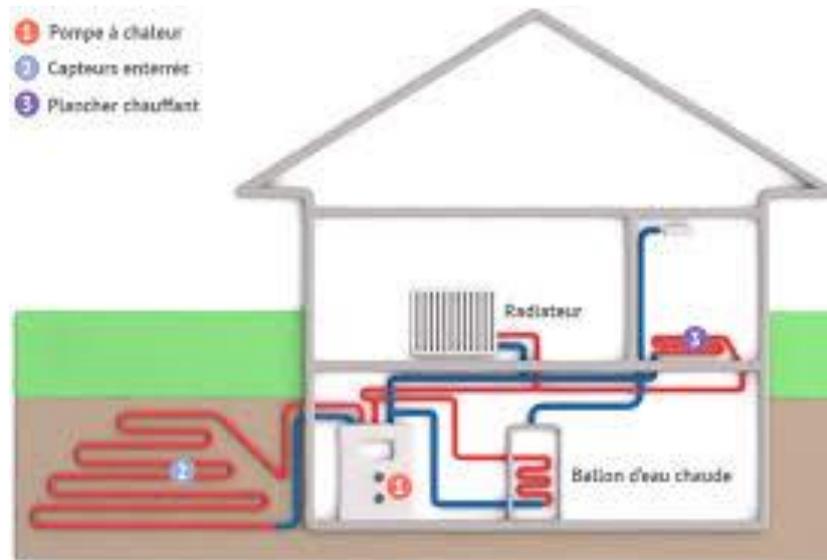


Figure II. 1: Principe de la géothermie.

II-3. Avantages/inconvénients :

II-3.1 Avantage :

- Energie inépuisable et renouvelable
- Durée de vie : supérieure à 30 ans.
- Fonctionnement double : en Hiver, avec le chauffage.

En Eté, avec le refroidissement.

- Energie propre : aucune pollution n'est dégagée. Pas d'émission de CO₂.

II-3.2 Inconvénients :

- Prix d'installation relativement élevé
- Géothermie verticale : il faut se situer sur une zone propice à l'installation de tuyaux pouvant descendre loin en profondeur.

Chapitre II : Généralités sur la géothermie

- N'est utilisable en domestique que pour le chauffage, l'électricité pouvant être développée en centrale Géothermique.

II-4. La Géothermie dans l'avenir :

La géothermie est en pleine expansion, car c'est une énergie renouvelable et à rendement conséquent. Elle aura donc sa place après la baisse des énergies fossiles (pétrole, gaz...). Comme toute énergie renouvelable, sa croissance mondiale sera fulgurante. L'énergie géothermique est placée au 5ème rang des énergies à « potentiel futur ».

II-5. Les différents types de géothermie :

On distingue classiquement trois types de géothermie selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

II-5.1. La géothermie haute énergie:(aux températures supérieures à 150 °C) qui permet la production d'électricité grâce à la vapeur qui jaillit avec assez de pression pour alimenter une turbine.

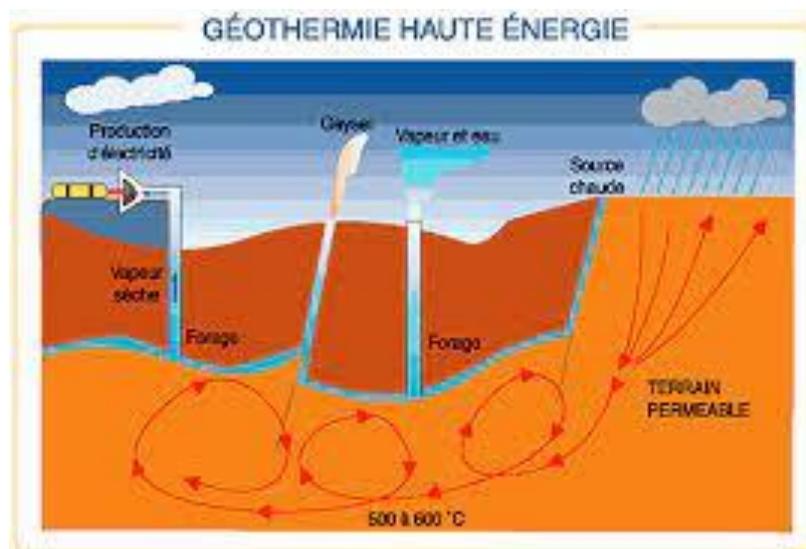


Figure II. 2: Schéma expliquant la géothermie haute énergie.

II-5.2. La géothermie moyenne énergie : (aux températures comprises entre 100 °ce 150 °C) par laquelle la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire

II-5.3. La géothermie de basse énergie : géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 °C et 100 °C. Principale utilisation : les réseaux de chauffage urbain.

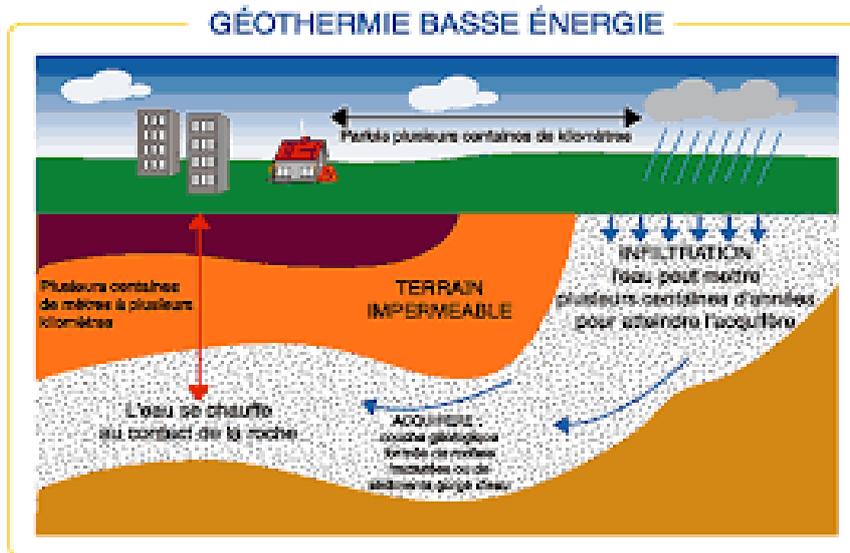


Figure II. 3 : Schéma expliquant la géothermie basse énergie.

II-5.4. La géothermie de très basse énergie:

Géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 et 30°C. Principales utilisations : le chauffage et la climatisation individuelle par dispositifs thermodynamiques généralement fonctionnant à l'électricité , d'où le terme barbare électro-thermodynamique, appelés plus communément " pompes à chaleurs aérothermiques " (puisant dans l'air extérieur) et " pompe à chaleur géothermique " (puisant dans la terre ou l'eau à faible profondeur) beaucoup plus performantes que les premières.



Figure II. 4: La géothermie de très basse énergie.

II-6. La géothermie dans le monde :

II-6.1. Les applications :

La plus ancienne application des sources thermales est la balnéothérapie. Elle fut utilisée par les grecs, les turques, les romains...etc. La plus importante exploitation de la géothermie est dans le domaine de la production d'électricité. En 1904, le prince Piero Gino ri Conti promut cette industrie pour la première fois dans le monde à Larderello en Italie. C'est donc grâce à l'Italie qu'un élan considérable dans le domaine de l'exploitation de l'énergie géothermique a été accompli. Après un demi-siècle, la nouvelle Zélande commença alors la production de l'énergie géothermique; suivie par la suite, par les Etas Unis en Californie notamment et à Sans Francisco en particulier. Depuis, bien d'autres pays ont à leurs tours investis dans ce domaine, c'est le cas du Japon, du Mexique, du Salvador, de l'Islande et de la Turquie. Les utilisations de la géothermie dans le monde sont nombreuses

II-6.2. La capacité énergétique :

La géothermie est une source d'énergie renouvelable qui produit deux types d'énergies, l'énergie électrique et l'énergie calorifique. Sur le plan exploitation, elle est classée troisième dans le monde après la biomasse et l'hydraulique. Aujourd'hui, elle représente 3 % de la

Chapitre II : Généralités sur la géothermie

production énergétique mondiale dont 0.4 % dans l'énergie électrique. L'énergie géothermique est aujourd'hui utilisée dans plus de soixante pays, mais cependant elle est particulièrement développée dans certains pays seulement comme les Etats-Unis, le Japon, l'Islande, la Nouvelle-Zélande, les Antilles françaises et la Suisse. L'Islande étant un pays volcanique, il est par conséquent très riche en eau thermale. Aujourd'hui ce pays satisfait pratiquement la totalité de ces besoins en chaleur et en électricité à partir de l'énergie géothermique. Un très bon exemple est donné aussi par les philippines qui produisent 21.5% de son énergie électrique à partir de la géothermie. Afin de rentabiliser ce type de gisements il faut surtout une bonne étude d'intérêt économique qui concerne tous les aspects, tels que, le coût des installations géothermiques, quantité de calorie fournie, transformation des calories en énergie...etc.

II-7. Forage géothermique :

L'exploitation de la géothermie nécessite l'existence en profondeur de la terre de deux paramètres importants la chaleur et l'eau. En effet c'est l'eau qui permet de véhiculer cette chaleur profonde en surface. L'eau contenue dans les réservoirs géothermiques est remontée à la surface grâce à un forage ; le plus fréquent est le forage Rotary (BRGM, 1978) Si la pression dans le gisement est insuffisante pour que le forage soit artésien, la production peut s'établir par l'intermédiaire d'une pompe. Une fois l'eau géothermale utilisée, elle est soit rejetée dans l'environnement si l'eau n'est pas salée. Dans le cas contraire, elle est réinjectée dans la nappe d'origine à l'aide d'un puits de réinjection. Le forage rotary nécessite l'emploi d'un fluide de forage préparé sur le chantier. Dans le cas de la circulation directe, le fluide est injecté en continu sous pression dans les tiges creuses de la ligne de sonde, il sort par les événements de l'outil et remonte à la surface dans l'espace annulaire (entre les tiges et les parois du trou). (Jay F.K., Richard G.B., Ken F., Dennis G. Elliot Z., 1979).

II-7.1Avantage :

- La profondeur du forage peut être très importante, pendant l'exécution de celui-ci, il n'y a pas de perturbation par les terrains peu stables ou plastiques, sous réserve de l'utilisation d'un fluide de forage adapté

Chapitre II : Généralités sur la géothermie

- Ce système permet un bon contrôle des paramètres de forage (poids de l'outil, vitesse de rotation, qualité de la boue, débit d'injection de la boue) en fonction des terrains à traverser.
- -Le forage rotary entraîne une consolidation des parois en terrains meubles par dépôt d'un cake

II-8. La géothermie en Algérie :

Les études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales. Près de 200 sources ont été inventoriées, elles sont réparties à travers tout le territoire nord algérien, majoritaires au Nord-est (voir tableau 2). Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Maskoutaine (98°C) à Guelma ; Hammam Boutaleb (52°C) à Sétif et Hammam Bouhnifia (66°C) à Mascara. Ces nombreuses sources thermales émergent principalement à partir des calcaires jurassiques du Nord de l'Algérie. Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence ; au Nord-Ouest, au Nordeste et au Centre-Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les régions d'Oran, de la Kabylie et de Constantine. En plus des nombreuses sources thermales dans le Nord du pays, il existe dans le Sud algérien et plus exactement dans le Sahara septentrional une importante réserve en eau thermale qui est la nappe du Continental Intercalaire

Sources thermales	Région	Faciès chimique	Résidus Soes (mg/l)	Température (°C)	Débit (l/s)
H.Chellala	Guelma	Sulfaté magnésien	1600	98	100
H.Bou Hadjar	Ain Timouchent	Chloruré sodique	3210	66.5	-
H.Bouhanifia	Mascara	Bicarbonaté sodique	1400	66	-
H.Boutaleb	Setif	Chloruré sodique	3416	52	-
H.Essalihine	Khenchela	Chloruré sodique	2082	70	-
H.Salhine	Skikda	Sulfaté magnésien	2046	55	-
H.Sidi Bou abdellah	Relizane	Chloruré sodique	1194	51	-
H.Delaa	M'sila	Sulfaté sodique	1980	42	-
H.Rabi	Saida	Chloruré sodique	1524	47	-
H.Sillal	Bejaia	Chloruré sodique	2221	46	-
H.Ben Haroun	Constantine	Chloruré sodique	3762	42	10

Figure II. 5: Principales Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie.

Chapitre II : Généralités sur la géothermie

En Algérie, depuis fort longtemps les eaux thermales ont été utilisées pour leurs bienfaits thérapeutiques. Les sculptures découvertes dans les régions des hammams indiquent que bien avant l'époque romaine des établissements balnéaires existaient à ces endroits. Mais ce sont surtout les romains qui ont le mieux développé les techniques de captation et de canalisation des eaux thermales. Très souvent, ils ont construit leurs villes à proximité des établissements thermaux afin de tirer le meilleur parti de ces sources thermales. Aujourd'hui, bien que le potentiel géothermique soit très important dans notre pays, le domaine de l'exploitation reste limité et se restreint principalement à la balnéothérapie et aux utilisations domestiques. Depuis 1990, une récente application de l'énergie géothermique a commencé dans le Sahara Algérien. C'est dans la région de Touggourt qu'une première installation d'équipements destinés aux chauffages des serres est assurée par l'équipe du laboratoire Thermique du C.D.E.R. Bien que cette application ait donné de bons résultats, elle ne s'est pas encore généralisée et reste très modeste en rapport avec le potentiel géothermique du Sud algérien. Il reste cependant à noter que l'exploitation de l'énergie géothermique peut être facilitée considérablement au Sud de l'Algérie grâce aux nombreux forages pétroliers qui traversent le sous-sol saharien.

II-8 L'exploitation :

En Algérie, depuis fort longtemps les eaux thermales ont été utilisées pour leurs bienfaits thérapeutiques. Les sculptures découvertes dans les régions des hammams indiquent que bien avant l'époque romaine des établissements balnéaires existaient à ces endroits. Mais ce sont surtout les romains qui ont le mieux développé les techniques de captation et de canalisation des eaux thermales. Très souvent, ils ont construit leurs villes à proximité des établissements thermaux afin de tirer le meilleur parti de ces sources thermales. Aujourd'hui, bien que le potentiel géothermique soit très important dans notre pays, le domaine de l'exploitation reste limité et se restreint principalement à la balnéothérapie et aux utilisations domestiques. Depuis 1990, une récente application de l'énergie géothermique a commencé dans le Sahara algérien. C'est dans la région de Touggourt qu'une première installation d'équipements destinés aux chauffages des serres est assurée par l'équipe du laboratoire Thermique du C.D.E.R. Bien que cette application ait donné de bons résultats, elle ne s'est pas encore généralisée et reste très modeste en rapport avec le potentiel géothermique du Sud algérien. Il

Chapitre II : Généralités sur la géothermie

reste cependant à noter que l'exploitation de l'énergie géothermique peut être facilitée considérablement au Sud de l'Algérie grâce aux nombreux forages pétroliers qui traversent le sous-sol saharien.

II-9.Géothermie superficielle :

II-9.1.Introduction :

La géothermie superficielle est appelée aussi géothermie très basse température ou géothermie très basse énergie. Elle exploite la chaleur du sol ou de l'eau du sous-sol à des profondeurs généralement comprises entre 0 et 100 mètres, pour des températures inférieures à 30°C généralement.

Le rayonnement du soleil et les conditions climatiques ont une influence majeure sur la température terrestre des premiers mètres du sol, en particulier via l'eau de pluie s'infiltrant vers les nappes phréatiques.

La chaleur terrestre (ou flux géothermique) contribue à l'établissement de la température des premiers mètres du sous-sol. Ce flux de chaleur est produit en partie par la désintégration de trois éléments radioactifs (uranium, thorium, potassium) présents dans les roches de la croûte terrestre, et en partie par la chaleur issue du manteau et du noyau, qui dissipent une grande quantité d'énergie (à l'origine notamment du mouvement des plaques) depuis 4,5 milliards d'années.

Ainsi, une fois à l'abri des variations saisonnières à quelques mètres de profondeur, la température du sol est stable, à 12°C dans les plaines à basse altitude. La pompe à chaleur géothermique permet, à partir de cette source de chaleur, d'ajuster la température aux besoins de l'habitat. Ce type de géothermie est utilisé pour le chauffage et/ou la climatisation de maisons individuelles, de bâtiments tertiaires et de locaux collectifs. Le fluide utilisé pour assurer l'échange avec le sol peut être de l'eau ou de l'air ; dans ce dernier cas on parle de « puits canadien ».

II-9-2.Fonctionnement technique ou scientifique :

La pompe à chaleur (PAC), qui peut être électrique ou à gaz (la PAC électrique est préférée dans l'habitat individuel), prélève des calories à une source dite froide (en l'occurrence le sol) pour les céder à une source dite chaude (l'intérieur d'une maison). De façon imagée, il s'agit

Chapitre II : Généralités sur la géothermie

de refroidir le froid pour réchauffer le chaud. En été, la pompe à chaleur peut être utilisée en mode « réversible » pour la climatisation, la source froide étant l'intérieur de l'habitation et la source chaude l'environnement extérieur.

Comme dans un frigidaire, le processus utilise la faculté de certains fluides de passer de la phase gazeuse à la phase liquide ou l'inverse en fonction des températures et des pressions.

II-9-2.1. Fonctionnement :

L'exploitation de l'énergie géothermique pour le chauffage par pompe à chaleur se fait en trois grandes étapes : captage de la chaleur, amplification de l'énergie par une PAC et restitution de la chaleur dans l'habitation (par un circuit de chauffage).

La chaleur géothermique est prélevée par des capteurs pour être transmise à un fluide originellement plus froid en circulation dans la PAC. Ce fluide change d'état et se transforme en vapeur, dont la température est augmentée par compression. Cette chaleur générée est restituée au milieu à chauffer via un condenseur, où le fluide se refroidissant repasse à l'état liquide.

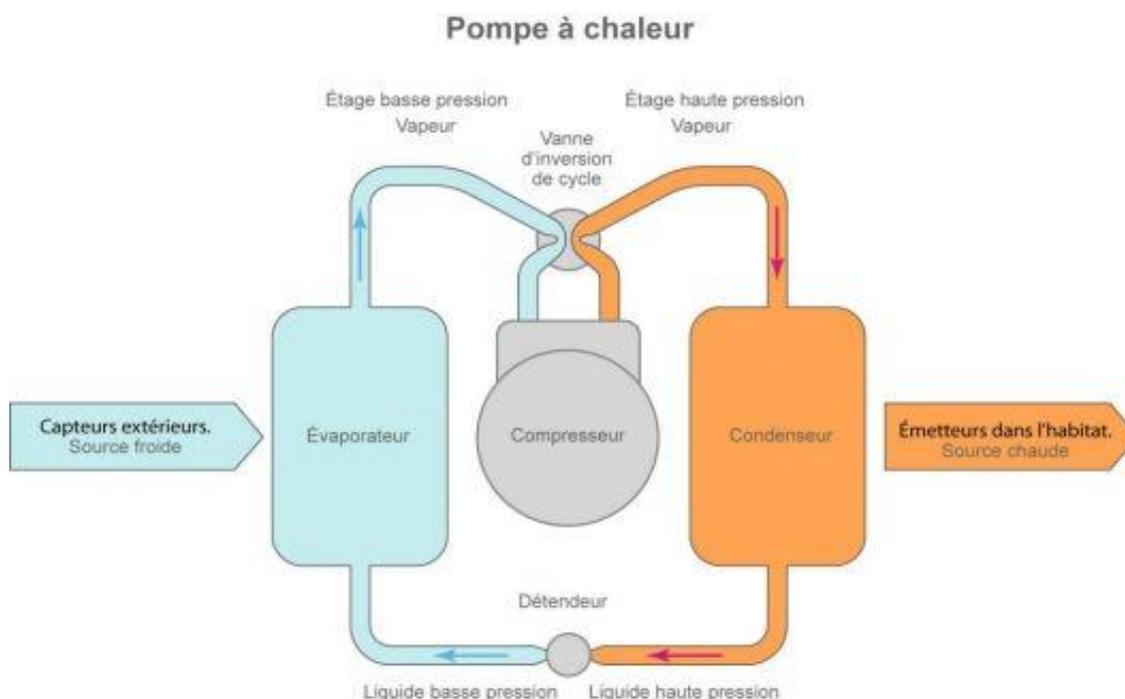


Figure II. 6: Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur.

II-9-2.2. Caractéristiques :

En pratique, les systèmes utilisant une pompe à chaleur se différencient par le type de capteurs utilisé pour récupérer la chaleur géothermique. Ceux-ci prélèvent soit la chaleur du sol, soit la chaleur de la nappe. Dans la plupart des cas, le fluide utilisé pour le transfert est l'eau, naturelle ou glycolée.

- **Capteurs verticaux dans le sol :** les capteurs verticaux (ou sondes géothermiques) sont disposés entre 30 et 150 m de profondeur. L'échange de chaleur avec le sol s'effectue par l'intermédiaire d'un ou deux tubes en U dans un forage vertical. Ce type de captage trouve des applications en maison individuelle et en petit tertiaire (crèche, mairie, bureaux, etc.). La possibilité de multiplier les forages permet d'envisager des applications plus importantes, en habitat collectif.
- **Capteurs horizontaux dans le sol :** les capteurs horizontaux sont disposés en réseau de tubes, installés en boucle. Ils sont enterrés à une profondeur allant de 60 cm à 1,20 m. Les capteurs horizontaux sont les plus utilisés dans le neuf pour les maisons individuelles. D'installation simple, ils ont des coûts initiaux moins élevés que les capteurs verticaux. Cependant, ils présentent des rendements moindres, s'expliquant par des températures souterraines inférieures, et des variations de températures dues à l'influence atmosphérique (insolation, pluie, etc.). De plus, la surface de terrain à mobiliser pour l'installation correspond à 1,5 à 2 fois la surface habitable à chauffer, ce qui induit une contrainte à long terme concernant l'usage de cet espace.

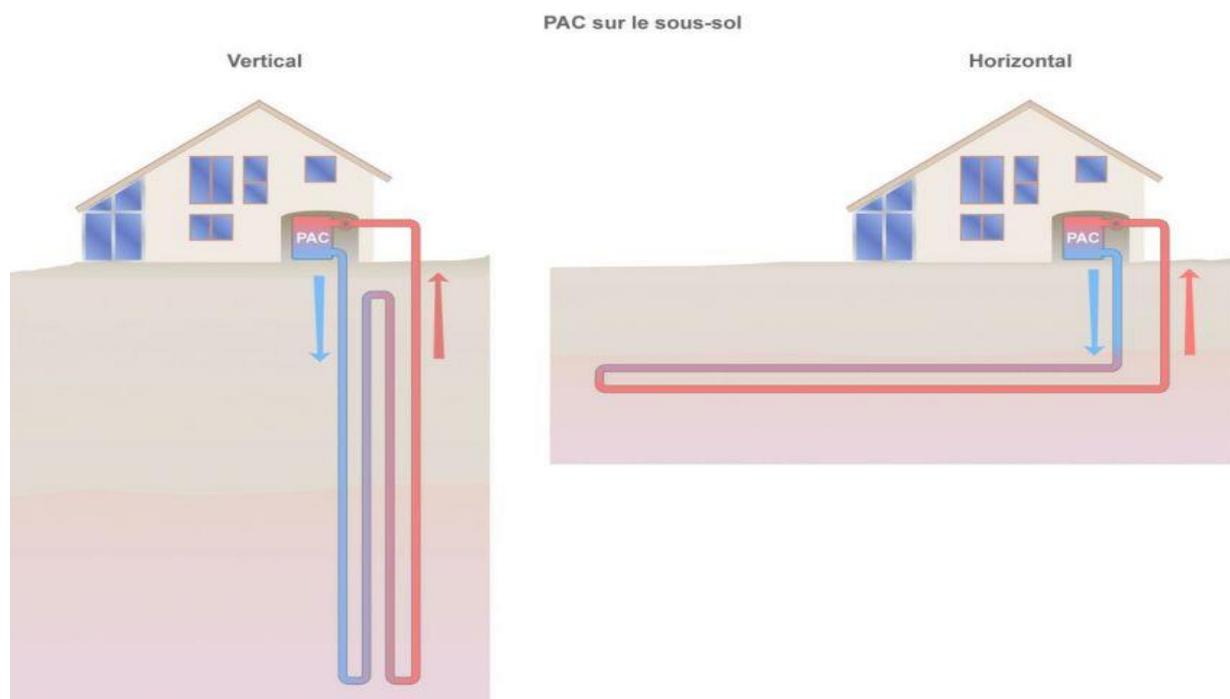


Figure II. 7: Schéma des pompes à chaleur à capteurs horizontaux et verticaux.

Forages verticaux sur nappes d'eaux :

Ce type de capteurs consiste à prélever l'eau des nappes phréatiques, par forage ou puits entre 10 et 30 m. Le captage se fait soit par puits unique avec rejet des eaux en surface soit par double puits avec réinjection des eaux en profondeur. Le captage sur nappe offre un intérêt en termes de puissance et de rendement. La température de l'eau d'une nappe reste constante toute l'année (12° C en moyenne pour les nappes superficielles, +3°C par 10 mètres pour les nappes plus profondes). Le coefficient de performance peut être de 5 alors qu'il s'échelonne entre 3 et 4,5 pour les autres systèmes (captage horizontal ou vertical). Ce type de PAC est surtout utilisé pour de petits collectifs, mais peut également convenir pour des maisons individuelles

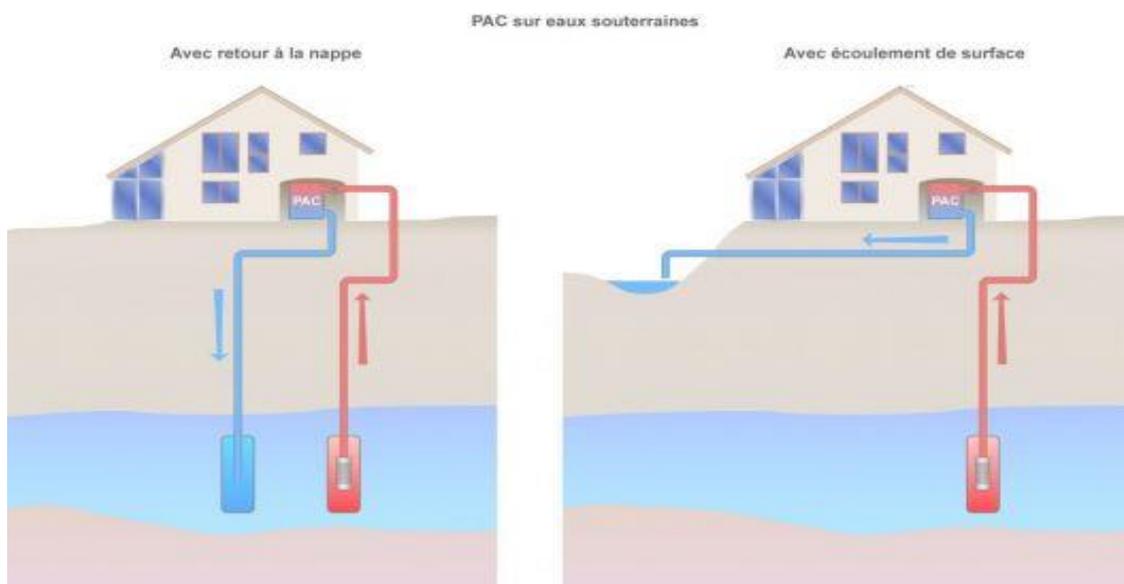


Figure II. 8: Schéma des pompes à chaleur sur nappes d'eau.

II-9-3. Le puits canadien ou puits provençal :

Ce système, encore peu développé en France, est à différencier du précédent dans la mesure où l'échange de chaleur avec le sol ne se fait pas ici avec de l'eau mais avec de l'air. La dénomination « puits provençal » fait référence à la fonction de rafraîchissement estival du système, alors que le puits canadien désigne la fonction de préchauffage hivernal de l'air ventilé.

Le puits canadien consiste à faire circuler de l'air de l'extérieur vers l'intérieur de l'habitation, dans une canalisation enterrée à faible profondeur. En hiver, ce système utilise la chaleur du sous-sol dont la température est plus élevée que l'air (environ 7 °C à 2 ou 3 mètres de profondeur). En été, il exploite la fraîcheur du sous-sol, approximativement de 12°C. La circulation d'air dans la canalisation peut être passive (en positionnant par exemple l'entrée de la canalisation vers les vents dominants) ou mécanique grâce à une ventilation mécanique contrôlée.

Le puits canadien ne peut pas constituer un système de chauffage, sauf s'il est couplé à une pompe à chaleur (air-air ou air-eau si la maison dispose de radiateurs). Il permet néanmoins de renouveler l'air de l'habitat, de le rafraîchir en été et de le préchauffer en hiver.

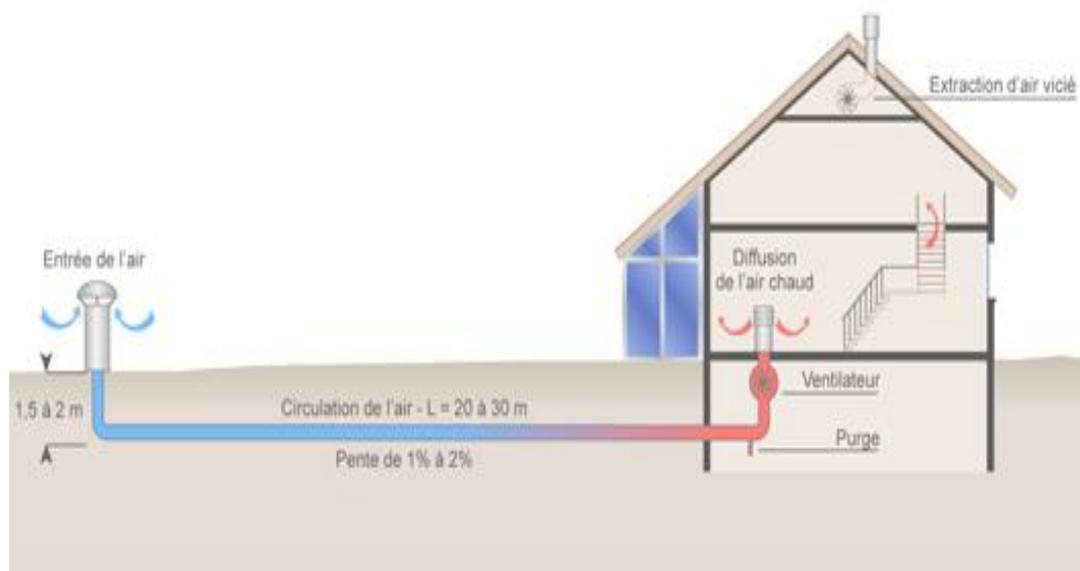


Figure II. 9: Schéma d'un puits canadien.

Ce système – couplé ou non à une pompe à chaleur, ou encore à un appoint thermique (chauffage bois par ex.) - est utilisé aussi bien pour l'habitation individuelle que pour les bureaux ou des équipements collectifs.

Le rendement d'un puits canadien varie selon sa conception (longueur, diamètre, profondeur), le type de ventilation et selon le type de construction : des matériaux comme la pierre gardent mieux la fraîcheur. Utilisé en rafraîchissement direct, le système utilise dix fois moins d'énergie qu'une climatisation électrique conventionnelle. En effet, il consomme uniquement l'énergie électrique nécessaire au ventilateur qui aspire l'air extérieur

II-9-4. Avantages et inconvénients :

En théorie, la géothermie superficielle est possible sur l'ensemble de la planète. Source d'énergie non intermittente, elle présente un rendement énergétique potentiellement élevé.

Néanmoins, des contraintes techniques limitent son application :

- l'exploitation par forage au niveau du sous-sol et des nappes d'eaux souterraines peut être soumise à une réglementation au niveau national;

Chapitre II : Généralités sur la géothermie

- les coûts d'investissement initiaux sont encore élevés (plus du double d'une chaudière à gaz);
- la géothermie superficielle peut être difficile à appliquer en milieu urbain, notamment dans l'ancien. Des techniques de forage permettent de l'adapter mais en augmentant les coûts d'installation;
- l'efficacité de certains dispositifs (profondeur d'installation trop faible) peut dépendre des conditions climatiques. Par exemple, le puits canadien convient surtout aux régions continentales présentant une différence de température importante entre le sous-sol et la surface en hiver et en été.

La géothermie superficielle présente les perspectives de croissance les plus importantes parmi les différents types de géothermie. La géothermie par pompe à chaleur (PAC) devrait contribuer aux objectifs d'énergie renouvelable.

Le développement des PAC géothermiques pourrait également concerner le chauffage des bâtiments et la production d'eau chaude sanitaire. En France, 44,5% de la consommation d'énergie finale française en 2012 est absorbée par les bâtiments, principalement à ces fins de chauffage : il s'agit du premier secteur de consommation d'énergie devant le transport

II-9-5. Le coefficient de performance COP :

Une pompe à chaleur consomme moins d'énergie qu'elle n'en fournit. Le phénomène est défini par le coefficient de performance (ou COP), qui est le rapport entre la chaleur restituée et l'électricité consommée : par exemple un COP de 3 signifie que la pompe à chaleur restitue 3 kWh de chauffage pour 1 kWh d'électricité consommé.

Pour les PAC géothermiques, l'échelle de valeur de COP s'étend généralement de 1,5 à 4,5 et peut aller jusqu'à 5.

Dans l'Union européenne, on estime le nombre de PAC installées à près de 1,1 million, avec des ventes annuelles qui dépassent les 100 000 unités. La Suède dispose du parc le plus important avec près de 407 000 unités à fin 2011 (et un taux de pénétration supérieur à 80% dans le neuf); elle est suivie de l'Allemagne avec 244 000 unités. Puis vient la France avec un total de 162 000 équipements à fin 2011.

Chapitre II : Généralités sur la géothermie

Le marché français, à l'image des autres pays européens, a d'ailleurs progressé de plus de 170% entre 2002 et 2008, passant de 8 000 installations par an à près de 22 000 avant de redescendre jusqu'à 10 365 installations en 2011.

L'utilisation des PAC géothermiques connaît également un fort développement en Amérique du Nord. Chaque année, environ 50 000 nouvelles unités sont installées aux États-Unis

Si le principe de la pompe à chaleur a été décrit en 1853 par Lord Kelvin, son application à la géothermie date de la fin des années 1940.

En France, les premières installations de PAC géothermiques dans le secteur domestiqueront apparues à la suite du 2^e choc pétrolier, dans la période 1979-1985.

Le marché a subi une forte régression en 1985, en raison de la chute du prix du fioul ainsi que des insuffisances en termes de qualité d'équipements et d'installations.

Une reprise des installations a lieu progressivement à partir de 1997, grâce à un encadrement qualitatif (certification des équipements, charte des fabricants et installateurs, etc.).

Les pompes à chaleur sont une technologie relativement « mûre », mais qui pose des problèmes d'optimisation des choix en fonction des caractéristiques du logement et du sous-sol; or les installateurs ne sont pas toujours en mesure de proposer la solution la plus adaptée. En outre, elle peut encore bénéficier de multiples développements : augmentation du coefficient de performance, combinaisons à plusieurs compresseurs, remplacement des fluides, offres plus accessibles « sur étagère » etc.

II-9.6. Température initiale du sol :

La température du sol à faible profondeur jusqu'à 10 m en dessous le niveau du sol (BGL), est affecté par les cycles météorologiques quotidiens et saisonniers.

Le premier se produit en raison du rayonnement solaire, compris entre 40 et 80 W/m² en Europe, qui pénètre à quelques centimètres de la surface terrestre la plus élevée et cette dernière pénétrant à de plus grandes profondeurs jusqu'à 15 m en fonction de la diffusivité thermique du sol. Cependant, à des profondeurs supérieures à 10 m BGL, la température du sol dépend d'un secteur relativement constant, comme le montre la figure 9 qui représente le calcul.

Chapitre II : Généralités sur la géothermie

Répartition de la température en fonction de la profondeur pour l'argile de Londres, basée sur données sur la température de l'air mesurées à Guildford, Surrey.

Ceci relativement la température constante permet une utilisation durable de la chaleur pour une utilisation efficace processus de chauffage et de refroidissement du bâtiment. De même, il convient de noter qu'à des profondeurs plus importantes, bien en dessous de 10 m, il y a une légère augmentation en température avec la profondeur. Cela est dû à une petite quantité de chaleur conduite de la croûte terrestre vers la surface.

La moyenne le gradient de température avec la profondeur est d'environ 2,5 °C par 100 m à travers la Royaume-Uni. À une profondeur comprise entre 20 et 60 m BGL, observé lors d'un test de réponse thermique réalisé dans l'Est de Londres et rapporté par

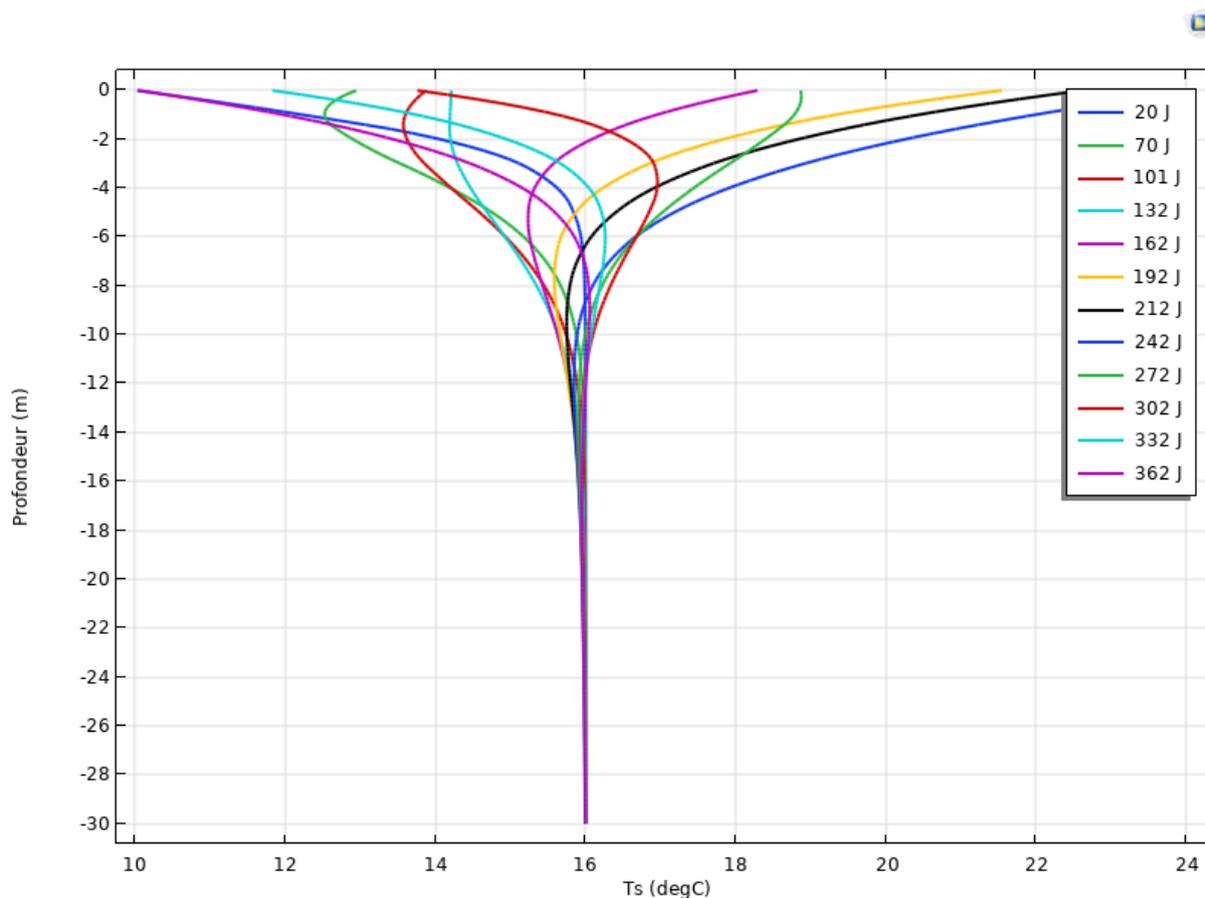


Figure II. 10: Le profil de Température dans le sol.

Chapitre II : Généralités sur la géothermie

Loveriez et coll. la température du sol reste relativement constante. Cela pourrait être attribué au mouvement des eaux souterraines ou à des pertes de chaleur. Du milieu urbain.

Pendant la saison estivale, la température moyenne du sol inférieure a une profondeur de 10 m présente une température plus basse que la température de l'air au-dessus de la surface du sol. Permettant ainsi le rejet de chaleur, pour obtenir refroidissement des bâtiments. Cependant, en hiver, la température de l'air est plus fraîche. La chaleur emmagasinée dans le sol en été est extraite et utilisée pour le chauffage. Cela maximise l'efficacité et garantit l'efficacité. Conception du système GEP, en empêchant l'accumulation de températures élevées/basses dans la masse de sol entourant le GEP.

En outre, il est très important de garantir que le long terme L'effet de l'injection/extraction de chaleur ne dégrade pas l'efficacité du système. Efficacité, en raison de l'accumulation/perte continue de chaleur, dans le long terme. Ce n'est généralement pas un problème là où le système délivre une énergie égale pour le chauffage et le refroidissement. La chaleur extraite pendant l'hiver, le chauffage est rétabli pendant l'été et vice-versa, un phénomène connu sous le nom de recharge thermique naturelle ou récupération thermique. De même, dans un système monotone (conçu pour le chauffage ou le refroidissement uniquement), la récupération naturelle pourrait être utilisée pour restaurer le sol à son état initial, mais la sortie du système générera généralement inférieure à celle d'un système équilibré. Cependant, dans un système déséquilibré (où le chauffage ou le refroidissement la charge est plus grande), d'autres méthodes de récupération doivent être utilisées pour équilibrer l'énergie thermique dépensée par le système. Intégrer et hybrider les systèmes GEP, en les équipant, de capteurs solaires et des tours de refroidissement pour recharger le sol avec force s'est avéré être efficace pour atténuer le déséquilibre énergétique au sein du système

Chapitre III

TRANSFERT DE CHALEUR ENTRE LE FLUIDE ABSORBANT ET BÉTON/SOL

III-1. Introduction :

Les ressources géothermiques du sous-sol représentent un grand potentiel d'énergie directement utilisable de la masse du sol, et en particulier dans le cadre de fondations et pompes à chaleur. L'environnement et les aspects économiques ont été à l'origine de l'invention de la pompe à chaleur par l'ingénieur autrichien Peter Ritter Von Rittinger en 1855. L'énergie géothermique peut également être obtenue au moyen de capteurs plats, collecteurs de tranchées, ou échangeurs de chaleur de forage. Ces systèmes sont largement utilisés depuis de nombreuses années en Australie (Fig. III.1).

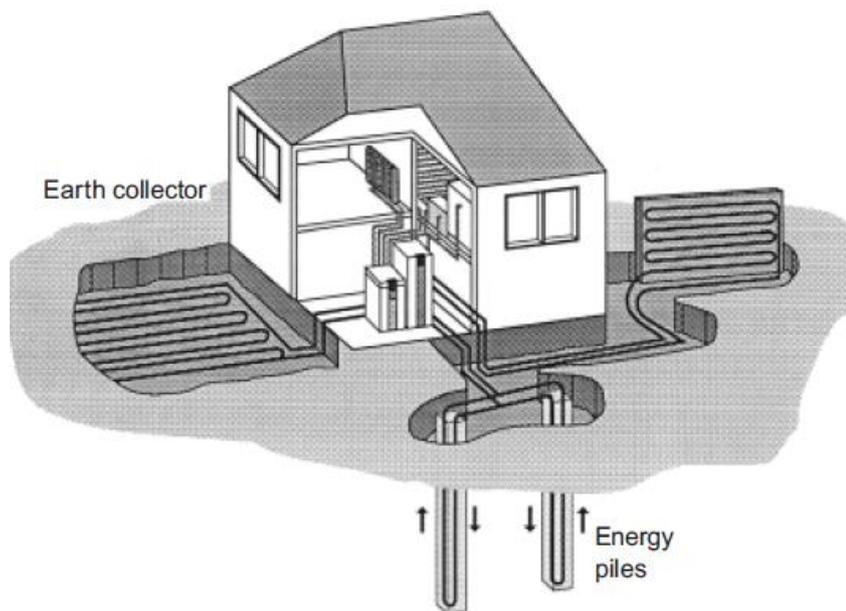


Figure III. 1: Schéma de chauffage/refroidissement d'une petite maison familiale avec fondations énergétiques. D'autres systèmes géothermiques thermoactifs sont également indiqués (brandl 2006).

Depuis le début des années 1980, l'énergie géothermique est également de plus en plus utilisée à partir d'éléments de fondation en Autriche et en Suisse : d'abord à partir de dalles de base, puis de pieux (1984) et de parois moulées (1996). Cette innovation utilise la grande capacité de stockage thermique du béton. De plus, ces éléments en béton sont déjà nécessaires pour des raisons structurelles et n'ont pas besoin d'être installés en tant que spécialement comme capteurs d'énergie.

En supposant que les parois des tuyaux absorbent dans un sol, échangeur de chaleur ont la même température que l'échangeur béton ou sol, respectivement, réduit la complexité du

problème de l'air (Fig. III.2) au transfert de chaleur de la paroi du tuyau vers fluide absorbant (fluide caloporteur). Il s'agit essentiellement du régime d'écoulement du fluide, c'est-à-dire laminaire ou turbulent.

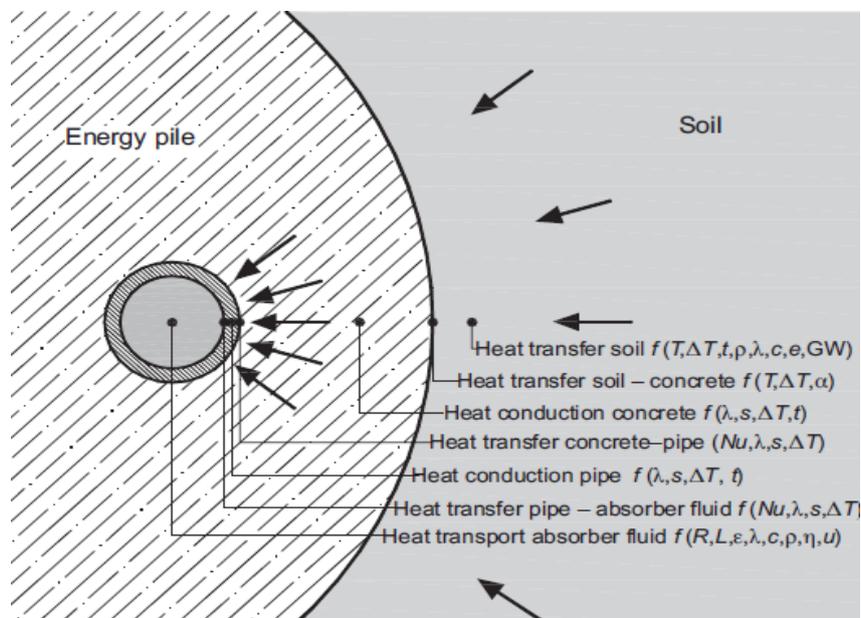


Figure III. 2: Transfert de chaleur du sol vers le fluide caloporteur dans le tuyau absorbant d'un tas d'énergie (GW, eau souterraine).

L'écoulement des fluides dans les conduites est décrit par deux zones (Fig. III.3) : zone d'afflux transitoire, où la vitesse d'écoulement et la température change de profil en fonction de la longueur du tuyau ; et la condition d'équilibre avec un profil hydrodynamique et thermique soit constant.

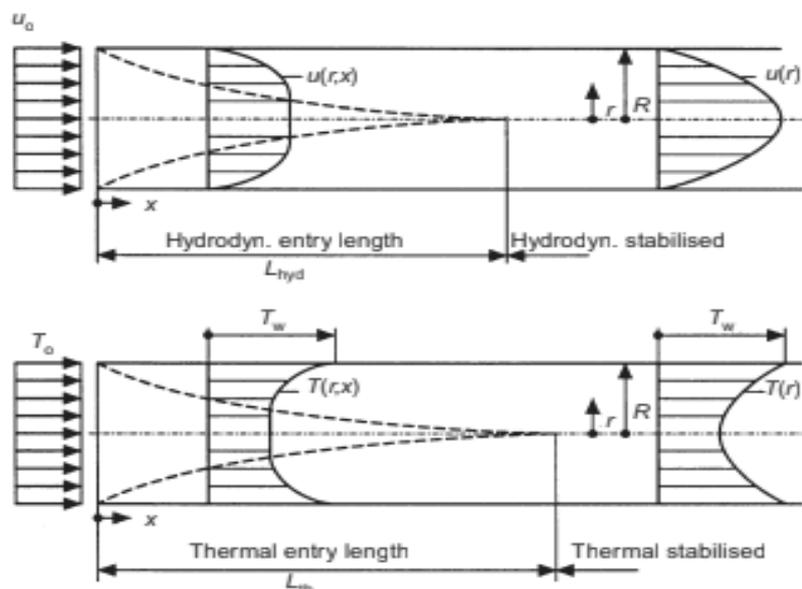


Figure III. 3: vitesse d'écoulement et répartition de la température dans l'absorbeur tuyaux remplis de fluide caloporteur (brandl 2006).

Le transfert de chaleur change en fonction de la conductivité. L'état stationnaire dans les tuyaux absorbeurs en fondation thermoactive, murs de soutènement, tunnels, puits de canalisations et routes domine. De plus, cet état est atteint après seulement une courte distance. D'où ce qui suit, les considérations théoriques se limitent à l'écoulement en régime permanent dans le problème de transfert de chaleur (Adam et Mankiewicz, 2002).

L'écoulement laminaire dans un tuyau est basé sur des chemins d'écoulement avec des vitesses différentes u et un frottement d'interface, qui est proportionnel au gradient de vitesse du/dx perpendiculaire à la direction d'écoulement. Le coefficient de proportionnalité est la viscosité. La figure III.4 montre un exemple typique d'un fluide absorbant pour les fondations d'énergie (un mélange d'antigel et d'eau). À cette fin, la loi de frottement de Newton peut être appliquée

$$T = \eta \frac{du}{dx} \quad (1)$$

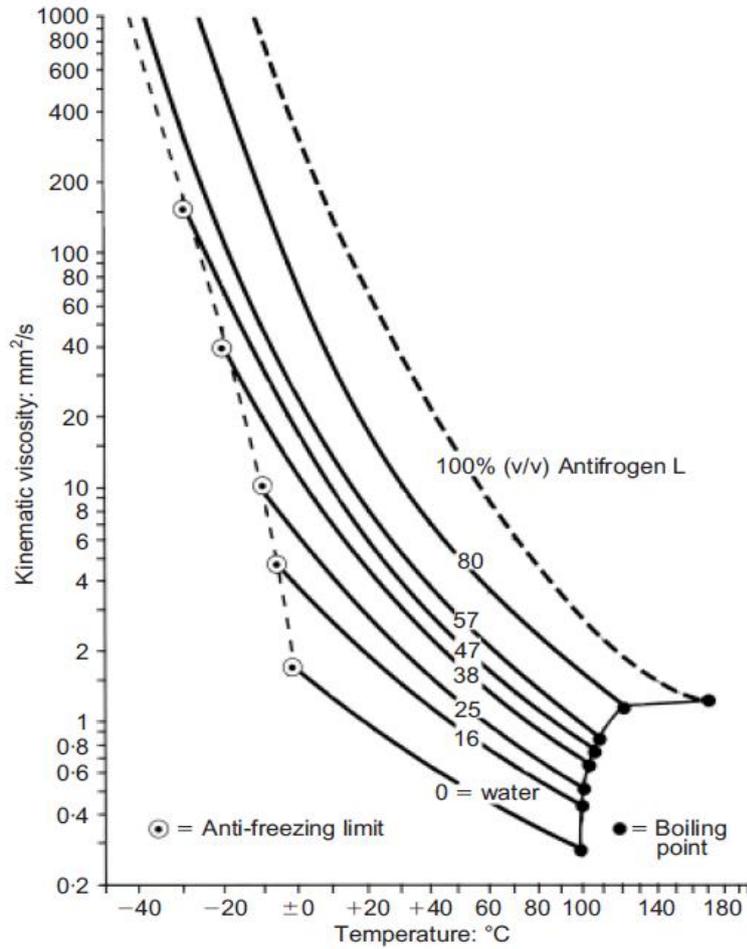


Figure III. 4 : Viscosité cinématique en fonction de la température pour différents mélanges d'eau et d'Antifrogen L (brandl 2006).

III-3. Transfert de chaleur par convection :

Le transfert de chaleur par convection est basé sur la loi de Fourier de transport de chaleur moléculaire, qui peut s'écrire pour un problème dimensionnel tel q l'équation du transfert de chaleur dans un pieu.

L'équation de conservation d'énergie est donnée par l'équation suivante :

$$A\rho_F C_{P-f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + A\rho_F C_{P-f} u_f \cdot \nabla T_f = \nabla \cdot A k_f \nabla T_f + f_D \frac{\rho_f A}{2d_h} |u_f| u_f^2 + Q_{wall} \quad (2)$$

Où A est la section intérieure du tuyau (m²), ρ_F est la densité du fluide (kg/ m³), C_{P-f} est la capacité thermique spécifique du fluide (J/kg/K), T_f est la température du fluide (C),

Chapitre III : Transfert De Chaleur Entre Le Fluide Absorbant Et Béton/Sol

u_f Est la vitesse d'écoulement du fluide (m/s), k_f est la conductivité thermique du fluide (W/m/K), f_D est le coefficient de perte de charge linéaire de Darcy, d_h est le diamètre hydraulique (m).

Le transfert de chaleur entre les tubes de l'échangeur de chaleur et leur environnement ambiant illustré comme suit :

$$Q_{wall} = h_{int} \cdot Z \cdot (T_{i-p} - T_f) \quad (3)$$

Où h_{int} est le coefficient de transfert thermique du film (W/m²/K), Z est le périmètre intérieur de la conduite (m) et T_{i-p} est la température intérieure de la conduite (C).

$$Q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4)$$

Où Q est la densité de flux de chaleur (W/m²), λ est la conductivité du fluide en mouvement (W/ (m K)), T est la température, et x est la coordonnée locale. Transfert de chaleur entre les masses ne bougeant pas par rapport à chacune d'elles, l'autre se produit par conduction.

Où q_w est la densité de flux de chaleur au niveau de la paroi du tuyau (W/m²). Le transfert de chaleur entre la paroi du tuyau et le fluide peut être décrit par le coefficient de transfert de chaleur α

$$\alpha = \frac{q_w}{T_{wall} - T_{fluid}} = \frac{-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{wall}}{\Delta T} \quad (5)$$

Et par le nombre de Nusselt Nu, qui est défini comme suit

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = \frac{-\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{wall}}{\Delta T / d} \quad (6)$$

La vitesse moyenne de l'écoulement laminaire est $\underline{U}_{min} = 0,5 U_{max}$, et pour l'écoulement turbulent $\underline{U}_{min} = (0,80 - 0,85) U_{max}$. La transition de l'état d'écoulement laminaire à l'état d'écoulement turbulent est décrite par le nombre de Reynolds Re.

$$Re = Ud/\nu \quad \text{avec} \quad \nu = \eta/\rho$$

Où U est la vitesse moyenne (m/s), d est le diamètre du tuyau (m), ν est la viscosité cinématique (m²/s), η est la dynamique viscosité (kg/m s), et ρ est la masse volumique (kg/m³). Sous un écoulement laminaire critique du nombre de Reynolds Re = 2300 se produit ; ci-

Chapitre III : Transfert De Chaleur Entre Le Fluide Absorbant Et Béton/Sol

dessus $Re > 10^4$ la turbulence se manifeste. Entre ces bornes, des conditions transitoires se produisent. La turbulence augmente le transfert diffusif d'énergie, d'impulsion et de masse. Cet effet augmente avec la vitesse d'écoulement.

Dans des conditions turbulentes, la vitesse de transfert de chaleur dépend non seulement de la vitesse propre du vecteur d'énergie (chaleur fluide porteur) mais aussi sur celle des fluctuations turbulentes, qui est liée à la vitesse d'écoulement moyenne du fluide absorbant. Par conséquent, le transfert de chaleur dépend également de la vitesse d'écoulement, et le coefficient de transfert de chaleur α est une fonction des propriétés du matériau, des dimensions géométriques, de la longueur de l'occurrence du transfert de chaleur et de la vitesse d'écoulement du fluide absorbant.

Calcul du gradient de température $\frac{\partial T}{\partial r}$ au niveau de la paroi paroi de tuyau n'est possible que tant que l'équation est valide à chaque point du fluide absorbant. Mais cela ne s'applique qu'à l'écoulement laminaire, ou vers des milieux immobiles. Durant la turbulence, l'équation n'est valable que pour la paroi du tuyau mais pas pour l'intérieur du fluide. À ce jour, il n'y a pas de théorie exacte à ce problème thermique ; ce dernier ne peut être résolu qu'à l'aide d'équations basées sur des données expérimentales (VDI, 1997).

III-4. Transfert de chaleur par convection forcée :

Les tuyaux d'absorption d'un échangeur de chaleur font partie d'un circuit fermé (circuit primaire de la Fig. III.5 où l'écoulement est créé par une pompe. C'est ce qu'on appelle la convection forcée. Généralement, le calcul est basé sur l'état stationnaire: conditions dans lesquelles les vitesses d'écoulement ne doivent pas être trop basses.

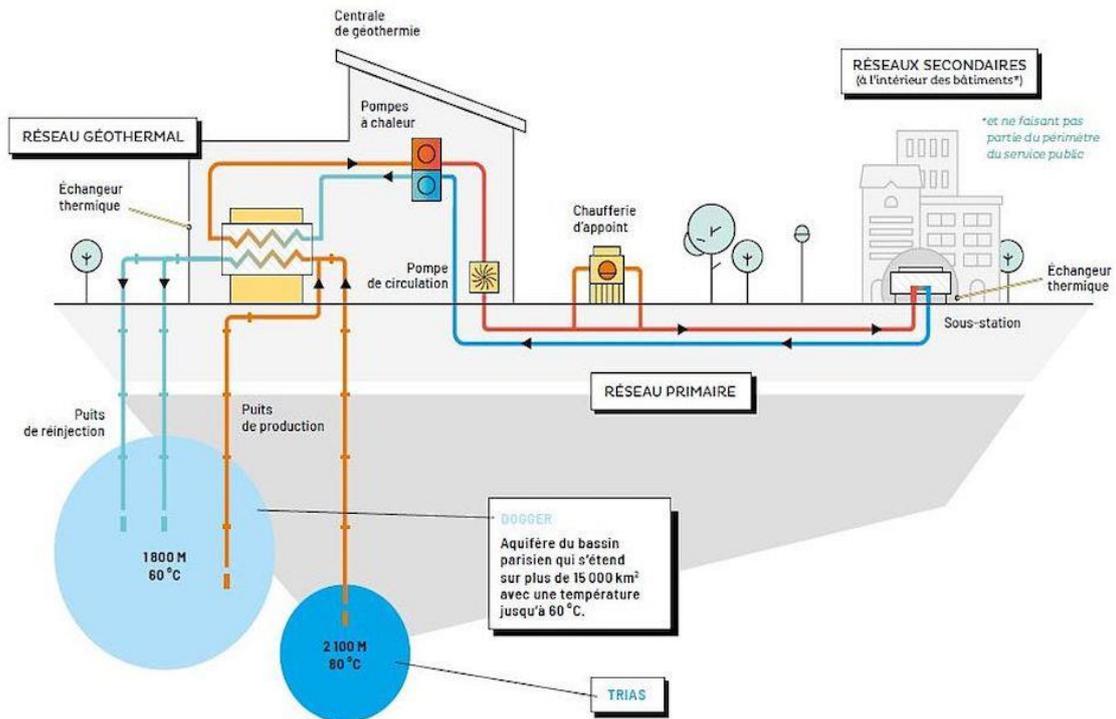


Figure III. 5: Schéma d'une centrale géothermique avec des pieux énergétiques et un flux d'énergie pour $COP = 4$ de la pompe à chaleur. Coefficient de performance $COP =$ définissant le rendement de la pompe à chaleur (brandl 2006).

La vitesse d'écoulement $u(r)$ à l'intérieur d'un circuit est différente à chaque point de la section transversale. Par conséquent, la période t pour quelles particules de fluide individuelles restent à l'intérieur d'un certain La section du tuyau d'absorbeur diffère. Les conditions unidimensionnelles peuvent être décrites par

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \quad (7)$$

Où ρ est la masse volumique, c est la capacité thermique spécifique et λ est la conductivité thermique du fluide qui s'écoule. Les différentes périodes de temps pendant lesquelles l'absorbeur de fluide reste en place. Les sections particulières sont $t = x/u(r)$ avec la distance radiale r selon la Fig. III.5. Cela conduit à

$$\rho c U(r) \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (7)$$

De plus, un autre coefficient sans dimension est utilisé pour études paramétriques, le nombre de Prandtl Pr , qui dépendant du matériau et est définie comme

$$Pr = \frac{V}{\alpha} = \frac{V\rho c}{\lambda} \quad (8)$$

Pour $Pr = 0$ le profil de vitesse le long d'un chemin d'écoulement x , où la chaleur est transférée, est équivalent au profil d'un piston coulé. Dans le cas de $Pr = \infty$ Le profil de vitesse correspond à l'écoulement Hagen-Poiseuille (Fig. III.6). Les fluides présentent des valeurs d'environ $Pr = 7$ pour l'eau propre jusqu'au point de congélation, et $Pr = 70$ pour un fluide visqueux, comme le mélange eau-glycol comme milieu antigel. Généralement, le transfert de chaleur dans le béton ou du sol vers le fluide absorbant se produit à une température de paroi de tuyau largement constante (T_w) sur toute la longueur du tuyau, en cas d'écoulement laminaire. Pour une température moyenne du fluide T_m , Le transfert de chaleur moléculaire peut alors être décrit par équation x Fig. III.7 (à gauche)

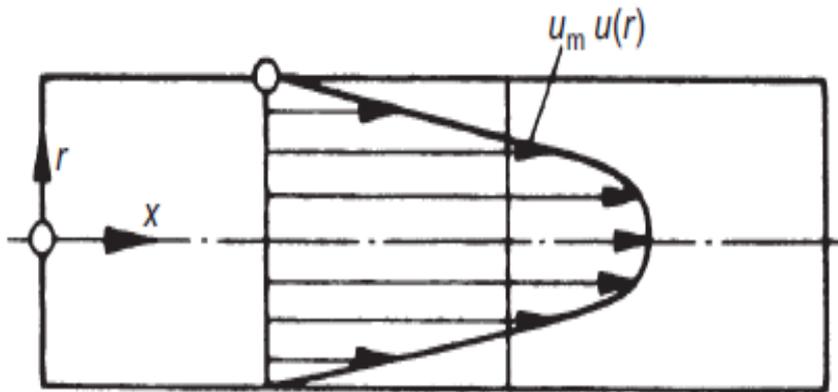


Figure III. 6: Distribution de la vitesse d'écoulement dans les conduites (parabole de Hagen-Poiseuille).

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_w - T}{T_w - T_m} \frac{dT_m}{dx} \quad (9)$$

$$\rho c U(r) = \left(\frac{T_w - T}{T_w - T_m} \right) \frac{dT_m}{dx} = \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) x \quad (10)$$

Dans le cas d'une densité de flux de chaleur constante $q_w = \alpha (T_w - T_m)$ le coefficient de transfert de chaleur α est constant

$$\alpha = \frac{q_w}{T_w - T_m} = \frac{\lambda}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right]_{\text{Mur}} \quad (11)$$

Dans ce cas, la différence de température $T_w - T_m$ est également constante, ce qui conduit à

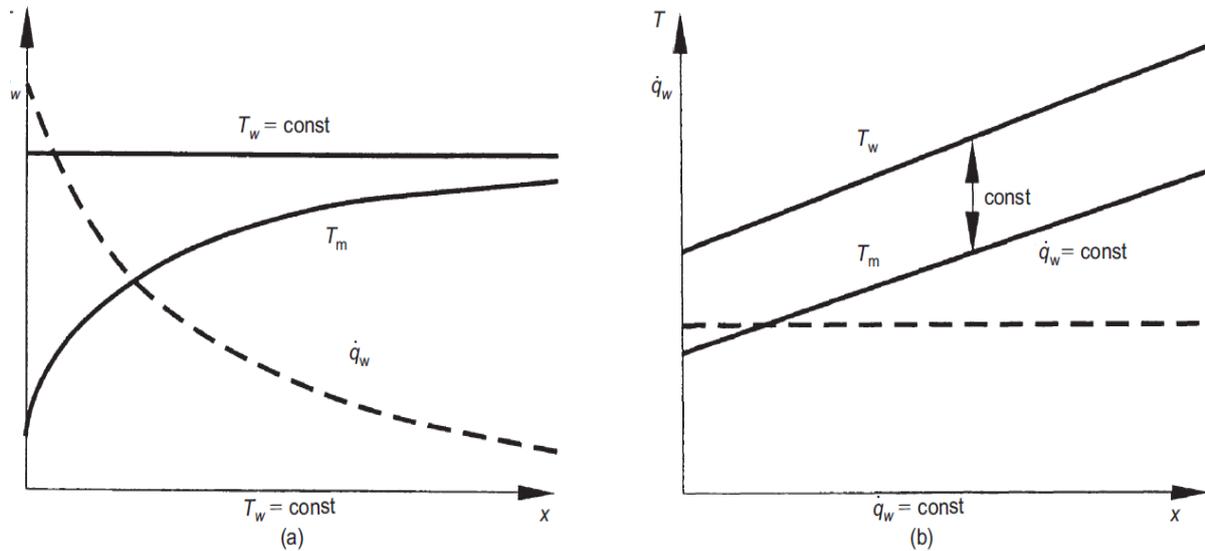


Figure III. 7: Conditions de chaleur à la paroi d'un tuyau d'absorbeur pour : (a) une température constante ; b) densité de flux de chaleur constante (brandl 2006).

La figure III.8 prend en compte les conditions d'écoulement laminaire et turbulent en fonction de l'adimensionnels Reynolds, Nusselt et Nombres de Prandtl. Lors de la détermination de ces paramètres, une dépendance possible de la température des propriétés du matériau doit être prise en compte, de sorte que, dans la pratique, seule la viscosité dynamique est influencée par les changements de température de manière pertinente. Ainsi, le nombre de Nusselt devient

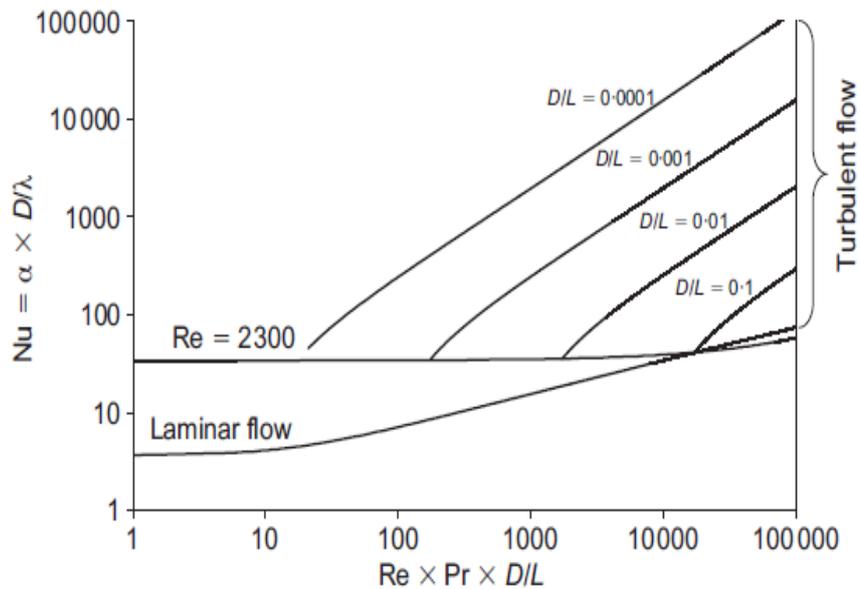


Figure III. 8: Transfert de chaleur de la paroi du tuyau absorbant au caloporteur fluide pour différentes conditions. Numéro Prandtl $Pr = 75$ (brandl 2006).

III-5. Simulations numériques :

Afin d'étudier l'influence de paramètres individuels et leur interaction, des études comparatives ont été menées par Mankiewicz, 2004. Il a mis en évidence les paramètres suivants : concentration du fluide absorbant (eau-glycol), paramètres traites ; Température environnante, T_m ; pompe performance, P ; efficacité de la pompe, η_p ; diamètre intérieur du tuyau, d ; rugosité de la paroi intérieure du tuyau, ε longueur de tuyau pour une performance particulière de la pompe, LP ; résistances spécifiques aux flux de chaleur, R_i ; longueur du tuyau pour le transfert de chaleur, L ; et la température de la paroi du tuyau, T_W .

La figure III.9 illustre le schéma d'une maison familiale. L'échangeur de chaleur au sol est idéalisé comme suit

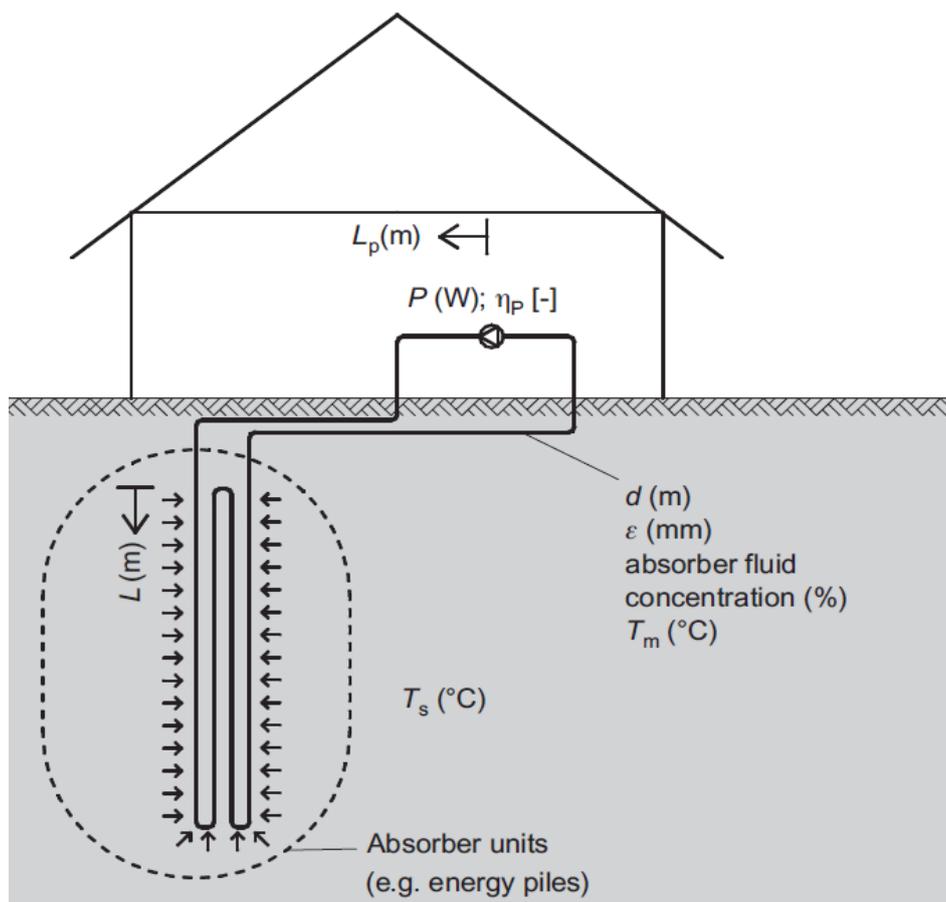


Figure III. 9: Schéma d'un système énergétique pour une maison ; symboles pour études paramétriques (brandl 2006).

III-6. PROJET PILOTE DE RECHERCHE A : CHAUFFAGE ET RAFFRAICHISSEMENT D'UN CENTRE DE RÉÉDUCATION :

La figure III.10 montre le plan de masse d'une grande surface, avec les zones A à J, où La plupart des piles d'énergie ont été installées. Le bâtiment dispose d'un volume de 90 000 m³, d'une surface utile de 21 500 m², plus une salle de natation, centre de remise en forme, et d'autres annexes. Il se compose de sept planchers, deux d'entre eux sous la surface du sol, et il a fallu être construit sur une pente instable et sujette au risque de glissement. Les études de terrain au cours de la phase de conception ont révélé que Les coûts de fonctionnement de ce centre pourraient être minimisés en l'extraction/le forage de l'énergie géothermique pour le chauffage/rafraîchissement en utilisant l'eau souterraine du sous-sol.

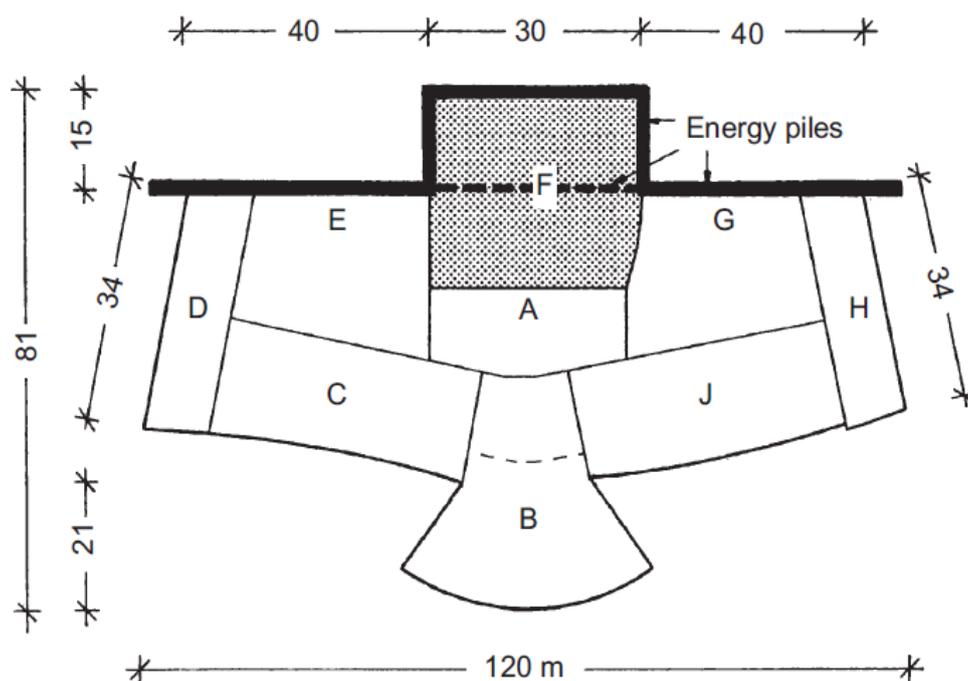


Figure III. 10: Plan du centre de rééducation de Bad Schallerbach, Autriche, avec les fondations A à J et une partie des murs de soutènement, équipés de pieux énergétiques. L'aire F repose sur une fondation de radeau sur pilotis ; les autres zones ne sont fondées que sur des radeaux (brandl 2006).

Les travaux de fondation ont été réalisés dans les années 1994 – 1995. Les pieux forés ont été excavés à l'aide d'un tubage et leur intégrité structurale a été vérifiée par essais dynamiques (TNO). Au total, 175 pieux forés (D 1/4 1,2 m) ont été installés, ayant trois fonctions :

- a) fondation de l'aire critique F
- b) les ouvrages de soutènement de la pente glissante
- c) les murs de soutènement de la fosse d'excavation de 14 m de profondeur

En raison de la surface inclinée de la zone de construction et des galeries collectrices profondes, les pieux ont dû être installés à des niveaux assez différents (Fig. III.11). La profondeur du poil variait en fonction des exigences statiques et des caractéristiques locales du sol : 9 à 11 m pour les pieux de fondation et 9 à 18 m (moyenne valeur 14 m) pour les pieux de retenue. La plupart des structures devaient être arrimées à l'aide d'ancrages précontraints (Fig.III.10).

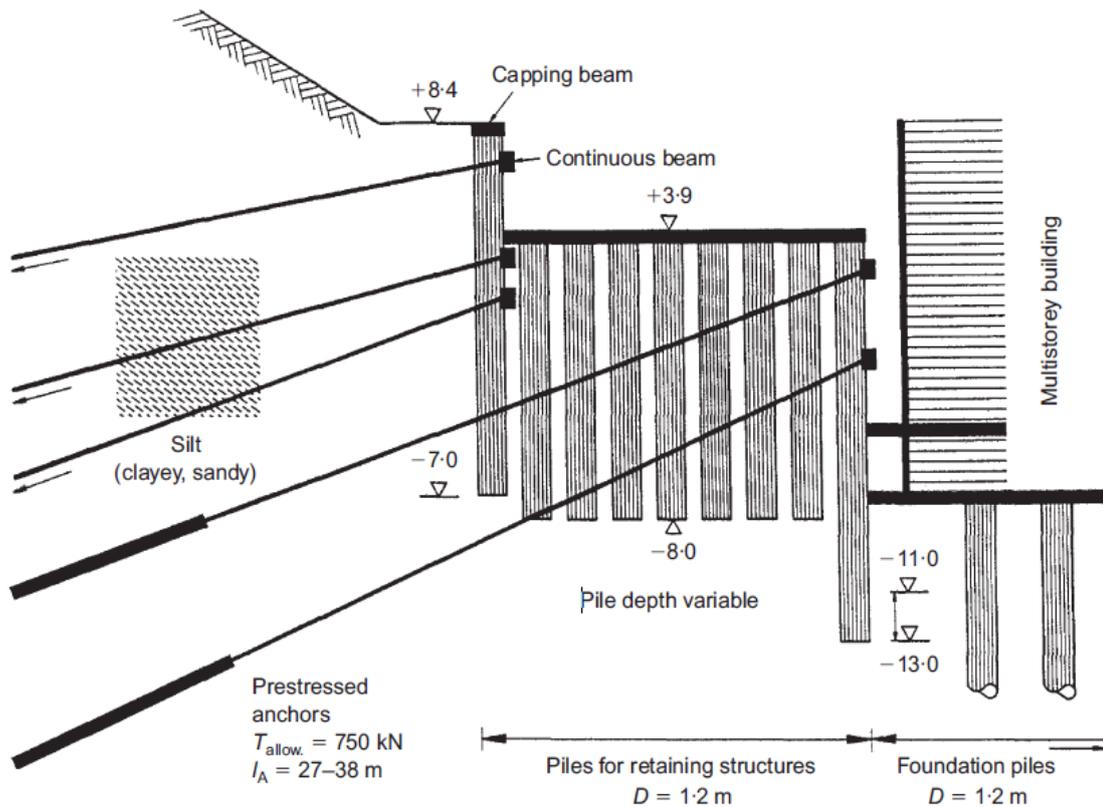


Figure III. 11: Vue partielle d'un mur de pieux d'énergie ancré sur le côté en amont du bâtiment, faisant partie du système de chauffage/rafraîchissement correspond à la section transversale A-A (brandl 2006).

III-7. Chauffage et climatisation d'un centre d'art :

Le deuxième cas fait référence à un exemple avec l'énergie pieux et parois moulées, tous deux installés pour la fondation du Centre des Arts de Bregenz, en Autriche. Le bâtiment dispose d'un volume structural de 28 000 m³ et une superficie de 33 500 m². La construction nécessitait une profondeur d'excavation allant jusqu'à 11 m. Les éléments de fondation comprenaient un diaphragme périphérique mur de 0,5 m, 0.9 m et 1,2 m d'épaisseur autour de l'excavation et les panneaux de paroi moulée (barrettes) et les piles de 1,2 m de diamètre. La profondeur du mur atteignait jusqu'à 28 m, et la La profondeur du pieu variait entre 17 m et 25 m.

Le sous-sol était constitué de 3,5 m de gravier près de la surface recouvrant les sables meubles et les argiles fragiles jusqu'à une profondeur d'environ 21 m sous terre. Ces jeunes sédiments reposaient sur par une moraine et enfin par un rocher. D'où les fondements ont été conçus

comme des éléments d'appui. Les nappes phréatiques se trouvaient à environ 1 m sous la surface.

Le bâtiment se compose d'une structure en béton coulé, incorporant Boucles de tuyauterie pour le chauffage en hiver et le refroidissement en été pour offrir un climat ambiant confortable. De plus, la collection d'art sensible permet un comportement hygrothermique du bâtiment nécessaire. Les variations admissibles de la température quotidienne et à long terme ; l'humidité est très faible, < 2 °C et 3 % respectivement.

III.8. RECOMMANDATIONS POUR LA PRATIQUE :

L'écoulement des eaux souterraines dans les sols à haute perméabilité est particulièrement adapté si seul le chauffage ou le rafraîchissement est envisagé. Cependant, le bilan énergétique est la forme idéale de chauffage/rafraîchissement saisonnier en hiver/été. Dans ce cas, un sol peu perméable et un faible gradient hydraulique de la nappe phréatique sont favorables. De plus, plus la différence de température entre l'énergie géothermique et l'énergie utilisée est faible, plus le facteur de performance saisonnier (FPS) est élevé, et donc l'efficacité du système thermoactif. Par conséquent, une étude détaillée du sol est essentielle pour optimiser un système d'absorption pour l'extraction/stockage de l'énergie thermique.

Habituellement, les fluctuations de température causées par les fondations énergétiques n'ont pas d'effet significatif sur le sol environnant, en supposant que sa température reste supérieure à +28 °C. Cependant, un rafraîchissement inférieur à 08 ° C, à la suite d'un mauvais fonctionnement.

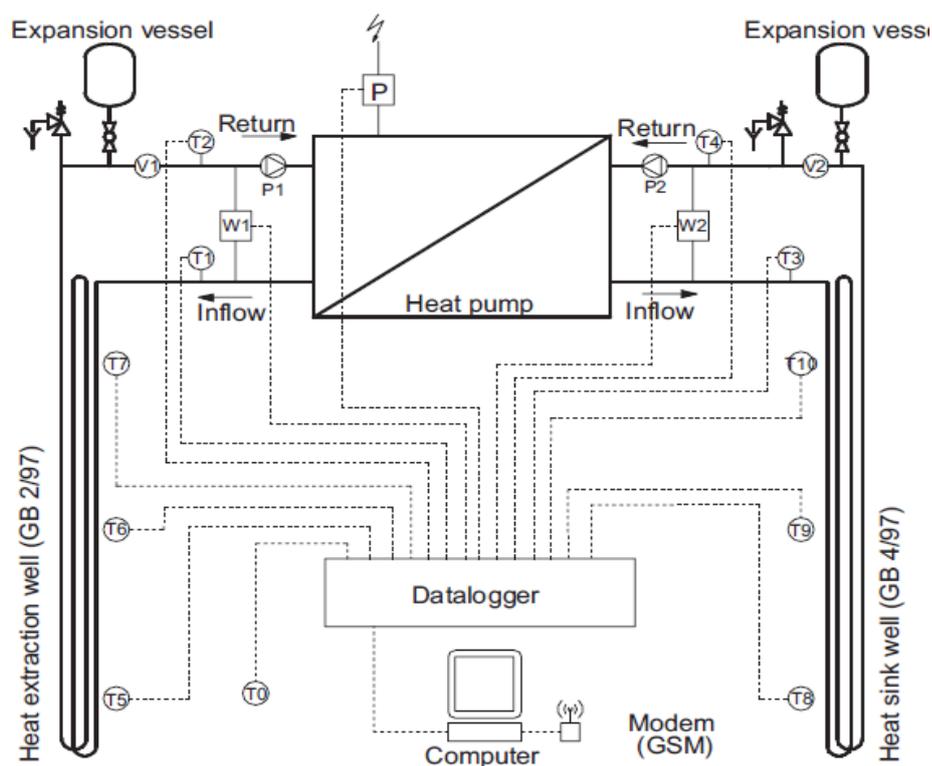


Figure III. 12: Schéma d'essai d'un « puits d'énergie » avec GB 2/97 comme puits d'extraction de chaleur et GB 4/97 comme puits de chaleur puits (brandl 2006).

Chapitre IV

Les pompes a chaleur

IV-1.Introduction :

Une pompe à chaleur est un dispositif qui transporte de la chaleur d'un niveau de température bas, vers un niveau de température plus élevé. Pour effectuer cela, elle a besoin d'une puissance d'entraînement. Cette dernière peut être mécanique, électrique ou thermique. Les pompes à chaleur les plus courantes fonctionnent selon le principe de la frigorifique par compression. On trouve aussi, mais plus rarement, des pompes à chaleur basées sur le processus d'absorption.

De manière générale, la pompe à chaleur prélève de l'énergie dans l'environnement : la plupart du temps dans l'air, les eaux souterraines, la terre ou les eaux fluviales. Lorsque cette énergie est prélevée dans le sol, on parle de géothermie de surface. Pour obtenir un rendement élevé, il est important que la température de la source d'énergie soit aussi élevée et constante que possible. Cette température ne doit pas trop baisser en hiver, au moment où la puissance de chauffe à fournir est la plus élevée. En ce qui concerne les eaux souterraines et la terre, les échangeurs de chaleur doivent avoir de très grandes dimensions afin d'éviter tout refroidissement local. Pour choisir la source de chaleur adéquate, il faut mettre en regard l'investissement financier, le rendement, la disponibilité et les démarches requises pour obtenir les autorisations. L'utilisation de la chaleur perdue de faible niveau, comme l'air extrait ou l'eau de refroidissement, constitue une option avantageuse.

Chapitre IV : Les pompes à chaleur

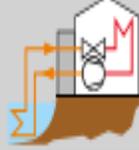
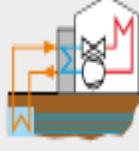
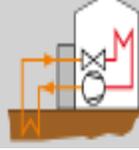
Source d'énergie	Avantage	Inconvénient
air extérieur 	investissements faibles	COP inférieur en hiver
eaux fluviales 	investissements faibles	COP inférieur en hiver
eaux souterraines 	bonne puissance constante	investissements plus élevés, autorisations requises
terre 	bonne puissance constante	plus grande surface requise

Figure IV. 1: les avantages et les inconvénients de différentes sources d'énergie.

IV-2. Les différents types de pompe à chaleur :

IV-2.1 Pompe à chaleur air / air :

Une pompe à chaleur air / air est composée d'une unité extérieure qui utilise les calories présentes dans l'air pour créer de la chaleur qui est ensuite diffusée dans le logement.

- Elle permet une installation avec mono split ou *multi split* pour une distribution de chaleur dans plusieurs pièces de la maison.
- Il convient d'éloigner l'unité extérieure qui est assez bruyant des pièces à vivre.
- Ce type de pompe à chaleur peut être *réversible*. Il est une solution de chauffage pour l'hiver, et une solution de climatisation l'été.
- Il est nécessaire de disposer d'un chauffage d'appoint quand les températures extérieures sont trop basses.
- Ce type de pompe à chaleur ne permet pas de produire de l'eau chaude sanitaire.

Chapitre IV : Les pompes à chaleur

- L'investissement nécessaire pour l'acquisition et l'installation d'une pompe à chaleur varie de 5 000 à 10 000 € (en Europe).

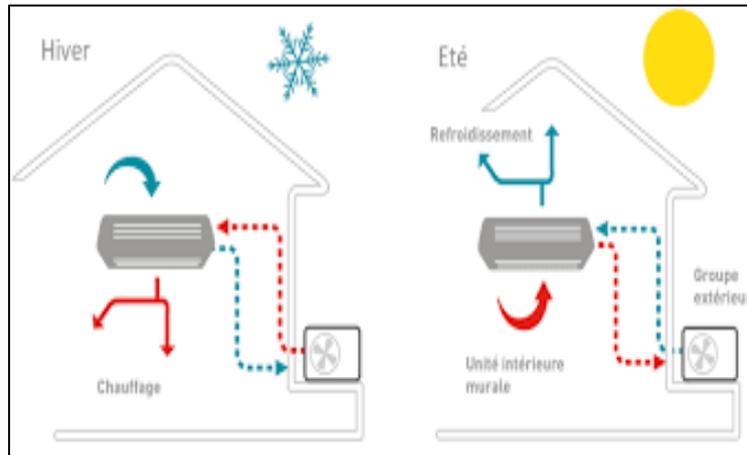


Figure IV. 2: Pompe à chaleur air / air.

IV-2.2 Pompe à chaleur air / eau :

Une pompe à chaleur air / eau exploite les calories présentes dans l'air extérieur pour chauffer de l'eau. Cette dernière, une fois chauffée, peut servir comme *eau chaude sanitaire* ou être distribuée dans un circuit hydraulique pour votre chauffage.

- Elle peut alimenter des radiateurs à eau chaude basse température ou un plancher chauffant.
- Elle peut produire de l'eau chaude sanitaire.
- Elle permet un rafraîchissement mais pas de climatisation.
- Ce type de pompe à chaleur fonctionne par aérotherme avec une unité extérieure.
- Certains modèles de pompe à chaleur air / eau supportent des températures extérieures très basses.
- L'investissement nécessaire pour l'acquisition et l'installation d'une pompe à chaleur air / eau varie de 6 000 à 16 000 € (en Europe).

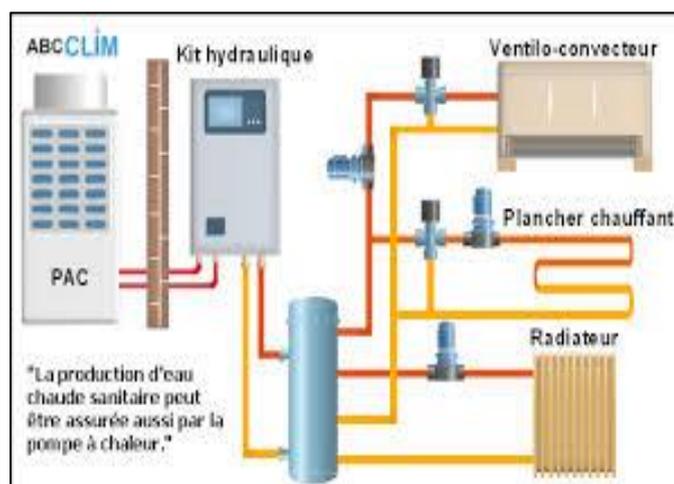


Figure IV. 3: Pompe à chaleur air / eau.

IV-2.3 Pompe à chaleur sol / air :

Une pompe à chaleur sol / air utilise la chaleur du sol collectée à l'aide de capteurs pour la restituer sous forme d'air chaud dans le logement. Le principe de fonctionnement utilisé est la *géothermie*.

- L'installation de ce type de pompe à chaleur est assez complexe car il faut pour cela implanter les capteurs dans votre terrain.
- Les capteurs peuvent être horizontaux. Ils sont alors enfouis à une profondeur d'1 mètre environ sous la surface du sol. Pour être performante, cette installation nécessite de couvrir au moins 200 m² de surface.
- Les capteurs verticaux sont la solution idéale si vous disposez d'un petit terrain. En effet, ils sont enfouis de façon verticale jusqu'à une profondeur comprise entre 80 et 100 mètres. Cette installation nécessite des travaux de forage, ce qui augmente le coût des travaux.
- Les capteurs ainsi enterrés permettent un fonctionnement de votre pompe à chaleur, même lors de températures hivernales extrêmes.
- L'investissement nécessaire pour l'acquisition et l'installation d'une pompe à chaleur sol / air dépendra du type de capteur installé. Le coût global du projet peut coûter entre 7 000 à 16 000 € avec des capteurs horizontaux, et de 14 000 à 25 000 € pour des capteurs verticaux.



Figure IV. 4: Pompe à chaleur sol / air (Captage horizontal)

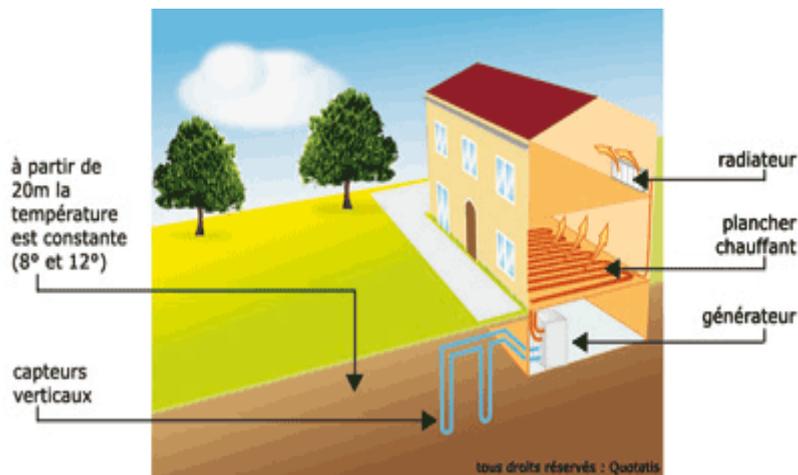


Figure IV. 5: Pompe à chaleur sol / air (Captage vertical)

IV-2.4 Pompe à chaleur sol / eau :

Une pompe à chaleur sol / eau a le même principe de fonctionnement qu'une PAC sol / air. Les capteurs enterrés sous terre récupèrent également la chaleur du sol, mais ici, pour produire de l'eau chaude.

- Ce principe de géothermie permet de produire de l'eau chaude sanitaire.
- L'eau ainsi chauffée peut également être distribuée dans un circuit de chauffage pour alimenter des radiateurs à eau chaude ou un plancher chauffant.

Chapitre IV : Les pompes à chaleur

- Tout comme une pompe à chaleur sol / air, les capteurs peuvent être horizontaux ou verticaux.
- L'investissement nécessaire pour l'acquisition et l'installation d'une pompe à chaleur sol / eau peut varier entre 18 000 à 30 000 € selon le type de capteurs utilisés.

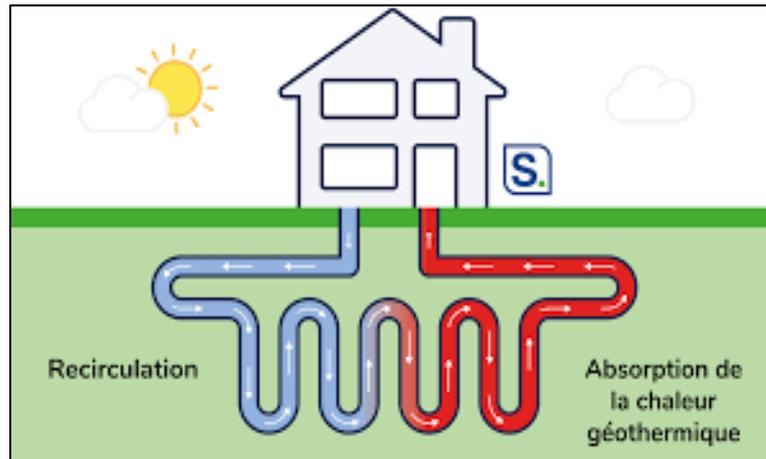


Figure IV. 6: Pompe à chaleur sol / eau

IV-2. 5 Pompe à chaleur eau / eau :

Le type de pompe à chaleur eau / eau est moins répandu mais comme toute pompe à chaleur fonctionnant par géothermie, celle-ci est très performante. Ce sont ici les calories présentes dans une source d'eau pour produire de la chaleur.

- L'eau chaude ainsi produite peut servir d'eau chaude sanitaire, mais peut également alimenter un réseau de *chauffage par le sol* ou des radiateurs à eau chaude basse température.
- Il est nécessaire de vivre à proximité d'une source d'eau comme une rivière, un fleuve ou une nappe phréatique.
- Ce type d'installation est très réglementé. Il vous faut obtenir une autorisation pour effectuer le forage nécessaire permettant d'atteindre la source d'eau.
- Il est parfois nécessaire de creuser 2 puits, le premier pour pomper l'eau et ainsi récupérer les calories et le deuxième qui permet de renvoyer l'eau à son point d'origine.

Chapitre IV : Les pompes à chaleur

- Une pompe à chaleur eau / eau permet une autonomie tout au long de l'année.
- L'investissement nécessaire pour l'acquisition et l'installation d'une pompe à chaleur eau / eau peut varier entre 10 000 à 25 000 € selon le type de capteurs utilisés et la complexité pour parvenir jusqu'à la source d'eau.

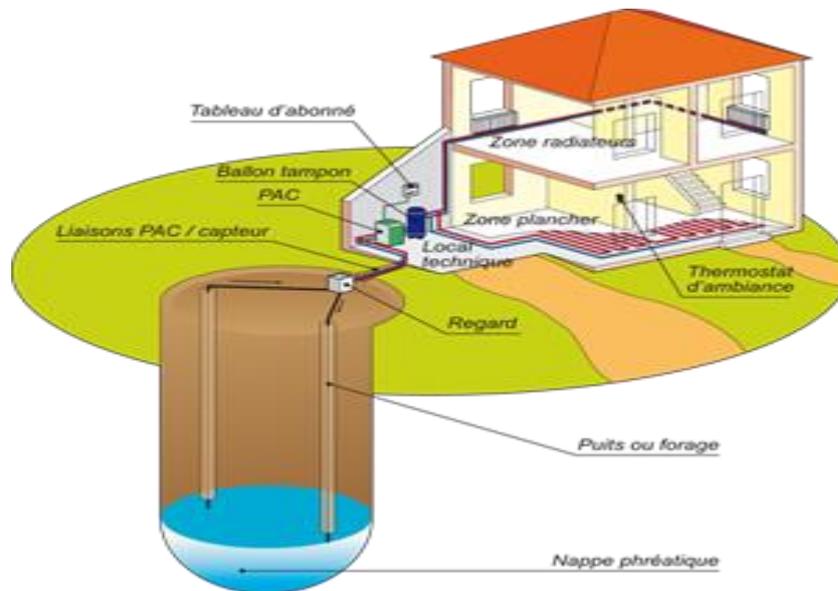


Figure IV. 7: Pompe à chaleur eau / eau

IV-2. 6 Pompes à chaleur géothermiques

Les systèmes de pompes à chaleur géothermiques (GSHP), utilisent le sol comme moyen d'échange de chaleur avec le milieu environnant par le biais d'échangeurs de chaleur souterrains. Les échangeurs de chaleur souterrains sont divisés principalement en deux types, à savoir le type ouvert et le type fermé. Le système de type ouvert utilise directement l'eau souterraine pour échanger de la chaleur avec le GSHP. Cela exige la disponibilité d'un débit d'eau souterraine suffisant, et la qualité de l'eau souterraine limite également l'applicabilité du système. Par ailleurs, les systèmes de type fermé, dans lesquels les tuyaux sont installés sous la surface du sol, sont plus courants.

Une pompe à chaleur géothermique comprend trois composants principaux :

- Un sous-système de connexion à la terre : Permet l'extraction de la chaleur du sol par une boucle d'échangeur de chaleur à intégrer à l'unité de pompe à chaleur.
- Sous-système de la pompe à chaleur : Transférer la chaleur entre le bâtiment et le sol et modifiant sa température.

- Le sous-système de distribution de la chaleur intérieure : Contrôle et distribue la chaleur

Dans l'espace.

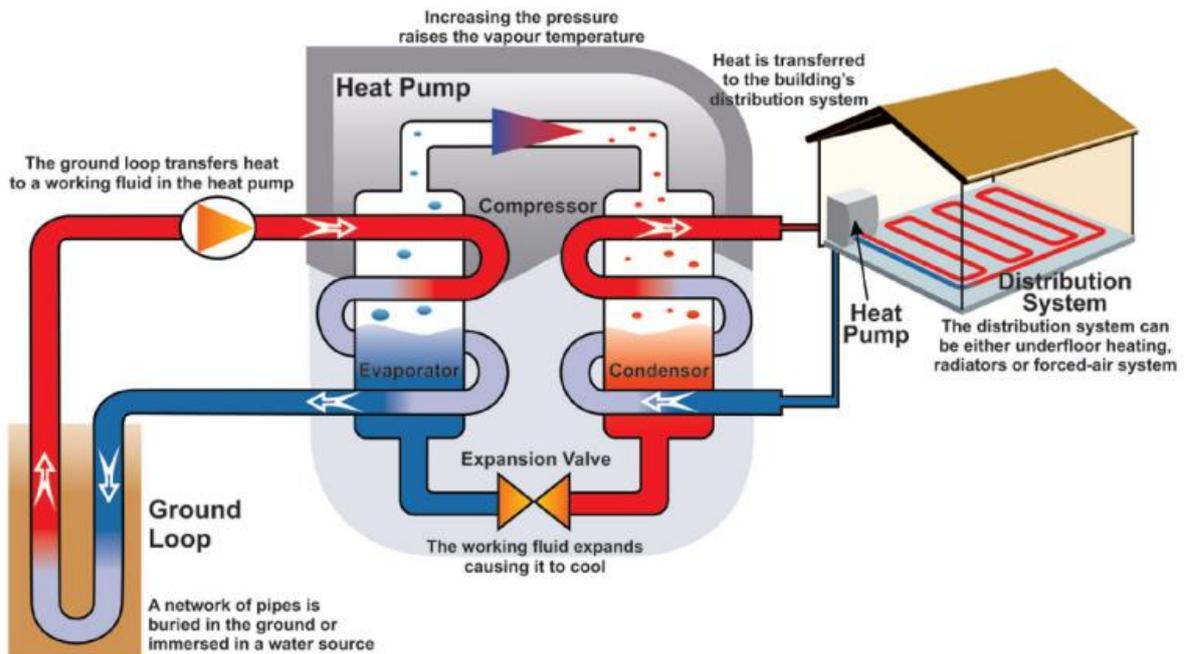


Figure IV. 8: Schéma de la pompe à chaleur géothermique (en mode chauffage).

En mode chauffage, la pompe à chaleur géothermiques fonctionnement comme suit :

- 1) La chaleur est extraite de la terre et transportée jusqu'à l'évaporateur.
- 2) A l'intérieur de l'unité de la pompe à chaleur, le réfrigérant froid, dans un état liquide dominant état liquide/vapeur, entre dans l'évaporateur. La chaleur est transmise de la connexion à la terre au réfrigérant où le réfrigérant bouille et devient une vapeur à basse pression, la température augmente légèrement.
- 3) La vapeur entre dans un compresseur à entraînement électrique, où la pression est augmentée, ce qui donne une vapeur à haute température et à haute pression.
- 4) La vapeur à haute température entre dans le condenseur. Le réfrigérant est à une température plus grande que celle de l'espace, produisant un transfert de chaleur du réfrigérant vers le bâtiment. Le réfrigérant se refroidit et se condense, ce qui donne une pression élevée, liquide à haute température.

- 5) Le liquide chaud passe à travers une valve d'expansion qui réduit sa pression, entraînant une diminution de la température. Le réfrigérant entre dans l'évaporateur pour recommencer un autre cycle.

En mode refroidissement, une vanne d'inversion est utilisée pour déplacer le fluide dans la direction inverse dans le cycle. L'échangeur de chaleur de la connexion à terre au frigorigène devient le condenseur et l'échangeur de chaleur du réfrigérant à l'air devient l'évaporateur.

IV-3. Cycle thermodynamique idéal du fluide qui circule dans la pompe à chaleur :

La majorité des pompes à chaleur fonctionnent selon le même principe qu'un réfrigérateur. Cela veut dire qu'elles utilisent le cycle thermodynamique, aussi appelé cycle frigorifique, pour retirer des calories à un endroit afin de les restituer dans un autre. Ce cycle utilise les propriétés physiques d'un fluide particulier, appelé fluide frigorifique, en le faisant capter ou rejeter de la chaleur selon la pression à laquelle il est soumis.

Ce cycle est utilisé pour générer du chaud comme du froid. C'est pourquoi on l'utilise dans les pompes à chaleur comme dans les procédés de refroidissement.

IV-3.1 Principe de fonctionnement :

Afin de comprendre le cycle frigorifique, il est tout d'abord nécessaire d'en maîtriser ses bases physiques.

Comme chacun sait, il existe 3 états de la matière à savoir : solide, liquide et gazeux. Il est courant de dire que ces 3 états dépendent de la température.

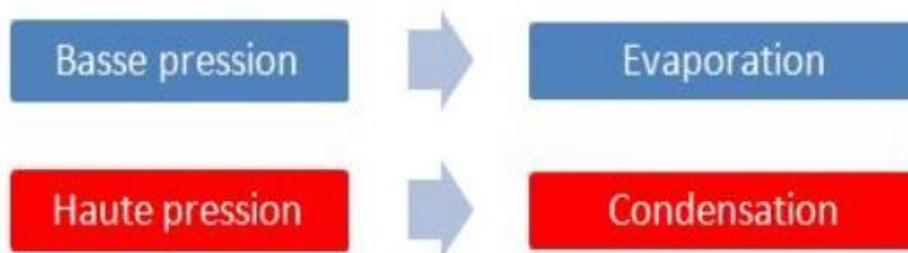
Prenons l'exemple connu de l'eau. On a l'habitude de dire qu'elle est à l'état solide en dessous de 0°C. De 0 à 99°C, elle est à l'état liquide et à partir de 100°C elle passe à l'état gazeux.

Mais cela est seulement vrai dans les conditions de pression atmosphérique normales à savoir 1 atm soit environ 1 bar ou 100 000 Pa.

Si les conditions de pression changent, les températures de changement d'état vont également varier. Ainsi, à une pression plus basse, une matière à l'état liquide nécessitera une température moins importante pour passer à l'état gazeux. A l'inverse, si on augmente la pression dans une matière à l'état gazeux, son passage à l'état liquide se fera dans des conditions de température bien moindres.

Chapitre IV : Les pompes à chaleur

C'est précisément ce principe qui est utilisé avec le fluide frigorigène d'une pompe à chaleur ou d'un frigo. Le fluide liquide est amené à une pression basse où son point d'évaporation est réduit. La chaleur nécessaire à son passage à l'état gazeux est captée dans le milieu. Le fluide est ensuite comprimé et amené à haute pression où sa température de condensation (soit son passage de l'état gazeux à liquide) sera bien moindre. La chaleur doit se débarrasser pour changer d'état est relâchée et le fluide redevient liquide. Il est ensuite détendu à basse pression et le cycle peut recommencer.



Il est à noter que le fluide utilisé est choisi selon sa capacité à absorber/ relâcher la chaleur à des pressions données. Chaque fluide possède ses caractéristiques et certains fluides seront par exemple davantage utilisés pour créer du chaud alors que d'autres correspondront plus à la création de froid.

IV-3.2 Notions de diagramme enthalpique :

Le diagramme enthalpique, aussi appelé diagramme de Mollière, est une notion importante dans la compréhension du cycle frigorigène. Il s'agit d'un graphique spécifique à chaque fluide exprimant son niveau de saturation pression-température sous forme de cloche.

L'axe des abscisses exprime l'enthalpie du fluide soit la quantité d'énergie contenue pour 1 kg de ce dernier. L'axe des ordonnées est consacré à la pression. De manière très simplifiée, voici un diagramme d'enthalpie montrant la cloche de saturation d'un fluide:

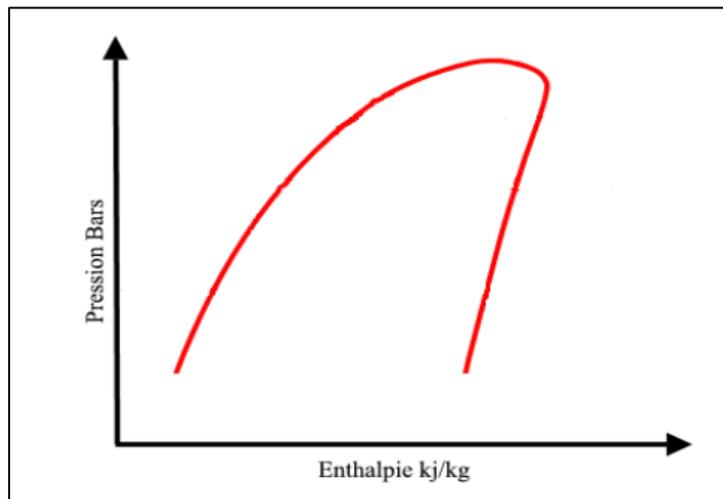


Figure IV. 9: Diagramme enthalpique.

Au-delà de cette cloche, le fluide est saturé et ne peut plus changer d'état.

IV-3.3 Description du cycle :

Afin de comprendre comment fonctionne le cycle frigorifique, il est important de considérer chacune de ses étapes et leur fonctionnement spécifique. Ce cycle comporte 4 étapes principales à savoir :

- ✓ L'évaporation
- ✓ La compression
- ✓ La condensation
- ✓ La détente

Selon l'étape, le fluide sera à pression, température et/ou état différent. Le changement de pression est la clé du système frigorifique car elle permet au fluide d'être dans les conditions idéales pour capter ou relâcher les calories.

Voici un schéma-type d'un cycle frigorifique en rapport avec le diagramme enthalpique :

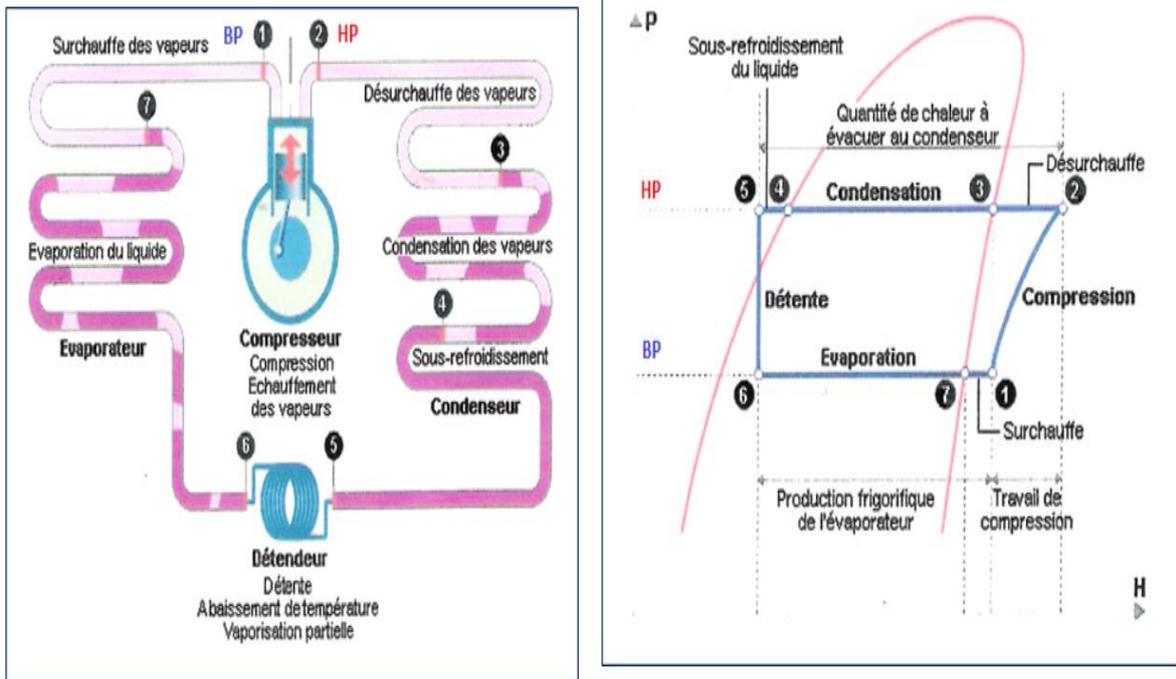


Figure IV. 10: cycle frigorifique en rapport avec le diagramme enthalpique.

HP : Haute pression

BP : Basse pression

1-2 : Compression

3-4 : Condensation

5-6 : Détente

6-7 : Evaporation

Voici un descriptif de chaque étape :

❖ **Compression (1-2) :**

Chapitre IV : Les pompes à chaleur

La compression est opérée par le compresseur. Celui-ci est un élément du système chargé d'amener le fluide de la **basse pression** à la **haute pression**. Il va compresser le fluide afin d'y augmenter la pression.

Le compresseur est généralement entraîné grâce à de l'énergie électrique et la compression s'y fait la plupart du temps de manière mécanique.

Il est important que le fluide soit entièrement à l'état gazeux pour cette étape car de nombreux compresseurs sont sensibles aux **coups de liquide** c'est-à-dire à la compression d'un liquide. Le fluide à l'état liquide ne réclamant pas les mêmes conditions de compression, il risque de gravement endommager le compresseur s'il y est amené. C'est pourquoi des dispositifs sont prévus pour empêcher ce type d'accident. Nous y reviendrons plus loin.

Par ailleurs, de nombreux compresseurs nécessitent une lubrification constante afin de fonctionner correctement. On mêle alors de l'huile spécialement adaptée au fluide frigorigène lorsqu'il passe par le compresseur.

❖ **Condensation (3-4) :**

A ce niveau, le fluide est à **haute pression** et chargé des calories captées à l'évaporateur. Son niveau de pression le rend très enclin à céder la chaleur dont il est chargé. Il passe dans un échangeur appelé condenseur où toutes ses calories vont être relâchées alors qu'il repasse à l'état liquide en se condensant. On dit que le milieu dans lequel l'échangeur est installé est la **source chaude** du cycle.

Dans le cas de production de froid, la chaleur relâchée au condenseur peut être soit perdue dans l'environnement soit récupérée selon les cas. La récupération nécessitera alors un dispositif adéquat.

Dans le cas de production de chaleur, c'est l'énergie relâchée par le condenseur qui va être utilisée pour chauffer les locaux. Il faudra donc veiller à ce qu'elle soit maximale.

❖ **Sous-refroidissement (4-5):**

Le fluide est sous-refroidi afin d'assurer son passage total à l'état liquide. Le sous-refroidissement est généralement de 4 à 7°C.

Contrairement à la surchauffe, il n'est pas toujours contrôlé car ne présente pas un danger direct pour les composants de l'installation. Il a néanmoins une influence sur l'efficacité du cycle et doit être pris en compte.

❖ **Détente (5-6) :**

Au niveau de la détente, le fluide frigorigène déchargé de ses calories est ramené de **haute pression** à **basse pression**. Cette diminution de pression est nécessaire afin d'amener le fluide dans des conditions où il pourra à nouveau capter de la chaleur de manière optimale.

Le détendeur est également un dispositif de régulation de débit dans l'installation. Il est pour cela relié de manière physique ou électronique à la sortie de l'évaporateur où il mesure la température du fluide. Il modulera ensuite le débit en fonction de cette dernière.

❖ **Evaporation (6-7):**

Elle est mise en œuvre grâce à un échangeur de chaleur appelé évaporateur. On dit qu'il se situe au niveau de la source froide. Le fluide frigorigène y capte la chaleur de l'ambiance afin de passer de l'état liquide à l'état gazeux. Il est alors à **basse pression** et sa température d'évaporation est faible.

Dans le cas de production de froid, on place l'évaporateur dans l'espace à refroidir. Dans le cas d'une pompe à chaleur utilisée pour faire du chaud, l'évaporateur sera placé dans le milieu fournissant les calories.

IV-4 Efficacité énergétique de la pompe à chaleur :

IV-4.1 Le coefficient de performance :

Le fonctionnement d'une pompe à chaleur est caractérisé par le coefficient de performance (COP) défini comme le rapport entre la production du rendement utile (énergie thermique utile EU) et l'énergie consommée pour l'obtenir (énergie d'entraînement ED).

$$COP = \frac{E_U}{E_D} \quad (1)$$

Si l'on additionne l'énergie utilisable et l'énergie consommée au cours d'une saison (année), on obtient par l'équation (1) le coefficient de performance saisonnier (COP seasonal), qui est souvent désigné par le terme SPF.

Chapitre IV : Les pompes à chaleur

En mode chauffage, le COP est défini par l'équation :

$$COP = \frac{Q_{HP}}{P_e} \quad (2)$$

Dans lequel : Q_{HP} est la puissance thermique (capacité) de la pompe à chaleur, en W ; P_e est la puissance d'entraînement de la pompe à chaleur, en W.

En mode refroidissement, une pompe à chaleur fonctionne exactement comme un climatiseur central. Le taux d'efficacité énergétique (EER) est identique au COP mais indique la performance en matière de refroidissement. L'EER, en Btu/(Wh) est défini par l'équation :

$$EER = \frac{Q_0}{P_e} \quad (3)$$

Dans laquelle : Q_0 est la puissance frigorifique de la pompe à chaleur, en unité thermique britannique par heure (Btu/h) ; P_e est la puissance d'entraînement de la pompe à chaleur, en W.

Le coefficient de performance de la pompe à chaleur en mode refroidissement est obtenu par l'équation :

$$COP = \frac{EER}{3.413} \quad (4)$$

Où la valeur 3,413 est le facteur de transformation du Watt en Btu/h.

La figure IV.12 présente un exemple de la variation du COP des pompes à chaleur, en mode chauffage, en fonction de la température des sources et de la température tu au niveau du consommateur.

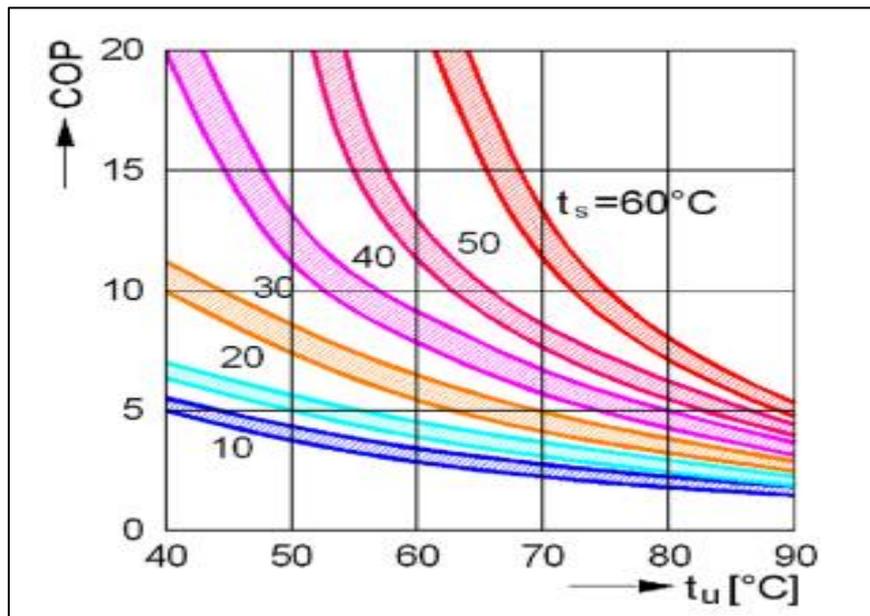


Figure IV. 11: Variation de l'efficacité des pompes à chaleur.

Les systèmes GSHP destinés à l'eau souterraine ou au système de four ont des COP de chauffage allant de 3,0 à 4,0 et un EER de refroidissement allant de 11,0 à 17,0.

Les systèmes destinés pour les applications en circuit fermé ont un COP compris entre 2,5 et 4,0 tandis que l'EER varie entre 10,5 et 20,0.

Le facteur de dimensionnement (SF) de la pompe à chaleur est défini comme le rapport entre la capacité de la pompe à chaleur Q_{HP} et la demande de chauffage maximale Q_{max} .

$$SF = \frac{Q_{HP}}{Q_{max}} \quad (5)$$

Le facteur de dimensionnement peut être optimisé en termes d'énergie et d'économie, en fonction de la température de la source et de la d'ajustement utilisée.

IV-4.2 Rentabilité et capacités de la pompe à chaleur avec électro compresseur :

Les facteurs qui peuvent affecter l'efficacité du cycle de vie d'une pompe à chaleur sont les suivants :

Chapitre IV : Les pompes à chaleur

- ✓ La méthode locale de production d'électricité ;
- ✓ Le climat ;
- ✓ Le type de pompe à chaleur (géothermique ou aérothermique) ;
- ✓ Le fluide frigorigène utilisé ;
- ✓ La taille de la pompe à chaleur ;
- ✓ Les contrôles du thermostat ;
- ✓ La qualité du travail lors de l'installation.

En tenant compte du fait que la pompe à chaleur a un rendement supérieur à l'unité, l'évaluation de la manière dont est évaluée l'énergie primaire consommée se fait à l'aide d'un indicateur synthétique.

$$\eta_s = \eta_g \cdot \text{COP} \quad (7)$$

$$\eta_s = \eta_p \cdot \eta_t \cdot \eta_{em} \quad (8)$$

Où η_g est le rendement global ; p, t, em sont la production d'électricité, le transport et le rendement de l'électromoteur, respectivement.

Pour justifier l'utilisation de la pompe à chaleur, l'indicateur synthétique doit satisfaire la condition $\eta_s > 1$. En outre, l'utilisation de la pompe à chaleur ne peut être envisagée que si le $\text{COP} > 2,78$.

Le COP d'une pompe à chaleur est limité par la deuxième loi de la thermodynamique :

- En mode chauffage :

$$\text{COP} \leq \frac{t_u}{t_u - t_s} = \varepsilon_c \quad (9)$$

- En mode refroidissement :

$$\text{COP} \leq \frac{t_s}{t_u - t_s} \quad (10)$$

Où t_u , t_s sont les températures absolues de la source chaude (condensation) et de la source froide (évaporation), respectivement, en K.

La valeur maximale ε_c de l'efficacité peut être obtenue dans le cycle de Carnot inversé.

IV-5 Les performances environnementales :

Les pompes à chaleur géothermiques fonctionnent avec l'environnement pour fournir un chauffage et un refroidissement propres, efficaces et économes en énergie tout au long de l'année. Les pompes à chaleur consomment moins d'énergie que les autres systèmes de chauffage et de refroidissement, ce qui contribue à préserver les ressources naturelles. Il s'agit d'une technologie importante pour réduire les émissions de gaz nocifs pour l'environnement, tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le dioxyde de soufre (SO₂) et les oxydes d'azote (NO_x).

Les pompes à chaleur alimentées par de l'électricité provenant, par exemple, de l'énergie hydraulique ou d'énergies renouvelables réduisent les émissions de manière plus significative que si l'électricité est produite par des centrales au charbon, au pétrole ou au gaz naturel.

Les émissions de CO₂ pour les différentes sources d'énergie primaire sont résumées dans Tableau suivant :(Ioan Sarbu 2014)

CO₂ emissions for different primary energy sources.

No.	System	Efficiency	CO ₂ emission per kWh of fuel [kg CO ₂ /kWh]	CO ₂ emission per kWh of useful heat [kg CO ₂ /kWh]
0	1	2	3	4
1	Coal boiler	0.70	0.34	0.49
2	Gas-oil boiler	0.80	0.28	0.35
3	LPG boiler	0.80	0.25	0.31
4	Natural gas boiler	0.80	0.19	0.24
5	Air-to-air heat pump	2.50	0.47	0.19
6	Ground-to-water heat pump	3.20	0.47	0.15

Figure IV. 12: Les émissions de CO₂ pour les différentes sources d'énergie.

Les GSHP utilisent l'énergie renouvelable ou solaire stockée dans le sol près des surfaces. Cette Technique permet d'éviter le recours aux combustibles primaires qui, lorsqu'ils sont

Chapitre IV : Les pompes à chaleur

brûlés, produisent des émissions de gaz à effet de serre et contribuent au réchauffement climatique.

Une analyse a été réalisée par (Epa, 19997) pour estimer l'impact équivalent total du réchauffement des

GSHP par rapport à d'autres systèmes de chauffage et de refroidissement dans les bâtiments résidentiels, commerciaux et institutionnels. Les résultats de la modélisation montrent des réductions d'émissions de CO₂ de 15 à 77 % grâce à l'utilisation de pompes à chaleur dans les bâtiments résidentiels et commerciaux.

La flexibilité unique des pompes à chaleur géothermiques leur permet d'être utilisées dans les bâtiments résidentiels et commerciaux à travers les États-Unis, le Canada et l'Europe. En ce qui concerne les émissions de CO₂, on constate que les pompes à chaleur géothermiques concurrencent les chaudières à condensation dans des pays comme l'Allemagne, le Royaume-Uni et les États-Unis (Huchement, 2012). Avec une proportion croissante d'électricité produite à partir de sources renouvelables, l'installation de pompes à chaleur dans les bâtiments existants devient une option de plus en plus attrayante en ce qui concerne la demande d'énergie primaire et les émissions de CO₂

Chapitre v
Résultat numérique de Simulation

V-1.Introduction :

La simulation se définit, comme l'utilisation ou la résolution de modèles correspondant à un système donné pour étudier le comportement de ce dernier dans un contexte précis. Elle est la suite logique de la modélisation qui est la première approche d'une simulation.

La simulation ne supplante pas l'expérimentation mais la complète. Elle permet d'effectuer l'analyse du problème dans des conditions réalistes (reproduire des tests que l'on fait en expérimentation pour mieux les comprendre et à moindre coût) ou au contraire dans des conditions d'essais extrêmes/marginales (climats extrêmes, défauts d'installations...). Ces dernières ne peuvent être faites par l'expérimentation (raison de coûts...). Ainsi, la simulation accroît le champ des tests pour un système.

A travers la simulation, le système étudié devient plus flexible. On peut facilement faire des études paramétriques. L'utilisation peut aussi faire varier l'échelle de temps pour une étude.

La simulation se présente presque toujours sous forme d'un programme ou d'outils informatiques.

La simulation par éléments finis ou « méthode des éléments finis », au sens premier du terme, désigne un ensemble de techniques numériques permettant de résoudre approximativement une certaine classe de problèmes mathématiques, basés sur des équations aux dérivées partielles, dont on ne sait généralement pas trouver les solutions exactes. Il s'agit d'un outil mathématique qui possède de nombreuses applications, allant de la physique des milieux continus au calcul de probabilités.

Les avantages de la méthode des éléments finis résident dans la possibilité de représenter facilement des domaines de forme géométrique compliquée et de traiter de façon consistante les conditions aux limites.

- Économie par rapport à l'expérimentation,
- Rapidité d'exécution pour le développement,
- Accès à toutes les données de l'écoulement,
- Conditions réelles et idéales,
- Dimensionner et optimiser les processus qui sont mis en œuvre.

Dans notre cas, le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS sera utilisé pour simuler notre cas de transfert de chaleur.

V-2. Définition du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS :

COMSOL MULTIPHYSICS est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation - définir la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir la ou les physiques, résoudre et afficher les résultats - sont intégrées dans une seule interface.

Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi de particules, optimisation, MEMS, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et Matlab.

V-3. Le modèle Mathématique :

V-3.1. Le transfert de chaleur dans les Tuyaux :

L'expression suivante est utilisée pour prédire l'écoulement des fluides et le transfert de chaleur à l'intérieur des tuyaux :

$$\rho_f A_p C_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f A_p C_{p,f} u \cdot \nabla T_f = A_p k_f \nabla \cdot (\nabla T_f) + \frac{1}{2} f_D \frac{\rho_f A_p}{d_h} |u|^3 + Q_{wall}$$

Où A_p est la section interne de la conduite, ρ_f est la densité du fluide, $C_{p,f}$ est la capacité thermique spécifique du fluide, T_f est la température du fluide, u est la vitesse d'écoulement du fluide, k_f est la conductivité thermique du fluide, f_D est le facteur de frottement de Darcy, d_h est le diamètre hydraulique et Q_{wall} est l'énergie du milieu environnant.

$$Q_{wall} = h_{eff} \cdot Z (T_{ext} - T_f)$$

où h_{eff} est le coefficient équivalent de transfert de chaleur par convection du film, est le périmètre intérieur de la conduite et T_{ext} est la température extérieure de l'environnement proche de la conduite.

V-3.2. Le transfert de chaleur dans le sol :

Le transfert de chaleur dans le sol peut être exprimé par :

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + \nabla \cdot (\rho_w C_{pw} u_w T_s) + Q_s$$

ρ_s Est la densité du sol, C_{ps} est la capacité thermique du sol, k_s est la conductivité thermique du sol, T_s est la température du sol (°C), ρ_w est le poids volumique de l'eau, C_{pw} est la capacité thermique spécifique de l'eau, u_w est la vitesse de l'eau dans le sol et Q_s est la source de chaleur du sol. Où ρ_s est le poids volumique du sol, C_{ps} est la capacité thermique du sol.

V-3.3. Le transfert d'humidité dans le sol :

L'équation de Richards est utilisée pour calculer la variation de la charge hydraulique dans l'espace et le temps, elle est exprimée ainsi :

$$\rho_w \cdot \psi \cdot \frac{\partial H_p}{\partial t} + \nabla \cdot [-K \cdot k_r \cdot \nabla \cdot \rho_w \cdot (H_p + D + H_k)] = 0$$

Où ρ_w est le poids volumique de l'eau, ψ est la capacité spécifique d'humidité, H_p est la charge hydraulique (suction), t est le temps, K est la conductivité hydraulique, k_r est la conductivité hydraulique relative, D est la hauteur d'élévation, H_k est la charge cinétique.

La conductivité hydraulique relative peut être donnée par :

$$k_r = \begin{cases} S_e^l [1 - (1 - S_e^{n/(n-1)})^{1-1/n}]^2 H_p < 0 \\ 1 & H_p \geq 0 \end{cases}$$

Où S_e est la saturation relative du sol, l est le paramètre de connectivité des pores et n est une mesure de la distribution de la taille des pores.

Relation entre la suction et la saturation relative :

$$S_e = \begin{cases} \frac{1}{[1 + |\alpha H_p|^n]^{1-1/n}} H_p < 0 \\ 1 & H_p \geq 0 \end{cases}$$

Où α est lié à l'inverse de la suction de l'entrée d'air.

V-4. Résolution numérique :

V-4.1. Géométrie et maillage du domaine de calcul :

Il s'agit d'un échangeur de chaleur air-sol constitué des tubes en forme U enterrés horizontalement dans un sol argileux non saturé, de diamètre extérieur D , de longueur L .

La méthode des éléments finis a été choisie pour simuler les problèmes d'extraction de chaleur, le logiciel ComsolMultiphasiques a été utilisé à cette fin.

La géométrie de l'étude comprend un domaine 3D de 15 m de long, 20 m de large et 15 m de haut, recouvert d'un sol argileux non saturé. Des tuyaux en PVC sont utilisés pour former l'échangeur de chaleur, qui est placé horizontalement.

Cette simulation produit des mailles denses car les fluctuations hydro thermiques sont plus sensibles dans un sol peu profond. Un maillage tétraédrique libre a été utilisé pour construire l'échangeur de chaleur horizontal et le sol environnant. Un total de 65643 éléments est généré pour le modèle.

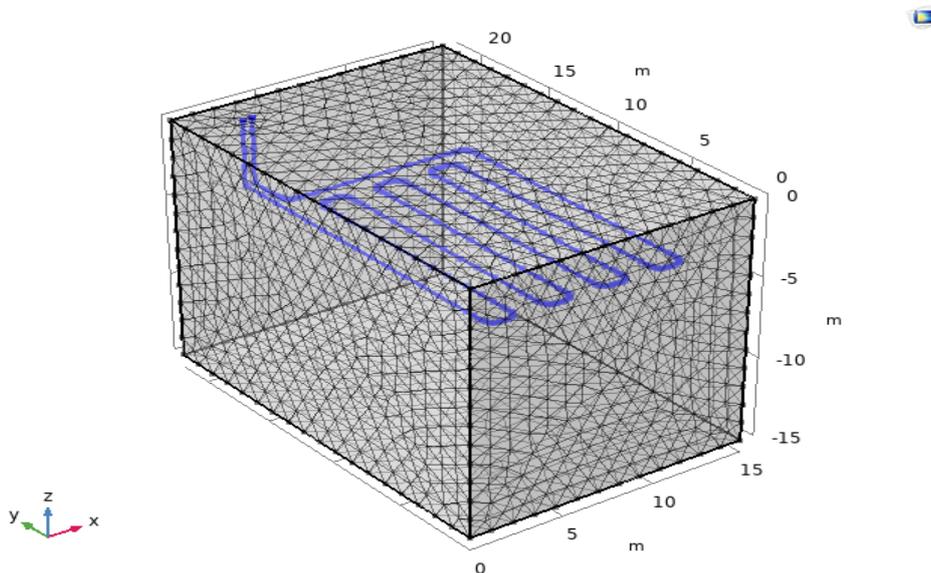


Figure V. 1: Domaine et geometrie.

- Dans cette étude, le transfert d'humidité est pris en compte,
- Les performances thermiques des échangeurs de chaleur sont évaluées en mode chauffage et en mode refroidissement.

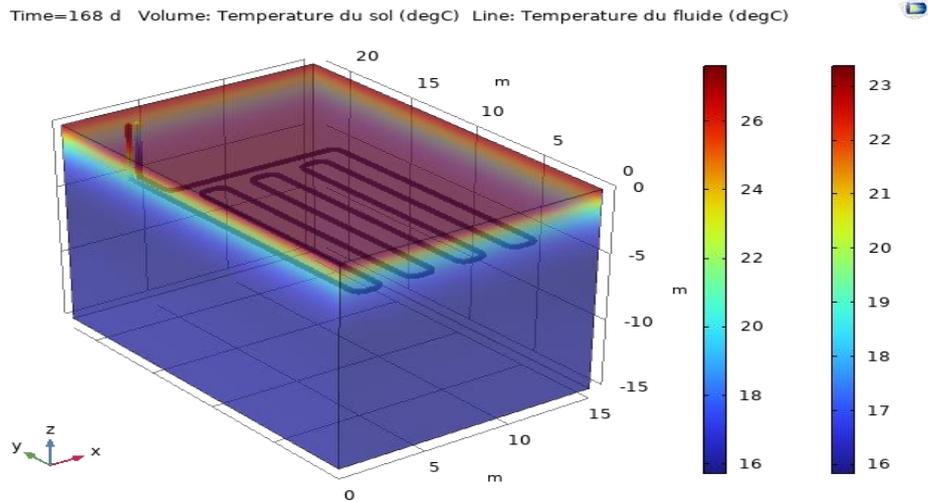


Figure V. 2: Temperature du sol et du fluid caloporteur.

Paramètres	k [m/s]	θ_r	θ_s	a [1/m]	l	n	ρ_d	C_s [J/(kg.K)]	ρ_s [kg/m ³]
Valeur	1.53E-6	0.50	0.03	1.99	0.5	1.22	1.2	1100	1500

Tableau V. 1 : Les propriétés hydro thermiques du sol

Paramètres	Valeur
Le coefficient de conductivité thermique de la paroi	0.4 [W/ (m.K)]
Vitesse des fluides à l'intérieur des échangeurs	1 [m/s]
Épaisseur de la paroi du tuyau	1 [Mm]
Longueur totale de l'échangeur	205.6[m]
Conductivité thermique de l'air	0.026 [W/ (m.K)]
Capacité thermique spécifique de l'air	1005 [J/ (kg.K)]
Densité de l'air	1.177 [kg.m ⁻³]
Conductivité thermique de PVC	0.16 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]
Capacité thermique spécifique de PVC	900 [J.kg ⁻¹ K ⁻¹]
Densité de PVC	1380 [kg.m ⁻³]

Tableau V. 2 : Paramètres physiques de l'échangeur de chaleur.

V-4.2. Les conditions initiales et limites :

V-4.2.1. Climatologie de la ville de Mostaganem :

La saison très chaude dure 2,9 mois, du 21 juin au 17 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 28 °C. Le mois le plus chaud de l'année à Mostaganem est août, avec une température moyenne maximale de 30 °C et minimale de 22 °C. La saison fraîche dure 4,0 mois, du 21 novembre au 23 mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 18 °C. Le mois le plus froid de l'année à Mostaganem est janvier, avec une température moyenne minimale de 8 °C et maximale de 15 °C.

A jour de précipitation est un jour au cours duquel on observe une accumulation d'eau ou mesurée en eau d'au moins 1 millimètre. La probabilité de jours de précipitation à Mostaganem varie au cours de l'année. La saison connaissant le plus de précipitation dure 7,8 mois, du 25 septembre au 19 mai, avec une probabilité de précipitation quotidienne supérieure à 12 %. Le mois ayant le plus grand nombre de jours de précipitation à Mostaganem est novembre, avec une moyenne de 6,1 jours ayant au moins 1 millimètre de précipitation.

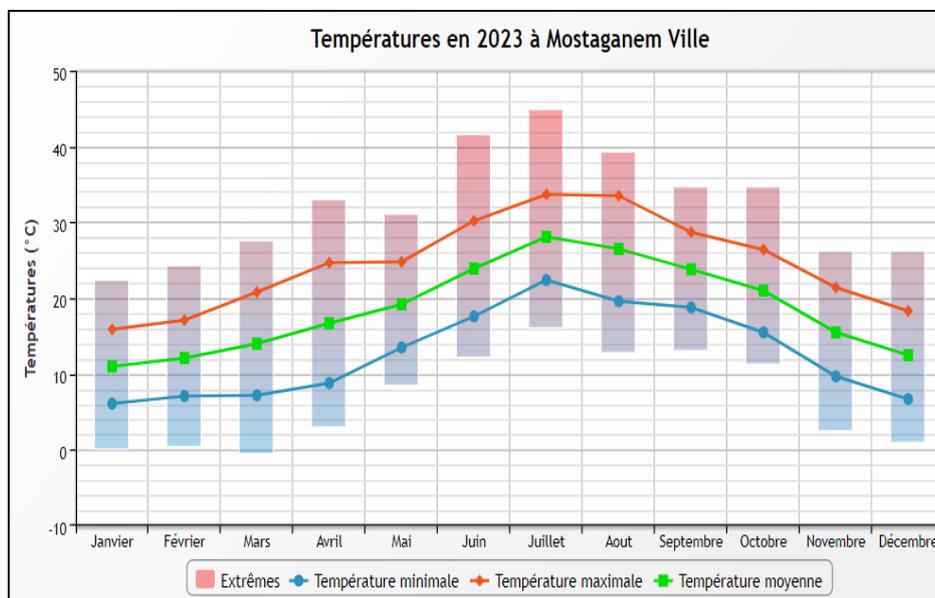


Figure V. 3: Température en 2023 à Mostaganem

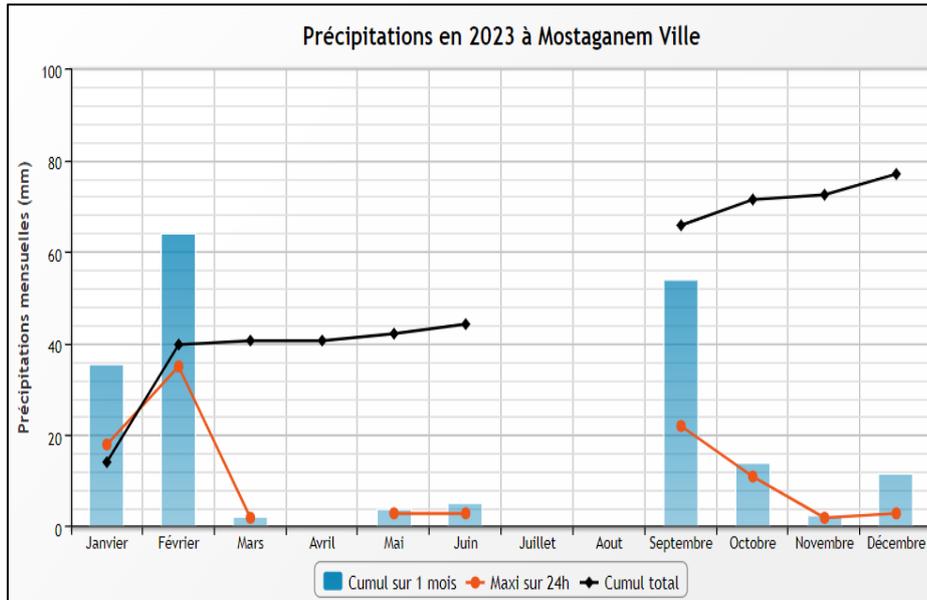


Figure V. 4: Précipitation en 2023 à Mostaganem

V-4.2.2. Conditions limites du sol et de l'échangeur de chaleur :

On considère que le sol et l'échangeur de chaleur sont initialisés avec une température constante de 16°C.

Deux conditions limites régissent le sol, les conditions hydrauliques et thermiques.

Les conditions hydrauliques : Au fond du domaine de simulation, nous supposons une charge de pression de -75cm (Dirichlet) et à la surface du sol, nous avons pris une moyenne annuelle des précipitations pour l'année 2023 (Neumann). Des conditions adiabatiques ont été définies aux autres interfaces du domaine.

Les conditions thermiques : Au fond du domaine de simulation, nous considérons une température de 16°C (Dirichlet) et à la surface du sol, nous avons pris les valeurs moyennes journalières de la température ambiante pour l'année 2023. Des conditions adiabatiques ont été définies aux autres interfaces du domaine.

V-5. Résultats et analyse :

La figure 5 illustre la variation de la pression en fonction de la profondeur du sol. La zone proche de la surface présente un gradient de pression important. Ensuite, le gradient diminue au fur et à mesure que la profondeur diminue jusqu'à ce qu'il atteigne 10 m, moment où le profil de succion se stabilise à un niveau presque constant.

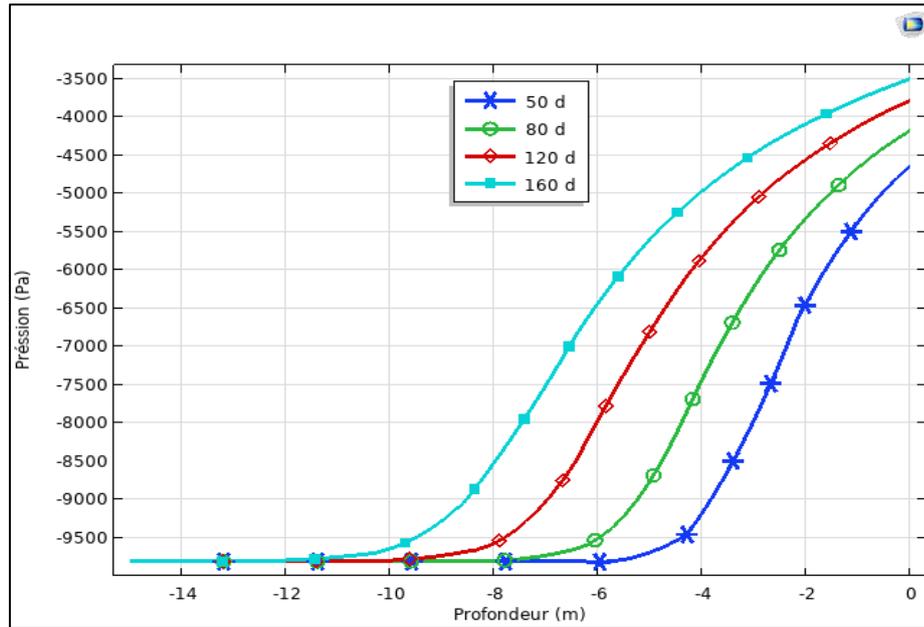


Figure V. 5: La variation de la charge de pression en fonction de la profondeur

Les figures 6 et 7 montrent les variations de la conductivité thermique et de la capacité thermique volumique du sol en fonction de la teneur en eau. La teneur en eau moyenne du sol a varié tout au long de cette simulation numérique entre 0,2 et 0,35 cm³ /cm³, ce qui correspond à des conductivités thermiques du sol de 1,56 et 1,76 (W/m °C) respectivement, et à des capacités thermiques volumétriques du sol de 2,3E6 et 2,8E6 (J/m³ °C) respectivement.

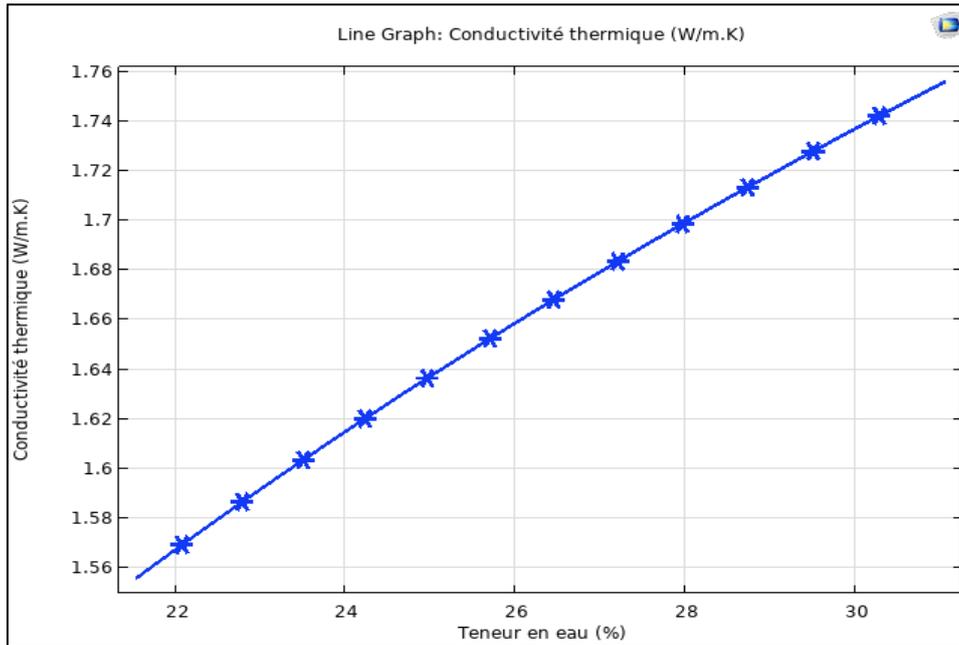


Figure V. 6: Conductivité thermique e en fonction de la teneur en eau

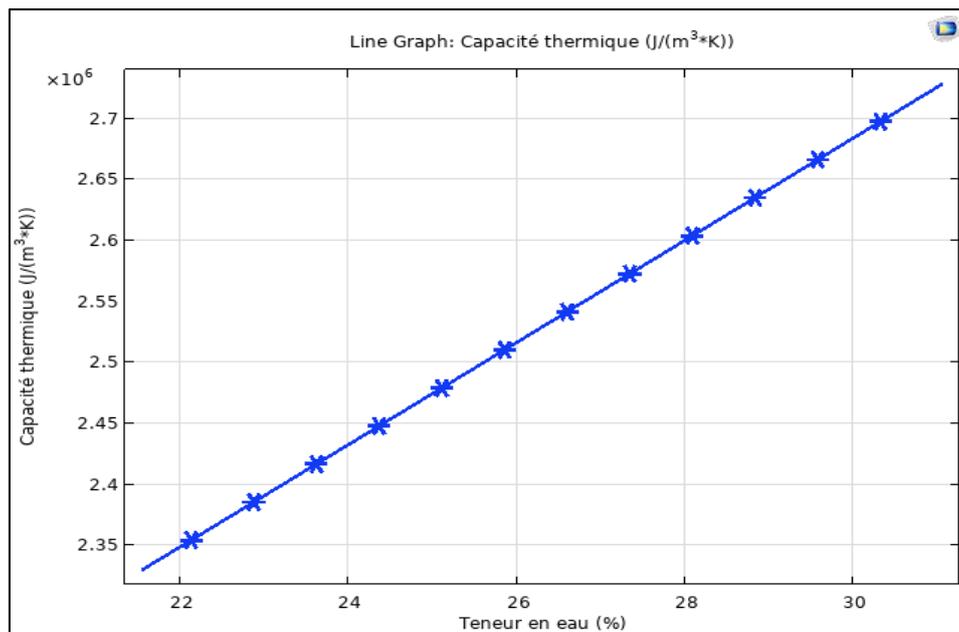


Figure V. 7: Capacité thermique en fonction de la teneur en eau

La figure 8 montre les fluctuations saisonnières de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps. Il est clair qu'avec l'augmentation de la profondeur du sol, la fluctuation de la température du sol diminue jusqu'à ce que le sol atteigne une profondeur de 10 m, où la température du sol devient relativement constante.

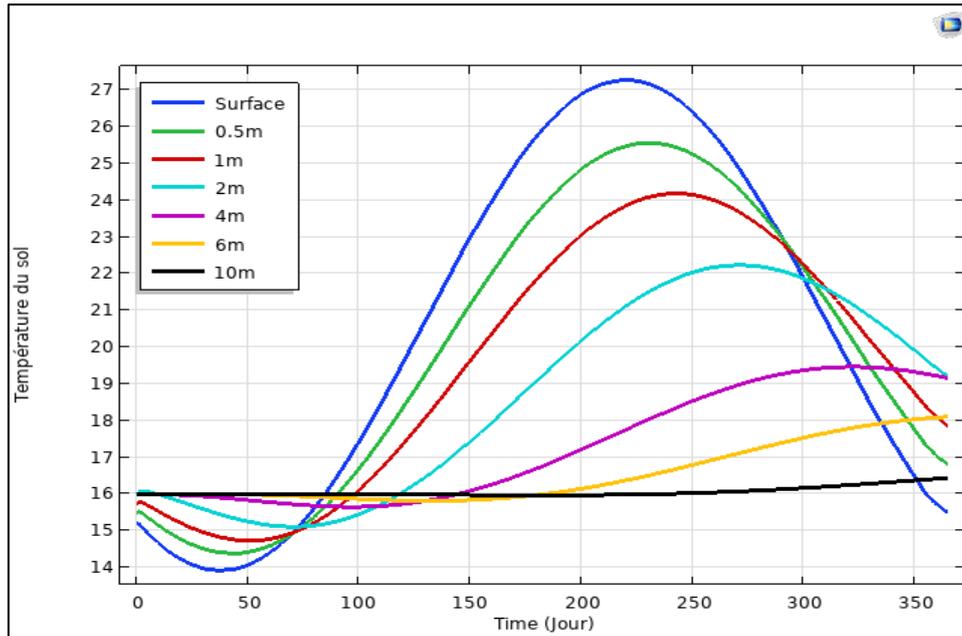


Figure V. 8: Les variations saisonnières de la température du sol en fonction de la profondeur et du temps

La figure 9 présente les températures d'entrée et de sortie de l'air pour l'échangeur de chaleur air-sol.

En hiver, les températures de sortie de l'échangeur sont plus élevées que les températures d'entrée de l'échangeur, avec une différence de température de $2,3^{\circ}\text{C}$, ce qui signifie que le fluide caloporteur est chauffé. En revanche, les températures de sortie de l'échangeur de chaleur sont inférieures aux températures d'entrée de l'échangeur de chaleur en été avec une différence de température de $3,5^{\circ}\text{C}$, ce qui signifie que le fluide est refroidi pendant cette période.

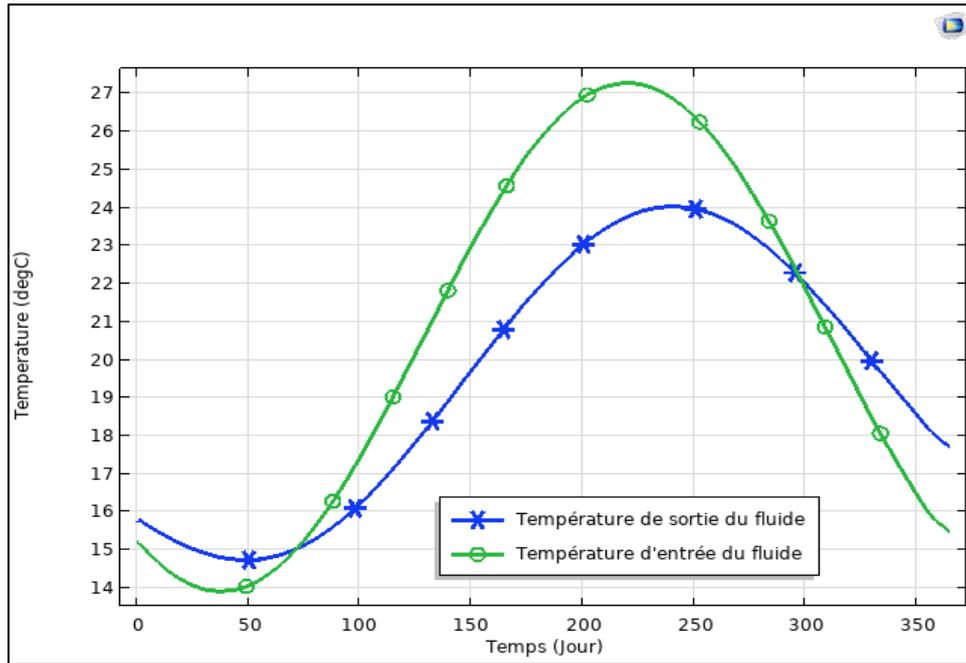


Figure V. 9: les températures d'entrée et de sortie de l'air pour l'échangeur de chaleur air-sol.

La figure 10 montre le coefficient de performance des échangeurs de chaleur air-sol horizontaux en mode de chauffage et en mode de rafraîchissement. En mode chauffage, le coefficient de performance varie entre 5 et 5,2. En mode refroidissement, le coefficient de performance varie entre 5,5 et 5,9.

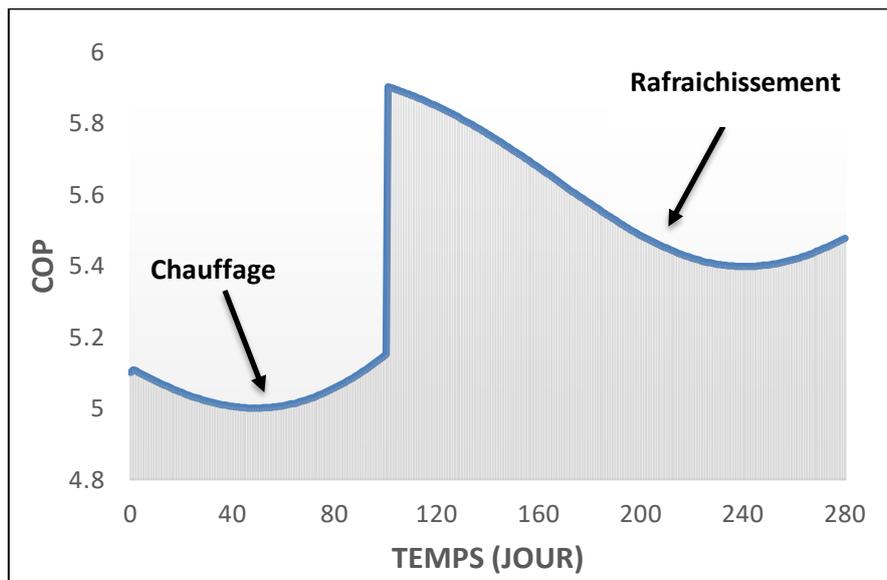


Figure V. 10: Le coefficient de performance en mode de chauffage et de rafraîchissement.

La figure 11 montre le taux d'échange de chaleur en mode de chauffage et de rafraichissement.

Le taux d'échange de chaleur est plus élevé en mode rafraichissement qu'en mode chauffage, avec une différence de 25 %. Les valeurs maximales pour les deux modes sont respectivement de 600W et 150 W.

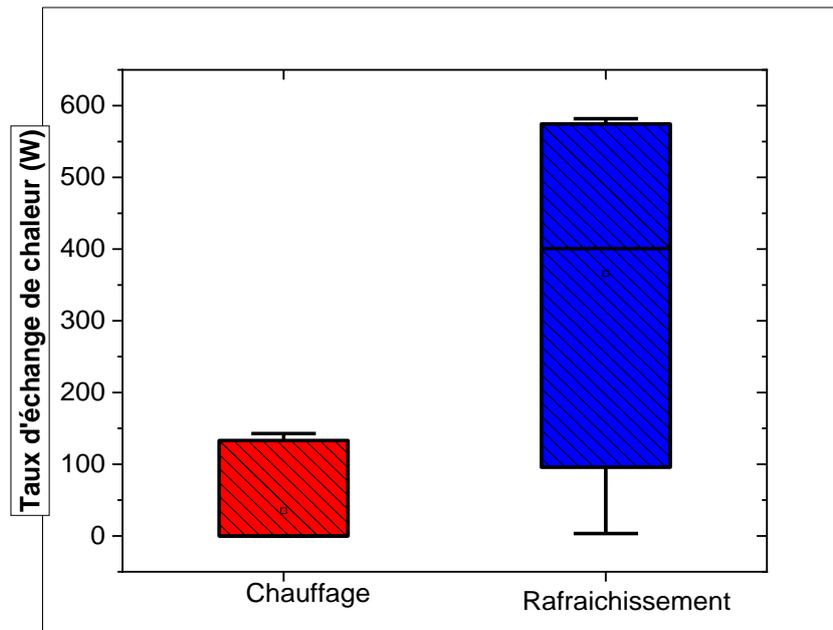


Figure V. 11: Le taux d'échange de chaleur en mode de chauffage et de rafraichissement.

V-6.Conclusion :

Ce travail se focalise sur une étude numérique basée sur la méthode des éléments finis de la performance d'un échangeur de chaleur air-sol horizontal peu profond pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments pour un site situé dans la ville de Mostaganem. Ce modèle prend en compte le transfert d'humidité dans le sol non saturé. Les principaux résultats ont montré que :

- ✓ Il existe un gradient significatif de température et de pression dans la zone située à proximité de la surface. Ensuite, le profil de température et de pression se stabilise à un niveau presque constant, le gradient diminuant avec la profondeur jusqu'à ce qu'il atteigne 10 mètres.

Chapitre V : simulation

- ✓ La différence de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur air-sol est plus importante en été qu'en hiver, atteignant 3,5°C.
- ✓ Le coefficient de performance du mode chauffage est plus élevé que celui du mode refroidissement, atteignant un maximum de 5,9.

Conclusion générale :

L'apport d'énergie géothermique superficielle aux bâtiments résidentiels présente plusieurs avantages et intérêts significatifs. Voici une conclusion générale sur ce thème :

L'utilisation de l'énergie géothermique superficielle pour chauffer et refroidir les bâtiments résidentiels représente une solution prometteuse et durable pour répondre aux besoins énergétiques croissants tout en réduisant l'empreinte carbone. En exploitant la chaleur stockée dans le sol à faible profondeur, cette technologie offre une source d'énergie renouvelable et propre, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles et les émissions de gaz à effet de serre.

Sur le plan économique, l'énergie géothermique superficielle peut offrir des avantages à long terme en réduisant les coûts de chauffage et de climatisation des bâtiments résidentiels. Bien que les coûts initiaux d'installation puissent être plus élevés que ceux des systèmes conventionnels, les économies réalisées sur les factures d'énergie peuvent compenser ces dépenses supplémentaires sur la durée de vie du système. De plus, cette technologie crée des emplois dans le secteur des énergies renouvelables et stimule l'innovation dans le domaine de la construction écologique.

En outre, l'utilisation de l'énergie géothermique superficielle contribue à la sécurité énergétique en diversifiant le mix énergétique et en réduisant la dépendance aux importations de combustibles. Elle offre également une solution viable pour les régions où les ressources en énergie renouvelable sont abondantes, mais où l'accès aux réseaux électriques traditionnels peut être limité ou coûteux.

En conclusion, l'adoption de l'énergie géothermique superficielle dans le secteur résidentiel présente des avantages multiples, allant de la réduction des émissions de carbone à la création d'emplois et à la sécurité énergétique. En investissant dans cette technologie et en encourageant son déploiement à grande échelle, nous pouvons contribuer de manière significative à la lutte contre le changement climatique tout en assurant un avenir énergétique plus durable et résilient.

