



UNIVERSITÉ D'ABOMEY-CALAVI
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE D'ABOMEY CALAVI
INSTITUT NATIONAL SUPÉRIEUR DE TECHNOLOGIE
INDUSTRIELLE DE LOKOSSA

VIII^{ème} Promotion

Master en Energies Renouvelables et Systèmes Energetiques

Mémoire de Fin de Formation Pour l'Obtention du Diplôme de Master

Etude théorique et expérimentale du rafraichissement d'un bureau par les échangeurs air/sol : application sur un site à Hêvié (Ouidah)

Rédigé par : YENOUKOUME Gildas Roméo

Sous la direction de :

Co-Encadreur

Dr ADIHOU Coffi Wilfrid
Maître Assistant CAMES
Enseignant-Chercheur à
L'Université d'Abomey Calavi

Encadreur

Pr HOUNGAN Comlan Aristide
Professeur Titulaire
Enseignant-Chercheur à
l'Université d'Abomey Calavi

Président du jury

KOTO N'GOBI Gabin

Membres du jury

KOUGBEAGBEDE Hilaire : Examineur
Dr ADIHOU Coffi Wilfrid : Encadreur

Année Académique 2019-2021



DEDICACE

A l'Eternel pour Ses grâces !

REMERCIEMENTS

C'est un devoir agréable de pouvoir remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Nos remerciements vont à l'endroit du :

- Professeur Félicien AVLESSI, le Recteur de l'Université d'Abomey Calavi ;
- Professeur KOUCHADE A. Clément, Chef département des études ERSE à la FAST ;
- Professeur Clarence SEMASSOU, Coordonnateur des études ERSE à l'EPAC
- Professeur Comlan Aristide HOUNGAN, Vice-Recteur à l'UNSTIM
- Professeur Etienne SACREMENTO, Enseignant à l'EPAC ;
- Docteur Coffi Wilfrid ADIHOU, Enseignant à l'EPAC et notre maître mémoire ;
- Corps professoral de la FAST et de l'EPAC,
- Président et membres du jury de notre soutenance et l'administration du département des études ERSE à la FAST.
- Odilon GBOSSOU, Ingénieur en Energétique.
- Janvier YENOUKOUME et Jeanne DOSSOU mes merveilleux parents

RESUME

Le présent mémoire traite de l'étude théorique et expérimentale du rafraîchissement par la géothermie en prenant comme cas d'étude, un local à Hêvié au sud du Bénin. Le constat fait est que dans le bâtiment au Bénin, le problème d'efficacité énergétique se pose davantage à cause d'une part de la recherche permanente du confort dans le bâtiment et d'autre part, du réchauffement climatique grandissante. Le portrait de la situation actuelle quant aux sources d'approvisionnement et de consommation d'énergie exige le choix des solutions durables et appropriées. L'objectif de notre étude est de faire l'étude théorique et expérimentale du rafraîchissement d'un local grâce aux échangeurs air-sol. Pour cela, nous avons dans un premier temps réalisé une mesure de la ressource géothermique du domaine choisi pour l'étude et dans un second temps réaliser l'étude théorique et expérimentale du dispositif. La mesure de la ressource géothermique a révélé que la plus petite température observée à 5 m dans le sol est de l'ordre de 28°C dans la zone considéré. L'étude théorique réalisée nous a permis d'avoir un modèle mathématique qui exprime la température de l'air à l'intérieur du local en fonction de la longueur de l'échangeur air-sol. L'étude expérimentale est venue confirmer les résultats de l'étude théorique à 96% avec un rendement de l'échangeur voisinant 81,4%, ce qui démontre que l'énergie géothermique du sous-sol est une opportunité en efficacité énergétique dans le bâtiment.

Mots Clés : Géothermie ; Rafraîchissement des bâtiments ; Modélisation ; Etude expérimentale ; Etude théorique

ABSTRACT

This thesis deals with the theoretical and experimental study of cooling by geothermal energy by taking as a case study, a room in Hêvié in the south of Benin. The observation made is that in the building industry in Benin, the problem of energy efficiency is more important because of the permanent search for comfort in the building on the one hand and the growing global warming on the other. The current picture of the current situation in terms of energy supply and consumption requires the choice of sustainable and appropriate solutions. The aim of our study is to carry out a theoretical and experimental study of space cooling using air-to-ground heat exchangers. To do this, we first carried out a measurement of the geothermal resource of the domain chosen for the study and then carried out the theoretical and experimental study of the device. The measurement of the geothermal resource revealed that the lowest temperature observed at 5 m from the ground is of the order of 28°C in the area under consideration. The theoretical study carried out allowed us to have a mathematical model that expresses the temperature of the air inside the room as a function of the length of the air-ground exchanger. The experimental study confirmed the results of the theoretical study at 96% with an efficiency of the exchanger of around 81.4%, which demonstrates that geothermal energy from the subsurface is an opportunity for energy efficiency in the building.

Keywords: Geothermal energy; Refreshment of buildings; Modeling; Experimental study; Theoretical study

NOMENCLATURE

Désignation	Unité	Description
Cp	J.kg-1.K-1	Chaleur spécifique de l'air
Cloc	W	Chaleur latente des occupants
CSoc	W	Chaleur sensible des occupants
d1	m	Diamètre intérieur du tube
d2	m	Diamètre extérieur du tube
F	-	Facteur de rayonnement solaire
G	-	Facteur de réduction
H	W/m ² . K	Coefficient de convection intérieure
K	W/m ² . K	Coefficient de transmission thermique
L	m	Longueur du tube
N	-	Nombre d'occupants
Nu	-	Nombre de Nusselt
P	W	Puissance des lampes
Pr	-	Nombre de Prandtl
QL	W	Chaleur latente totale
QLr	W	Gains latents par renouvellement d'air
Qm	kg/s	Débit massique du fluide
Qs	W	Chaleur sensible totale
QSecl	W	Chaleur sensible par éclairage
QSoc	W	Gains sensibles par les occupants
QSr	W	Gains sensibles par renouvellement d'air
QSRm	W	La quantité de chaleur traversant le mur
QT	W	Bilan thermique total
QSRv	W	La quantité de chaleur traversant le vitrage
Q	m ³ /s	Débit d'air extérieur de renouvellement
Qv	m ³ /s	Débit volumique du fluide
R1	m	Rayon intérieur du tube
R2	m	Rayon extérieur du tube
Rcond	m ² . K/W	Résistance thermique par conduction
Rconv	m ² . K/W	Résistance thermique par convection
Re	-	Nombre de Reynolds
Rm	W/m ²	Rayonnement solaire absorbé sur la surface du mur
Rth	m ² . K/W	Résistance thermique totale

R_v	W/m ²	Intensité du rayonnement solaire sur les vitrages
S	m ²	Surface
U	W/m ² °C	Coefficient de transmission thermique de la paroi ou du vitrage
V	m/s	Vitesse moyenne du fluide

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	I
REMERCIEMENTS	II
RESUME	III
ABSTRACT	III
NOMENCLATURE	IV
TABLE DES MATIERES	VI
LISTE DES TABLEAUX	VIII
LISTE DES FIGURES	IX
INTRODUCTION GENERALE.....	10
CHAPITRE 1 : GENERALITES ET ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES	12
1.1 Généralités sur la géothermie et les échangeurs air-sol	13
1.1.1 Les différents types de gisements géothermiques.....	13
1.2 Echangeur air/sol.....	15
1.2.1 Fonctionnement des échangeurs air/sol.....	15
1.2.2 Types d'échangeurs air/sol.....	18
1.2.3 Avantages et inconvénients de la géothermie.....	19
□ Avantages.....	19
□ Inconvénients	19
1.3 Bibliographie.....	20
1.3.1 Quelques études expérimentales géothermales air/sol	20
1.3.2 Quelques études théoriques géothermales air/sol	25
1.3.3 Conclusion.....	27
CHAPITRE 2 : MESURE DE LA RESSOURCE GEOTHERMIQUE	28
2.1 Ressource Géothermique	29
2.1.1 Mesure de la température du sous-sol.....	29
2.1.2 Evolution de la température en fonction des milieux	30
2.2 Evolution de la température en fonction des heures des trois différents milieux	31
2.2.1 Evolution de la température en fonction des heures du milieu 1 : Hlouinmin	31
2.2.2 Evolution de la température en fonction des heures du milieu 2 : Sèzoummin.....	32
2.2.3 Evolution de la température en fonction des heures du Milieu 3 : Hounzévié	33
2.3 Calcul des erreurs sur les valeurs relevées et synthèse	34
2.3.1 Calcul des erreurs sur les valeurs relevées sur les températures.....	34

2.3.2	Conclusion.....	36
CHAPITRE 3 : CARACTERISATION GEOTHERMIQUE POUR LE		
REFROIDISSEMENT DES LOCAUX : ETUDE THEORIQUE.....		
3.1	Modélisation de la température de l'air	38
3.1.1	Hypothèses	38
3.1.2	Etablissement du modèle analytique.....	38
3.2	Application et simulation dans le logiciel SCILAB	40
3.2.1	Application	40
3.2.2	Simulation avec SCILAB.....	41
3.3	Confort thermique	43
CHAPITRE 4 : CARACTERISATION GEOTHERMIQUE POUR LE		
REFROIDISSEMENT DES LOCAUX : ETUDE EXPERIMENTALE.....		
4.1	Bilan thermique de la climatisation du local.....	47
4.1.1	Cahier de charge	47
4.1.2	Bilan des apports calorifiques.....	51
	<input type="checkbox"/> Bilan thermique total Q_T	52
4.2	Dimensionnement de l'échangeur air/sol.....	53
4.2.1	Caractéristiques de l'échangeur	53
	<input type="checkbox"/> Détermination du débit volumique	53
	<input type="checkbox"/> Calcul de la vitesse d'écoulement	53
	<input type="checkbox"/> Détermination de la longueur de tube.....	53
	<input type="checkbox"/> Pertes de charge Linéaires.....	55
	<input type="checkbox"/> Calcul de perte de charge singulière.....	56
	<input type="checkbox"/> Pression de sortie par réseau	56
4.2.2	Choix des équipements et coût du projet.....	56
4.2.3	Analyse des résultats.....	61
	Conclusion.....	62
CONCLUSION GENERALE.....		
63		
REFERENCES		
64		
ANNEXES		
66		

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Température à des profondeurs données dans les trois forages</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 2 : Résumé des valeurs obtenues pour les températures</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 3 : Détermination de l'heure de charge thermique du local.....</i>	<i>50</i>
<i>Tableau 4 : Détermination de la charge thermique du local.....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 5 : Les relevés de température en fonction des profondeurs dans les 3 forages.....</i>	<i>xiv</i>
<i>Tableau 6 : Les valeurs de la température en fonction du temps dans le forage 1</i>	<i>xv</i>
<i>Tableau 7 : Les valeurs de la température en fonction du temps dans le forage 2</i>	<i>xvi</i>
<i>Tableau 8 : Les valeurs de la température en fonction du temps dans le forage 3</i>	<i>xvii</i>

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Différents types de géothermie [3]</i>	<i>14</i>
<i>Figure 2 : Fonctionnement d'un échangeur air-sol [3].....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 3 : Quelques modèles de prise d'air [3]</i>	<i>16</i>
<i>Figure 4 : Echangeur géothermique [3]</i>	<i>16</i>
<i>Figure 5 : Schéma de principe d'un échangeur air/sol [2].....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 6 : Echangeur air/sol (système à boucle ouverte) [1]</i>	<i>18</i>
<i>Figure 7 : Echangeur air/sol (système en boucle fermée) [1].....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 8 : Echangeur air/sol étudié par Bisoniva et Al [7]</i>	<i>21</i>
<i>Figure 9 : Echangeur air/sol étudié par Mohamed et Al [8]</i>	<i>21</i>
<i>Figure 10 : Système de rafraîchissement présenté par Hsu et Al [10]</i>	<i>23</i>
<i>Figure 11 : Montage expérimental de systèmes d'échangeur air sol secs et humide [11].....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 12 : Conduites horizontales implantés et verticales pour l'alimentation en eau [11]..</i>	<i>24</i>
<i>Figure 13 : Installation et test du réseau hydratant [9].....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 14 : Géométrie de l'échangeur Air-Sol étudié [12].....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 15 : Photos pour la mesure de la ressource géothermique</i>	<i>29</i>
<i>Figure 16 : Evolution de la température moyenne des 3 milieux en fonction de la profondeur du milieu</i>	<i>30</i>
<i>Figure 17 : Variation de la température sur différents sites [13]</i>	<i>31</i>
<i>Figure 18 : Evolution de la température : Milieu N°1 (0 à 5 m).....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 19 : Evolution de la température : Milieu N°1 (6 à 10 m).....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 20 : Evolution de température : Milieu N°2 (0 à 5 m).....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 21 : Evolution de la température : Milieu N°2 (6 à 10m).....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 22 : Evolution de la température : Milieu N°3 (0 à 5m).....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 23 : Evolution de la température : Milieu N°3 (6 à 10 m).....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 24 : Evolution de la température en fonction de la longueur de la tuyauterie</i>	<i>42</i>
<i>Figure 25 : Réduction de la température (°C) en fonction de la vitesse de l'air et l'hygrométrie [18].....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 26 : Plan du local à climatiser</i>	<i>47</i>
<i>Figure 27 : Orientation Nord-Sud-Ouest-Est.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 28 : Valeurs de l'irradiation globale horizontale à Hervié entre 2015 et 2020 en KWh/m²</i>	<i>49</i>
<i>Figure 29 : Irradiation solaire mensuelle et température moyenne mensuelle à Hèvié</i>	<i>49</i>
<i>Figure 30 : Intensité du rayonnement solaire sur les murs (m) et vitrages (v) W/m²</i>	<i>50</i>
Figure 31 : Caisson de filtre.....	56
Figure 32 : Image d'extracteur de marque C0 VENT SYSTEME	57
Figure 33 : Tubes PVC-U de marque SOTICI.....	57
Figure 34 : Bouche de soufflage de marque France Air	58
Figure 35 : Synoptique du réseau de rafraîchissement du local.....	60

INTRODUCTION GENERALE

La disponibilité de l'énergie est un défi majeur pour le développement des peuples. Au Bénin, vu les impacts du secteur de l'énergie sur l'environnement, il apparaît impérieux de concilier les politiques de développement de ce secteur et la protection de l'environnement pour un développement durable. Les études démographiques indiquent que la population des pays en développement va croître très vite et leurs besoins d'énergie seront très importants [1]. Le recours à des énergies propres pour les besoins énergétiques et pour le développement économique et social deviennent incontournables. Ces énergies dites renouvelables désignent des sources d'énergies inépuisables (énergie solaire, énergie hydraulique et énergie géothermique etc.).

La géothermie comme base de notre étude est une énergie renouvelable connue et couramment utilisée à travers le monde. Elle consiste, comme sa racine l'indique, à utiliser l'énergie de la terre (géo) pour produire ou évacuer de la chaleur (thermos). Il existe deux types d'exploitations géothermiques. Le premier consiste à prélever directement l'énergie produite par la terre pour produire de l'électricité (+150°C) [2]; une autre exploitation prélève l'énergie à température plus basse (80-85°C) [2] et font circuler le fluide caloporteur issu d'un aquifère. Notons que leur implantation est fortement dépendante de la présence d'un gisement géothermique et ne peut être utilisée partout. Le second type consiste à utiliser le sol comme un réservoir de chaleur. L'énergie utilisée ici ne provient pas des profondeurs de la terre ou d'un aquifère directement, mais de l'énergie emmagasinée dans le sol qui y transite à bas taux de transfert par diffusion et qui est stockée à basses températures (6-22°C) [2]. Les transferts de chaleur dans ce second cas sont nettement plus faibles, réservant son utilisation à quelques applications spécifique comme le chauffage et la climatisation dont fait l'objet notre étude.

Les travaux menés dans le cadre de ce mémoire se proposent donc de répondre aux questions suivantes :

- Quelle est la ressource géothermique disponible au Benin ?
- La ressource géothermique suffirait-elle pour assurer la climatisation des bâtiments au Benin ?
- Comment dimensionner un échangeur air-sol capable d'assurer le confort thermique dans les locaux et quel est le coût de réalisation ?

Nous nous intéresserons dans notre étude à la climatisation d'un local dans la région de Hêvié au sud du Bénin par des échangeurs air-sol qui est l'une des techniques efficaces d'énergie verte pour le refroidissement. L'objectif général visé par notre travail est de : « **Rafrâichir un local grâce à un échangeur air-sol avec un niveau de confort thermique acceptable** ».

Il s'agit spécifiquement :

- de faire des relevés de la température dans le sol afin d'estimer la ressource géothermique du domaine choisi pour l'étude ;
- de réaliser une étude théorique aboutissant à un modèle mathématique exprimant l'évolution de la température du local en fonction de la profondeur choisi pour l'échangeur air-sol ;
- de réaliser une étude expérimental du dispositif et comparer avec les résultats de l'étude théorique ;

Dans le but d'atteindre les objectifs fixés, nous avons retenu trois principales hypothèses qui sont que :

- L'échange thermique se fera en régime stationnaire ;
- Le sol sera considéré homogène ;
- Les caractéristiques de l'air et du sol (masse volumique, conductivité thermique, chaleur massique...) seront considérées constantes ;

Le présent mémoire est constitué de quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente les généralités et études bibliographiques en liaison avec le sujet.
- Le deuxième chapitre présente la mesure de la ressource géothermique du milieu choisi pour l'étude.
- Le troisième chapitre présente l'étude théorique de la caractérisation géothermique pour le refroidissement des locaux.
- Le quatrième chapitre présente l'étude expérimentale de la caractérisation géothermique pour le refroidissement des locaux.

CHAPITRE 1 :

GENERALITES ET ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

Introduction

La géothermie est un ensemble de techniques qui permet de récupérer la chaleur stockée dans le sol à différentes profondeurs et à différentes températures. Cette énergie renouvelable est utile pour le chauffage et le refroidissement des maisons, des immeubles, des usines, des bâtiments agricoles. Quels sont les types de gisements géothermiques et les catégories d'échangeurs air-sol ? Quels sont les études existantes sur la climatisation des locaux avec les échangeurs air-sol ?

1.1 Généralités sur la géothermie et les échangeurs air-sol

1.1.1 Les différents types de gisements géothermiques

On distingue la géothermie à haute énergie, la géothermie à moyenne énergie, la géothermie à basse énergie et la géothermie à très basse énergie.

- Géothermie à haute énergie

La géothermie dite de haute énergie est conçue pour produire de l'électricité, ou de façon combinée de l'électricité et de la chaleur. Il faut pour cela des eaux ou des vapeurs très chaudes, captées au-dessus de 150 °C, à des profondeurs supérieures à 1500 mètres et pouvant aller jusqu'à 5000 mètres. Elle est souvent développée en zone volcanique. Si la température de l'eau géothermale dépasse 150 °C, cette eau peut être injectée directement, sous forme de vapeur, dans une turbine qu'elle fait tourner pour générer de l'électricité. Si elle n'atteint pas 150 °C, il faut recourir à différentes techniques pour obtenir de la vapeur sèche en surface en vaporisant l'eau liquide qui remonte pour pouvoir l'utiliser dans la turbine.

- Géothermie à moyenne énergie

La géothermie de moyenne température (T°C : 90 à 150 °C) ou moyenne enthalpie se présente sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à une température comprise entre 90 et 150 °C. Elle se retrouve dans les zones propices à la géothermie haute énergie, mais à une profondeur inférieure à 1000 mètres. Elle se situe également dans les bassins sédimentaires, à des profondeurs allant de 2000 à 4000 mètres. Pour y produire de l'électricité une technologie nécessitant l'utilisation d'un fluide intermédiaire est nécessaire.

- Géothermie basse énergie

Le principe est le même que pour la géothermie de très basse énergie, mais les forages sont plus profonds, entre 200 et 2 500 mètres, et la température de l'eau supérieure, généralement entre 30° et 90 °C. L'eau géothermale est captée puis réinjectée dans le sous-sol via deux forages, qui forment un « doublet ». Cette technique permet de chauffer des quartiers de milliers d'habitants ou des parcs industriels.

- Géothermie très basse énergie

La géothermie dite « très basse énergie » prélève la chaleur du sous-sol à basse température moins de 30 °C à des profondeurs allant jusqu'à 20 mètres. Ce niveau de température ne permet pas une utilisation directe de la chaleur par simple échange mais nécessite l'appoint en surface de pompes à chaleur (PAC) qui augmentent la température à un niveau suffisant pour le chauffage. Elle est utilisée aussi bien dans les maisons individuelles que dans les immeubles collectifs ou les bâtiments commerciaux.

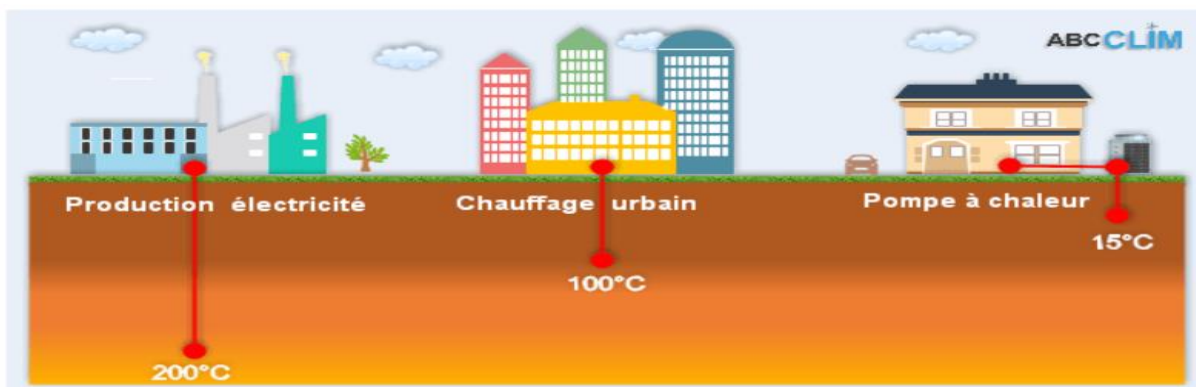


Figure 1 : Différents types de géothermie [3]

1.2 Echangeur air/sol

1.2.1 Fonctionnement des échangeurs air/sol

La conception des bâtiments à faible consommation d'énergie est devenue un grand enjeu à travers le monde afin de minimiser la consommation d'énergie et les émissions des gaz à effet de serre associées. Communément appelé puits canadien, puits climatique ou encore puits provençal, l'échangeur air-sol est un système semi-passif qui exploite la géothermie du sol à une profondeur donnée où la température est quasi-constante durant toute l'année. Cet échangeur (dont le concept est très ancien, 3000 ans avant J.-C) est aujourd'hui largement utilisé dans les secteurs résidentiel et agricole afin de contrôler la température des bâtiments. Les échangeurs air-sol sont catalogués actuellement dans le monde, comme étant parmi les systèmes les plus dynamiques dans le domaine des énergies renouvelables, avec une augmentation annuelle de 10 % (au cours des 10 dernières années) du nombre d'installations dans près de 30 pays (Lund et al. 2004) [3].

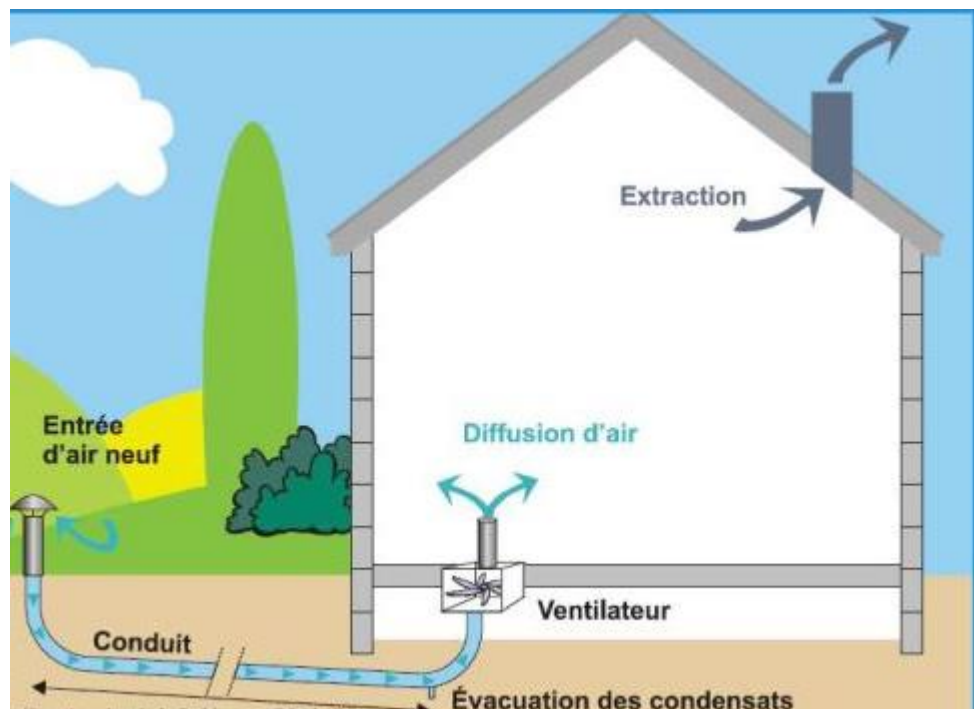


Figure 2 : Fonctionnement d'un échangeur air-sol [3]

L'échangeur air-sol est composé d'un système d'entrée d'air neuf, les conduits, le système d'évacuation des condensats et un ventilateur.

- Entrée d'air neuf

Chaque échangeur de chaleur air-sol généralement possède une prise d'air neuf, elle peut être en colonne extérieure circulaire ou cubique placé en façade du bâtiment ou à distance

lorsque le terrain le permet. Ses dimensions sont généralement les mêmes que celles des tuyaux auxquels elle est reliée de manière à ne pas occasionner de variations de vitesse et de pertes de charge [3]. Elle est omnidirectionnelle ou unidirectionnelle en fonction des éventuelles sources de pollution environnantes. Elle est souvent pourvue d'un chapeau et d'ailettes empêchant l'eau de pluie de pénétrer dans l'échangeur air/sol. La prise d'air est généralement placée légèrement en hauteur de manière à



xée dans le sol par socle

Figure 3 : Quelques modèles de prise d'air [3]

- **Conduit**

Il est constitué d'un ou plusieurs tubes assurant un triple rôle : canaliser le flux d'air, permettre les échanges thermiques entre l'air et le sol et assurer la tenue mécanique de l'ouvrage. Plusieurs méthodes sont alors utilisées pour assurer les raccords (vissage, emboîtement, collage). L'échangeur est généralement enterré entre 4 et 6 m pour le tertiaire et entre 1.5 et 3 m pour le résidentiel individuel. Il est assez éloigné de la dalle des bâtiments pour éviter toute fuite de chaleur de celle-ci vers l'échangeur air-sol. Une pente régulière de 2 à 3% afin d'évacuer les condensats.



Figure 4 : Echangeur géothermique [3]

- **Système d'évacuation des condensats**

L'air chaud et humide entrant et sortant de l'extérieur est refroidi dès qu'il touche les parois de l'échangeur, de la condensation se produit dans les conduits ; un système est mis en place pour évacuer ces condensats

- Ventilateur et système de régulation du puits

La régulation permet d'envisager un fonctionnement du ventilateur du système sur toute l'année. Le ventilateur fonctionnera avec un thermostat placé à l'extérieur de l'habitation et fera varier à l'aide d'un by-pass l'air de l'échangeur et l'air extérieur. Le ventilateur sera dimensionné en fonction du débit d'air neuf nécessaire.

Le principe de l'échangeur air-sol est de faire circuler l'air neuf de ventilation dans un conduit enterré grâce à un ventilateur, avant de le renvoyer dans le bâtiment. En fonction de la profondeur, la température du sol est pratiquement constante tout au long de l'année, alors que l'air extérieur peut varier jusqu'à 35 °C dans la plupart des climats.

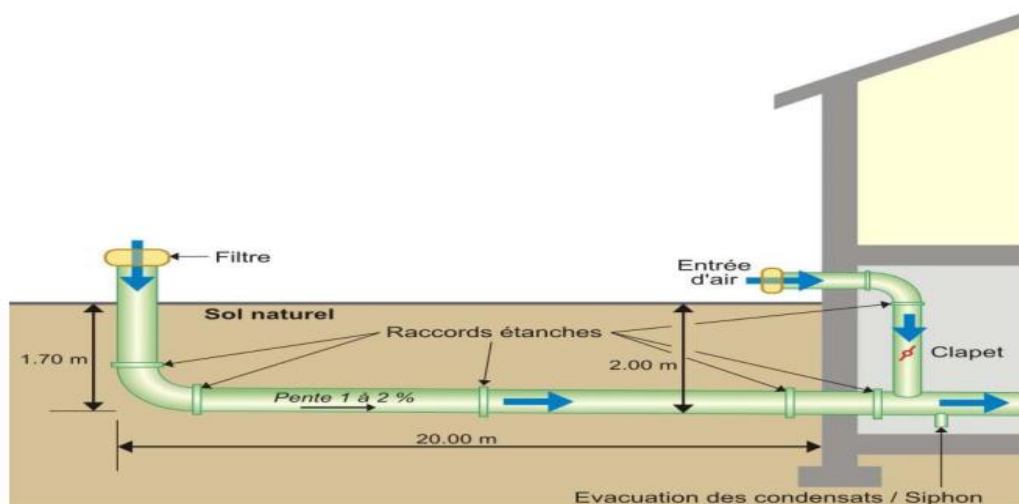


Figure 5 : Schéma de principe d'un échangeur air/sol [2]

1.2.2 Types d'échangeurs air/sol

Avant le choix du type de système d'échangeur air/sol à utiliser, il faut connaître les propriétés thermiques et physiques du sol (conductivité thermique, densité, diffusivité etc.), profondeur du substratum rocheux, profondeur de l'eau et la nature du sol.

On en distingue deux principaux types :

❖ Boucle ouverte

L'air ambiant circule à l'intérieur des tuyaux et est ensuite transféré dans le bâtiment.

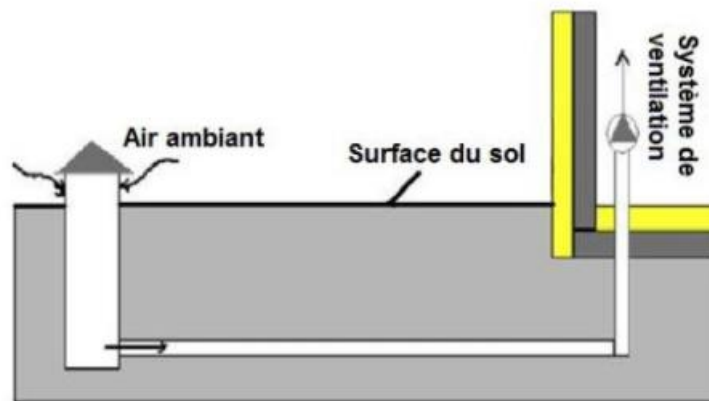


Figure 6 : Echangeur air/sol (système à boucle ouverte) [1]

❖ Boucle fermée

L'entrée et la sortie se trouvent toutes les deux à l'intérieur du bâtiment.

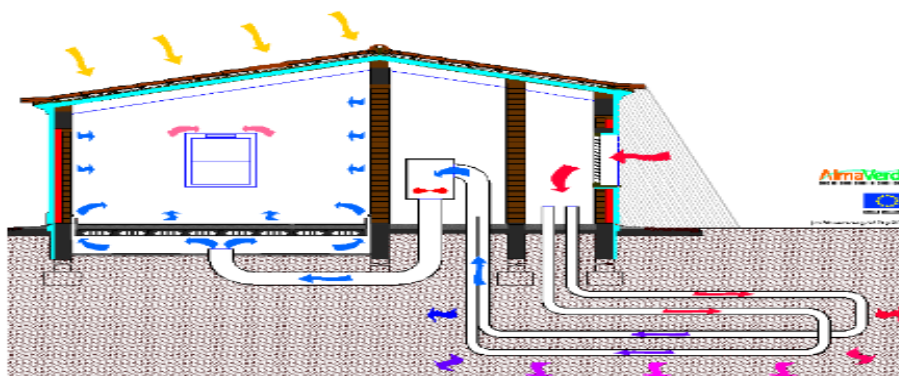


Figure 7 : Echangeur air/sol (système en boucle fermée) [1]

1.2.3 Avantages et inconvénients de la géothermie

❖ Avantages

Les avantages de l'utilisation des techniques de la géothermie sont énormes en termes de performance énergétique et d'impact écologique :

- Les coefficients de performance peuvent atteindre des valeurs entre 10 et 20 (entre 2 et 4 pour des climatisations classiques).
- Maintenance restreinte.
- Coût de maintenance très faible par rapport à une climatisation classique.
- Intégration possible entre d'autres systèmes de climatisation.
- Coût énergétique très faible par rapport à une climatisation classique.
- Capacités de production importantes comparées aux autres énergies renouvelables.
- Energie de base indépendante des conditions climatiques (fonctionne 24h/24h, 365 j/an).
- Très faible consommation électrique, uniquement le ventilateur.
- Aucun impact écologique (pas de déchet, émissions gazeuses très réduites).
- Ressource énergétique renouvelable locale préservant l'environnement et qui ne nécessite pas de transport (de risque de pollution).

❖ Inconvénients

L'inconvénient de l'exploitation de l'énergie géothermique réside dans son installation [4] :

- Ressource naturelle du sous-sol dont l'extraction nécessite la réalisation de forages.
- Coût d'investissement important comparé aux autres énergies renouvelables (travaux d'exploration, réalisation de forages).
- Délai important dans la mise en valeur d'une ressource géothermique.
- Le fluide utilisé étant de l'air, la croissance de micro-organismes peut devenir l'un des inconvénients de l'utilisation d'un système de ventilation couplé à un échangeur. Cela provoque une diminution de la qualité de l'air
- La condensation peut se produire dans les tubes. L'eau condensée doit être extraite régulièrement.

1.3 Bibliographie

Les études et les recherches sur les échangeurs air/sol ont réellement démarré en 1979 après le pic pétrolier et temporairement arrêtée après le contre-choc de 1985. Bon nombre de chercheurs ont mené des études et tests sur plusieurs types de systèmes géothermiques par échangeur air/sol dont l'objectif principal est de libérer et/ou récupérer le maximum de chaleur à un coût abordable. A travers ce chapitre, nous allons explorer quelques travaux théoriques et expérimentaux disponibles qui traitent de la climatisation par des échangeurs air/sol.

1.3.1 Quelques études expérimentales géothermales air/sol

En 2009 Vikas Bansal et al ont étudié les performances d'un échangeur de chaleur terre-tuyau-air pour le chauffage en hiver. Leur étude a révélé que les systèmes d'échangeurs de chaleur terre-conduit-air peuvent être utilisés pour diminuer la charge de chauffage des bâtiments en hiver [5]. A partir d'un modèle transitoire et implicite basé sur la dynamique des fluides computationnelle, ils ont réussi à prédire la performance thermique et la capacité de chauffage des systèmes d'échangeurs de chaleur terre-air-tuyau. Le modèle développé dans le programme de simulation FLUENT a été validé par des investigations expérimentales sur un dispositif expérimental à Ajmer (ouest de l'Inde). Un bon accord entre les résultats simulés et les données expérimentales est obtenu. Le système EPAHE de 23,42 m de long dont il est question dans cet article donne un chauffage de l'ordre de 4,1 à 4,8 °C pour des vitesses d'écoulement de 2 à 5 m/s. La vitesse de l'air à travers le tuyau affecte grandement les performances du système. En 2010 N. Moumami et al ont aussi présenté une étude théorique expérimentale de rafraîchissement par la géothermie dans le site de Biskra [6] et ont établi un modèle analytique de la température de l'air dans le local et présenté un dispositif expérimental.

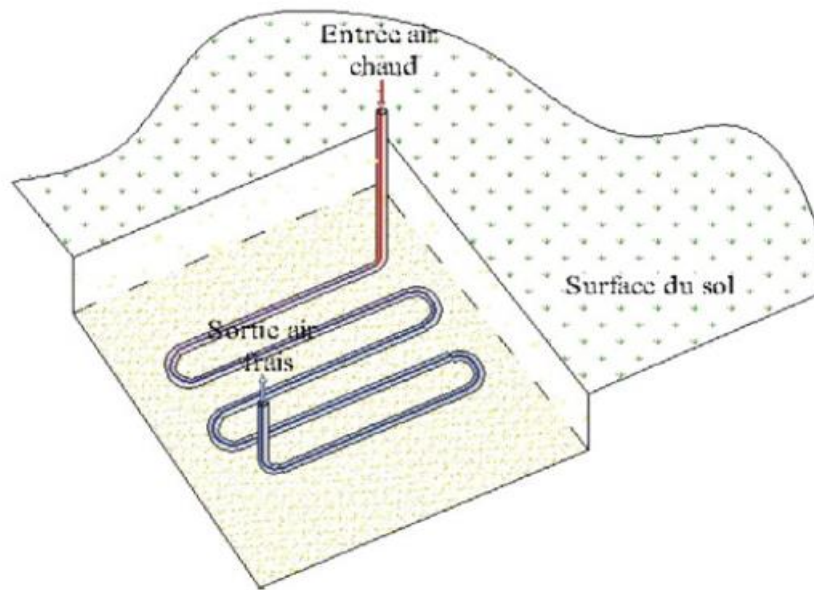


Figure 8 : Echangeur air/sol étudié par Bisoniva et Al [7]

En 2014 Bisoniya et al ont fait l'étude de la performance d'un échangeur air/sol dans les conditions climatiques chaudes et sèches à Bhopal en Inde [7]. L'étude a abouti à un échangeur composé de deux tubes en PVC cylindrique de 0.1016 cm de diamètre intérieur et de longueur 9.114 m pour chaque tube et le tout connecté en série. La longueur totale de l'échangeur enterré à une profondeur de 2 m. est de 19.228 m y compris les coudes et les raccordements Le modèle de simulation du système échangeurs air/sol développé dans CFD plate-forme CFX et validé avec les résultats expérimentaux réalisés sur site. Après simulation, les résultats expérimentaux obtenus pour des vitesses de débit d'air de 2m/s, 3.5m/s, 5m/s montrent que la température de l'air chute rapidement dans les premiers mètres du tube que les derniers.

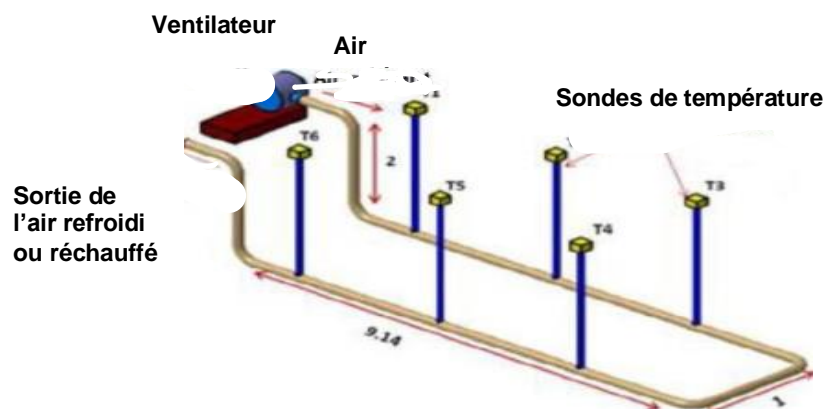


Figure 9 : Echangeur air/sol étudié par Mohamed et Al [8]

L'étude expérimentale et numérique d'un échangeur de chaleur terre-air menée par Mohamed Khabbaz et al porte sur le refroidissement de l'air, connecté à un immeuble résidentiel situé à Marrakech (Maroc) dont le climat est semi-aride chaud [8]. L'échangeur est constitué de trois tuyaux parallèles en PVC de 72 m de long chacun et de 15 cm de diamètre intérieur, enterrés à une profondeur de 2,2 à 3,2 m. Chaque tuyau équipé d'un ventilateur souffle de l'air traité dans le bâtiment. L'étude expérimentale consiste en un suivi estival de l'échangeur via des mesures de température et d'humidité de l'air dans l'ensemble de l'échangeur, ainsi qu'à son entrée et sa sortie vers le bâtiment pour deux valeurs fixes du débit d'air. Les résultats ont montré que l'EAHX est un bon système semi-passif pour le rafraîchissement de l'air, car la température de l'air soufflé enregistrée dans le bâtiment est quasi-constante à 25 °C avec une humidité de l'air d'environ 40 %, même si la température extérieure atteint plus de 40 °C. De plus, la diminution des amplitudes journalières et annuelles de température de l'air se caractérise par une chute exponentielle en fonction de la longueur des canalisations. Les dimensions obtenues pour la longueur caractéristique se situent autour de 20 m et 70 m respectivement pour la réduction des amplitudes de température de l'air journalière et annuelle.

Des simulations dynamiques de l'EAHX à l'aide du logiciel TRNSYS (TYPE 460) réalisées avec un tuyau ou trois tuyaux fonctionnant en continu. Un bon accord a été trouvé entre la simulation et les résultats expérimentaux. Les résultats de la simulation montrent que l'EAHX peut effectuer une baisse maximale de la température de l'air jusqu'à 19,5 °C et 18,3 °C respectivement pour un EAHX à un et trois tuyaux. La puissance frigorifique trouvée est de 58 W/m² (un tuyau) et 55 W/m² (trois tuyaux) pour des températures d'air de 25 °C et 26 °C respectivement, à la sortie de l'EAHX et de 44,6 °C à l'entrée.

En 2017 Nabil A.S. Elminshawy et al ont mené une enquête expérimentale sur l'efficacité de l'échangeur de chaleur à tuyaux terre-air pour les niveaux de compactage du sol [9] et la nouvelle conception de système de refroidissement passif à air atmosphérique qui consiste en un échangeur de chaleur à tuyau terre-air est obtenue. L'objectif de ce système entre dans la perspective de refroidissement de l'air ambiant chaud pour des applications thermiques dans les zones chaudes et arides. Les résultats après dimensionnement ont révélé qu'il faut un tuyau en cuivre de 1,5 m de long et de 1,5 cm de diamètre intérieur enfoui sous le sol et contenu dans un fût en acier galvanisé. Le ventilateur et le réchauffeur d'air utilisés à l'entrée du tuyau permettent d'introduire de l'air chaud à l'intérieur du tuyau afin de le refroidir dans un échangeur de chaleur à tuyau terre-air. L'échangeur de chaleur considéré est performant pour les trois

niveaux de compactage du sol avec des valeurs distinctes de densité relative, d'indice des vides et de porosité. Les résultats expérimentaux montrent que la température de l'air introduite est abaissée dans la plage comprise entre 8 et 24 °C à avec la performance du système variant entre 0,3 et 0,7 en fonction des conditions de fonctionnement et du compactage du sol.

En 2017 B. Kaboré, W.P.G. Ouedraogo, S. Kam, M. Ousmane et D.J. Bathiébo ont fait une étude analytique et expérimentale d'un échangeur de chaleur air-sol à Ouagadougou. Cette étude a été réalisée dans les conditions météorologiques de la ville d'Ouagadougou de l'année 2014. Les résultats justifient l'influence de certains paramètres comme la profondeur du sol, la longueur du tube et le débit d'air sur le fonctionnement annuel de l'échangeur.

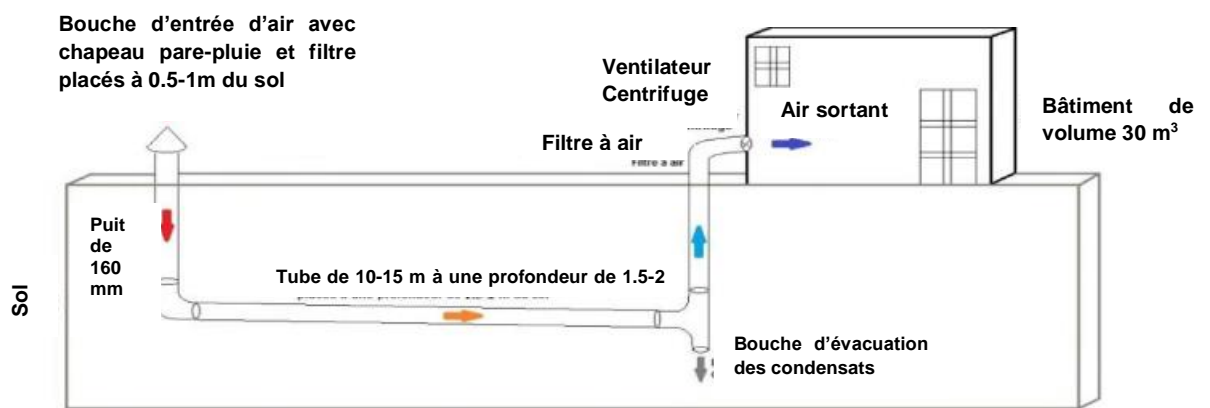


Figure 10 : Système de rafraîchissement présenté par Hsu et Al [10]

Hsu et al ont réalisé en 2018 un dispositif de rafraîchissement intégré constitué de tuyaux d'air immergés dans la fondation du radeau rempli d'eau en se servant d'une immense quantité d'eau et d'une température relativement stable dans la fondation du radeau du bâtiment [10]. L'objectif est d'effectuer une surveillance sur le terrain et d'évaluer l'efficacité de l'EAHE intégré à la fondation de puit rempli d'eau d'un bâtiment résidentiel. L'EAHE intégré à la fondation a été appliqué à un immeuble résidentiel situé à Yilan, à Taïwan, et ses performances thermiques ont été mesurées lors d'une expérience sur le terrain. Les résultats ont indiqué que le potentiel de refroidissement du système intégré était proche du potentiel de l'EAHE basé sur le sol à 2 m de profondeur ou plus. Le modèle analytique proposé par rapport à la méthode de la résistance thermique a été validé par les résultats de mesure et a été utilisé pour effectuer le dimensionnement de l'EAHE intégré à la fondation. Le retour sur investissement en termes de performance thermique et d'économie de l'application fut déterminé. L'utilisation du système

intégré coûte moins de coûts de construction par rapport aux EAHE conventionnel puisque l'installation des conduites d'air est prise en compte dans la construction des fondations du bâtiment.

En 2018 Misra et al ont également fait une étude sur les technologies de chauffage et de refroidissement passifs de l'air par l'exploitation des échangeurs air sol [11]. Ils ont obtenu une efficacité énergétique de l'ordre de 52,25% et 53,18% pour un sol sec et humide respectivement avec le modèle thermique stationnaire basé sur le principe des bilans énergétiques développé. Misra et al ont conclu que la performance thermique peut s'améliorer par l'augmentation de teneur en eau contenue dans le sol où l'échangeur est implanté.



Figure 11 : Montage expérimental de systèmes d'échangeur air sol secs et humide [11]



Figure 12 : Conduites horizontales implantés et verticales pour l'alimentation en eau [11]

Wasseem et al ont fait la comparaison de la performance thermique de l'échangeur air sol dans deux natures de sols différentes (sol sec et mouillé artificiellement) [9]. Des tests ont été effectués à Basra (Irak) pour les deux natures du sol citées précédemment. Les résultats expérimentaux confirment que la teneur en eau dans le sol enveloppant le tube enterré augmente et améliore la performance de l'échange thermique entre l'air en écoulement à l'intérieur du tube et le sol.



Figure 13 : Installation et test du réseau hydratant [9]

1.3.2 Quelques études théoriques géothermales air/sol

Un modèle transitoire a été proposé par V. Bansal et al en 2010 et basé sur la dynamique des fluides computationnelle pour prédire la performance thermique et la capacité de refroidissement des systèmes d'échangeurs de chaleur terre-air-tuyau [11]. Un modèle développé dans le cadre du programme FLUENT et validé par des investigations expérimentales sur un dispositif expérimental à Ajmer en Inde. Le système EPAHE de 23,42 m de long donne un refroidissement compris entre 8,0 et 12,7 °C pour des vitesses d'écoulement de 2 à 5 m/s. Les investigations sur des conduites en acier et en PVC ont montré que l'efficacité du système EPAHE n'est pas affectée par le matériau de la conduite enterrée. Le COP du système EPAHE discuté dans cet article varie de 1,9 à 2,9 pour une augmentation de la vitesse de 2,0 à 5,0 m/s.

M. Benyoub, B. Bouhacina, A. Oudrane et B. Aour en 2012 ont étudié l'influence de l'évolution de la température dans l'échangeur air/sol verticale. A travers cette étude, les considérations faites lors des simulations sont de deux types [12]:

- La première simulation purement thermique est réalisée en appliquant un flux thermique constant aux parois du tube en U.
- La deuxième est consacrée à une stimulation dynamique et thermique de l'échangeur thermique géothermique vertical destiné au stockage de l'énergie solaire.

De toutes ces stimulations sortent les conclusions ci-après :

- L'évolution de la température en fonction de la position montre que le béton dans un échangeur vertical géothermique est nécessaire pour la stabilité et la rigidité du tube en U et pour améliorer le transfert thermique.
- La distribution de la température en fonction de la position montre que la capacité du sous-sol réservé pour le stockage de l'énergie thermique est inversement proportionnelle à la diffusivité du sol.
- La distribution de la température autour du tube en U varie en fonction de la profondeur.

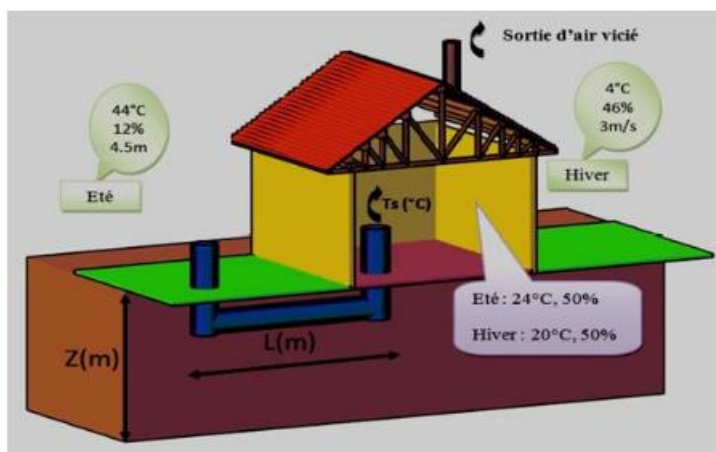


Figure 14 : Géométrie de l'échangeur Air-Sol étudié [12]

Su et al ont développé en 2012 un modèle informatique de l'échangeur de chaleur air-terre (roche) pour évaluer ses performances thermiques. Un modèle de simulation numérique a été développé pour le système de tunnel air-terre (roche) enfoui et comporte un sous-modèle de convection-diffusion transitoire implicite qui décrit la température et l'humidité de l'air, et un modèle de chaleur explicite transitoire.

B. Mebarki, B. Draoui, S. Abdessemed, A. Keboucha, S. Drici et A. Sahli ont développé une étude des performances d'un échangeur air-sol par voie de modélisation analytique et ont étudié

l'influence de quelques paramètres, à savoir : la profondeur, le diamètre et la longueur du tube sur la température intérieure de l'échangeur [9].

En 2015 Benhammou et al ont développé un modèle unidimensionnel transitoire pour l'étude de la performance thermique des échangeurs de chaleur terre-air (EAHE) [8]. Les résultats ont montré que la température de sortie d'air diminue avec l'augmentation de la longueur du tuyau, mais qu'elle augmente avec l'augmentation de la section transversale du tuyau et de la vitesse de l'air. L'efficacité moyenne augmente lorsque la longueur du tuyau augmente, mais elle diminue lorsque la section transversale du tuyau ou la vitesse de l'air augmente et le coefficient de performance diminue rapidement avec l'augmentation de la vitesse de l'air.

En 2015 M. KEPES et al ont mené une investigation numérique sur les différentes configurations géométriques d'un EAHE utilisant la conception constructive pour obtenir le potentiel thermique le plus élevé. Les résultats indiquent que pour une même surface occupée par les conduits et un débit massique d'air fixe, l'augmentation du nombre de conduits améliore la performance thermique de l'échangeur jusqu'à 73 % pour le refroidissement et 115% pour le chauffage.

Djamel Belatrache, Saïs Bentouba, Mahmoud Bourouis en 2017 ont fait une modélisation et simulé un échangeur géothermique air-sol (EAHE). Une analyse paramétrique a été réalisée en tenant compte de la longueur et du rayon du tuyau et de la vitesse de l'air dans le tuyau et la puissance frigorifique journalière maximale de l'EAHE étudiée était de 1,755 kWh. Les résultats ont montré qu'un système EAHE simple peut fournir 246,815 kWh sur une période d'un an [7].

1.3.3 Conclusion

La géothermie permet de récupérer la chaleur stockée dans le sol à différentes profondeurs et à différentes températures et peut servir pour le chauffage et le refroidissement des maisons et les immeubles en fonction de la ressource géothermique du milieu considéré. Plusieurs auteurs ont étudié la conception des échangeurs air-sol à l'exemple de Misra et Al qui ont développé en 2018 un dispositif de rafraîchissement intégré constitué de tuyaux d'air immergés pour rafraîchir un bâtiment pour un sol sec.

CHAPITRE 2 :

MESURE DE LA RESSOURCE GEOTHERMIQUE

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons tracer le graphe montrant l'évolution de la température du sous-sol en fonction de la profondeur et du temps sur le domaine choisi à Hêvié c'est-à-dire l'emplacement du local à climatiser. L'efficacité du système sera fonction de sa configuration, du type des tuyaux utilisés, de la profondeur de la tranchée et bien sûr des propriétés thermiques du site d'où l'intérêt de cette partie.

2.1 Ressource Géothermique

2.1.1 Mesure de la température du sous -sol

Dans le cadre de notre étude, nous avons fait usage d'un thermomètre à tige courte enfouis dans le sous-sol de trois milieux différents de Hêvié à savoir Hlounmin, Sèzoumin et Hounzévié. Nous avons fait usage d'un groupe électrogène et d'un équipement pour creuser vers les profondeurs du sol pour envoyer la tige du thermomètre Checktemp de marque HANNA. Ce matériel de laboratoire permet d'obtenir des résultats rapide et précis et est particulièrement pratique pour les mesures en fûts, de semi-solides, du sol, pour les tests dans les liquides dans les applications de climatisation, chaudières, et chauffages industriels. Il dispose d'une alimentation de 3 piles 1,5 V et une précision de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (-20 à 90°C) $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ (en dehors).



Figure 15 : Photos pour la mesure de la ressource géothermique

2.1.2 Evolution de la température en fonction des milieux

Dans le cadre de notre étude, nous avons effectué des mesures dans le sol de Hêvié dans 3 différents milieux de 1 à 10 m de profondeur pour nous permettre de mesurer le gradient géothermique du site. Ces données nous ont permis de tracer des graphes des trois différents forages afin de rechercher la constance en température suivant la profondeur de fouille. La figure 15 présente la courbe de la température moyenne des trois milieux en fonction de la profondeur (valeurs à l'annexe 1).

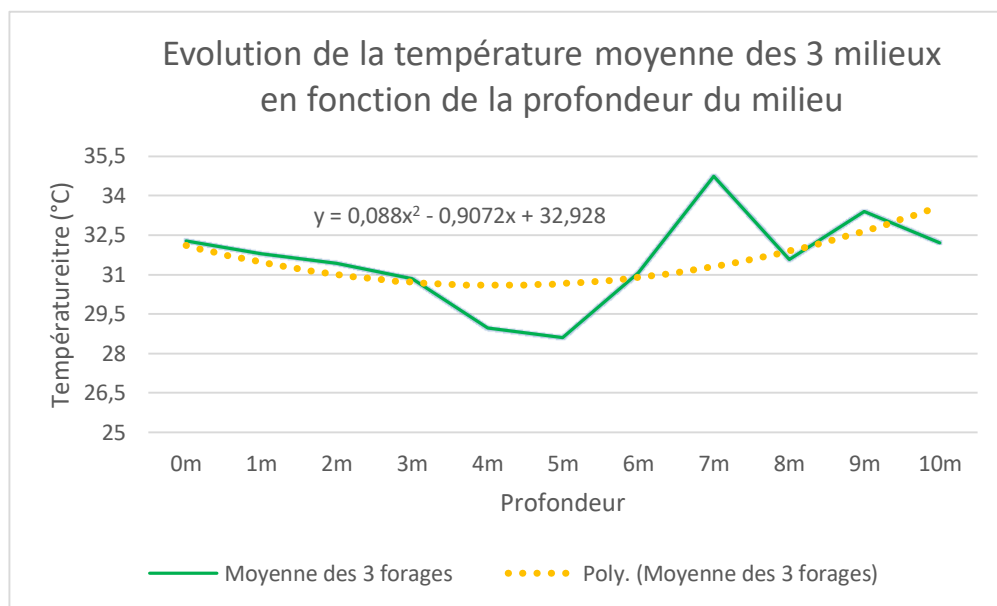


Figure 16 : Evolution de la température moyenne des 3 milieux en fonction de la profondeur du milieu

D'après l'analyse du graphe de la figure 15, on constate une diminution de température moyenne des trois milieux jusqu'à cinq mètres de profondeur (28.2° environs) dû au gradient thermique qui est de 0.8 °C par mètre. Entre 5 m et 10 m la température croit en dent de scie et ne présente pas une monotonie. La température la plus élevée est de 35°C et est obtenue à 7 m de profondeur. Nous retenons alors une profondeur d'implantation de l'échangeur de 5 m dans le sol compte tenu de la plus basse température obtenue dans les 3 milieux.

Pour étayer notre analyse nous avons fait recours au RAPPORT D'INVESTIGATION GEOPHYSIQUES N°1GPH202011001/CSMC-CE/DG/LERGC/SA effectué par le Laboratoire d'Essais et De Recherches en Génie Civil (LERGC S.A) sur les sites de Vedoko, PK14, Gbodjè, Womey, Cader, Akassato pour une profondeur de fouille de 1,4 m (figure 16).

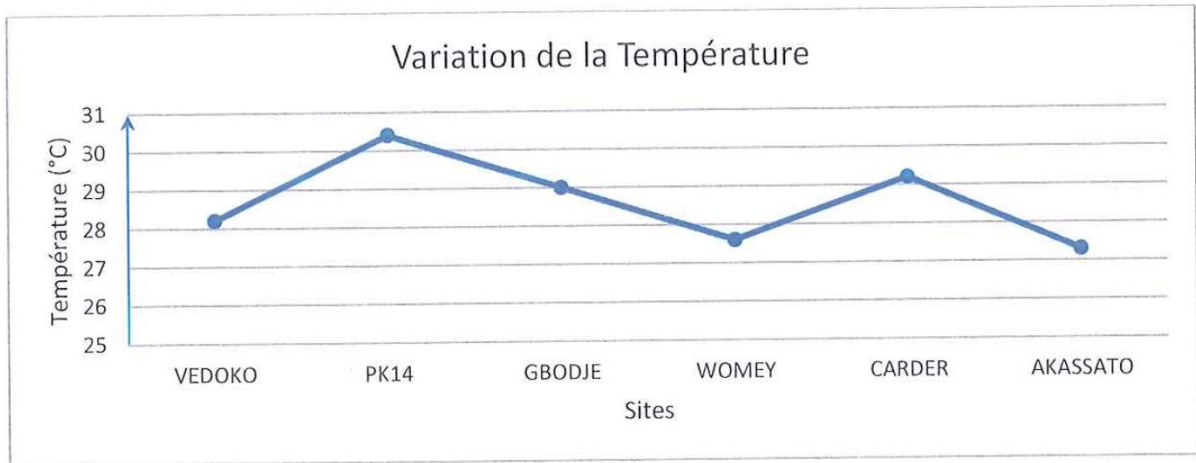


Figure 17 : Variation de la température sur différents sites [13]

2.2 Evolution de la température en fonction des heures des trois différents milieux

2.2.1 Evolution de la température en fonction des heures du milieu 1 : Hlouinmin

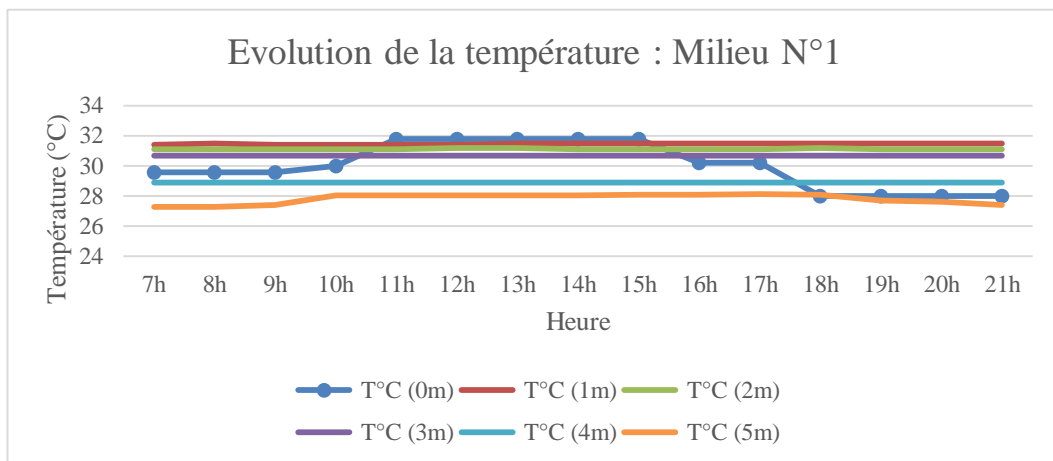


Figure 18 : Evolution de la température : Milieu N°1 (0 à 5 m)

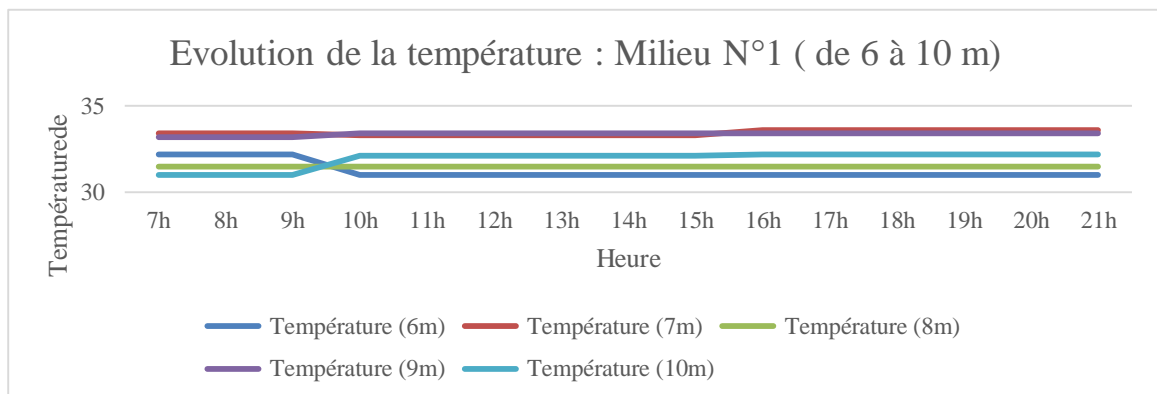


Figure 19 : Evolution de la température : Milieu N°1 (6 à 10 m)

Les figures 17 et 18 présentent l'évolution de la température en fonction des heures de la journée dans le milieu 1 de 0 à 10 m de profondeur. D'après l'analyse des graphes, nous remarquons une constance en température de 1 m à 5m et à 8m durant toutes les heures de mesure. D'après l'analyse des graphes, nous remarquons que la température est constante à 3 m (30.7°C), de 28.9°C à 4m et de 31.5 à 8m de profondeur durant toute la journée. A 5 m du sol, la température du sol varie entre 27.3°C et 27.9 °C de 7h à 09h et est constante de 10h à 14h avec une valeur de 28.06°C avant de chuter à 27.4°C vers 21h. Ces variations sont dues à la variation de l'irradiation solaire durant la journée. A 6m et nous notons une constance en température de 7h à 9h de 32.2°C puis une chute à 31°C de 10 h à 21h due à une légère diminution du gradient géothermique. A 7 et 9m nous constatons une constance en température à 33.5°C avec de très légères variation puis une quasi constante température de 31.5°C à 9 m du sol. A 10 m du sol nous notons une constance en température de 7h à 9h de 31°C et une augmentation de la température à 32°C légère augmentation du gradient géothermique.

2.2.2 Evolution de la température en fonction des heures du milieu 2 : Sèzoumin

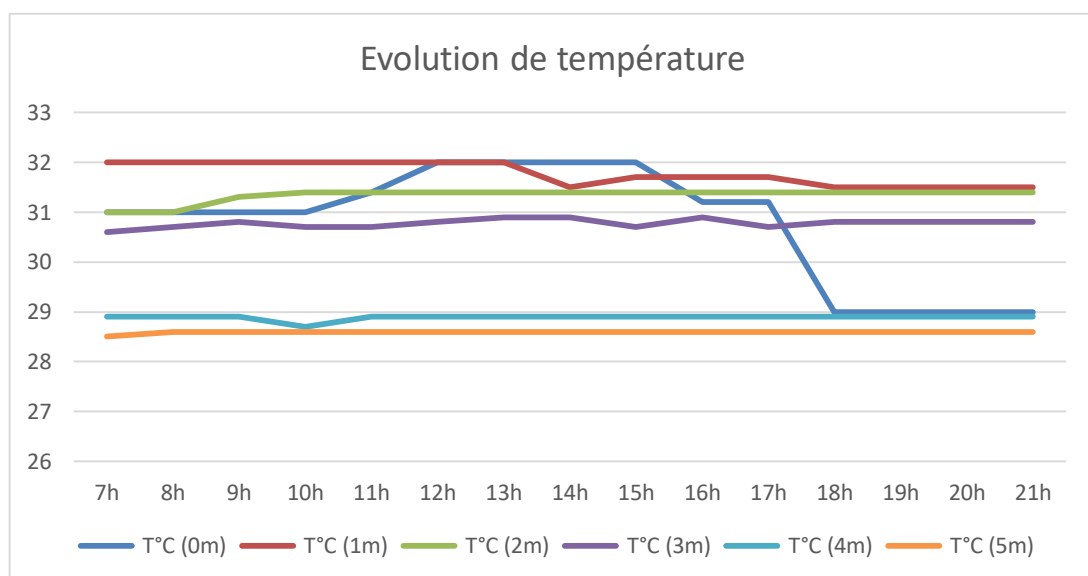


Figure 20 : Evolution de température : Milieu N°2 (0 à 5 m)

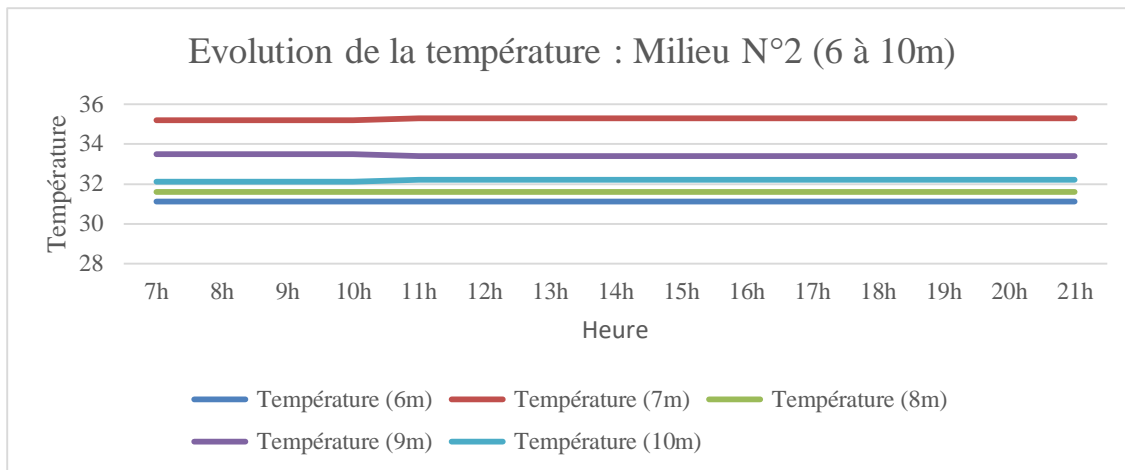


Figure 21 : Evolution de la température : Milieu N°2 (6 à 10m)

Les figures 19 et 20 présentent l'évolution de la température en fonction des heures de la journée dans le milieu 1 de 0 à 10 m de profondeur. D'après l'analyse des graphes, nous remarquons une constance en température de 28.9°C à 4 m, de 28.6°C à 5m, de 31.1 à 6 m et de 31.6 à 8m de profondeur durant toute la journée. A 0 m du sol, on note une augmentation de la température de 7h à 11 h à 32°C maxi puis une stabilisation de 11h à 15h pour une rechute à 28.9 °C à partir de 18H. Ces variations sont dues à la variation de l'irradiation solaire durant la journée. A 1, 2 et 3m, nous constatons une variation en température durant toute la journée due à l'effet de l'échauffement solaire de la surface terrestre. A 7, 9 et 10m du sol, nous notons une légère variation de la température due au gradient géothermique.

2.2.3 Evolution de la température en fonction des heures du Milieu 3 : Hounzévié

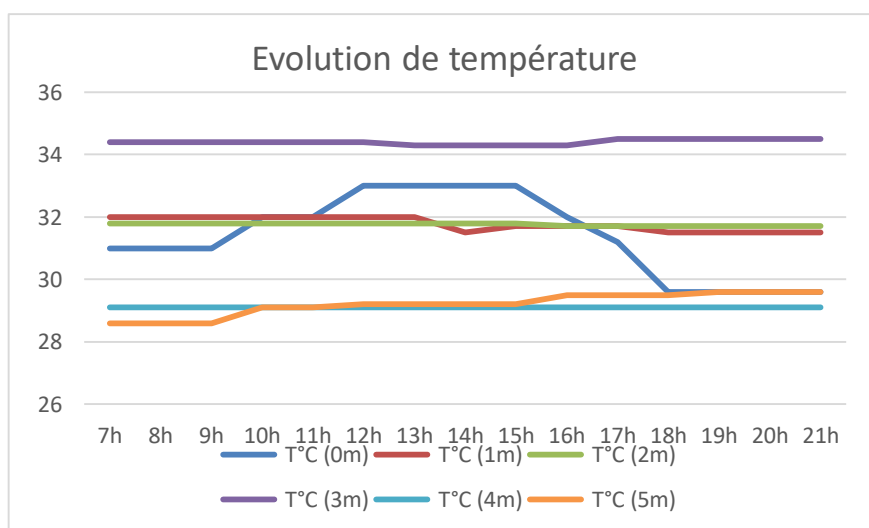


Figure 22 : Evolution de la température : Milieu N°3 (0 à 5m)

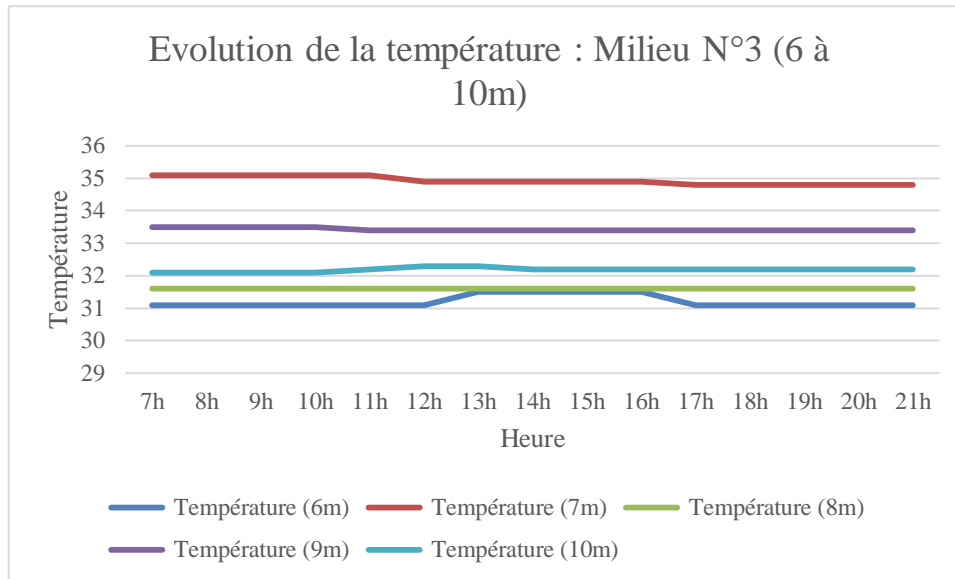


Figure 23 : Evolution de la température : Milieu N°3 (6 à 10 m)

Les figures 21 et 22 présentent l'évolution de la température en fonction des heures de la journée dans le milieu 3 de 0 à 10 m de profondeur. D'après l'analyse des graphes, nous remarquons une constance en température de 29.1°C à 4 m, de 28.6°C à 5m et de 31.6 à 8m de profondeur durant toute la journée. A 0 m du sol, on note une augmentation de la température de 7h à 11 h à 32 degré maxi puis une stabilisation de 12h à 15h pour une rechute à 29.6 °C à partir de 18H. Ces variations sont dues à la variation de l'irradiation solaire durant la journée. A 1, 2 et 3m nous constatons une variation en température durant toute la journée due à l'effet de l'échauffement solaire de la surface terrestre et du gradient thermique. A 6, 7, 9 et 10m du sol, nous notons une légère variation de la température due au gradient géothermique.

2.3 Calcul des erreurs sur les valeurs relevées et synthèse

2.3.1 Calcul des écarts sur les valeurs relevées sur les températures

- **Ecart absolue**

Soit x , un nombre et x^* , une approximation de ce nombre. L'erreur absolue donne une mesure quantitative de l'erreur commise. Elle est définie par :

$$\Delta x = |x - x^*|$$

- **Ecart relative**

Soit x , un nombre et x^* , une approximation de ce nombre. L'erreur relative $Er(x^*)$ est définie par :

$$Er(x^*) = \frac{|x - x^*|}{|x|} = \frac{\Delta x}{|x|}$$

L'appareil de référence indique une température 28 °C. Soit $x^* = 28$ °C
 Les tableaux ci-dessous montre les calculs des erreurs sur les valeurs relevées de la température à des profondeurs données dans les trois forages.

Tableau 1 : Température à des profondeurs données dans les trois milieux à 10h

Profondeur	Température			Δx			E (x*)		
	1 ^{er} milieu	2eme milieu	3eme milieu	1er milieu	2eme milieu	3eme milieu	1er milieu	2eme milieu	3eme milieu
0m	31,8	31,4	32	3,8	3,4	4	0,119	0,108	0,125
1m	31,4	32	32	3,4	4	4	0,108	0,125	0,125
2m	31,1	31,4	31,8	3,1	3,4	3,8	0,100	0,108	0,119
3m	30,7	30,7	34,4	2,7	2,7	6,4	0,088	0,088	0,186
4m	28,9	28,9	29,1	0,9	0,9	1,1	0,031	0,031	0,038
5m	28,06	28,7	29,1	0,06	0,7	1,1	0,0021	0,025	0,039
6m	31	31,1	31,1	3	3,1	3,1	0,097	0,100	0,100
7m	33,3	35,3	35,1	5,3	7,3	7,1	0,159	0,207	0,202
8m	31,5	31,6	31,6	3,5	3,6	3,6	0,111	0,114	0,114
9m	33,4	33,4	33,4	5,4	5,4	5,4	0,162	0,162	0,162
10m	32,1	32,2	32,2	4,1	4,2	4,2	0,128	0,130	0,130

Tableau 2 : Résumé des valeurs obtenues pour les températures

Profondeur	Ecart sur la Température T°C		
	1er milieu	2eme milieu	3eme milieu
0m	31,8 ± 3,8	31,4 ± 3,4	32 ± 4
1m	31,4 ± 3,4	32 ± 4	32 ± 4
2m	31,1 ± 3,1	31,4 ± 3,4	31,8 ± 3,8
3m	30,7 ± 2,7	30,7 ± 2,7	34,4 ± 6,4
4m	28,9 ± 0,9	28,9 ± 0,9	29,1 ± 1,1
5m	28,06 ± 0,6	28,7 ± 0,7	29,1 ± 0,6
6m	31 ± 3	31,1 ± 3,1	31,1 ± 3,1
7m	33,3 ± 5,3	35,3 ± 7,3	35,1 ± 7,1
8m	31,5 ± 3,5	31,6 ± 3,6	31,6 ± 3,6
9m	33,4 ± 5,4	33,4 ± 5,4	33,4 ± 5,4
10m	32,1 ± 4,1	32,2 ± 4,2	32,2 ± 4,2

2.3.2 Conclusion

Il faut noter que, plus on fouille en profondeur, on remarque une diminution de la température dans les 3 milieux de 1 à 5m puis une augmentation de la température de 6 à 10 m du sol. La plus petite température de l'ordre de 28.04°C observé à 5 m du sol dans les 3 milieux nous renseigne sur l'homogénéité des deux types de transfert à savoir : Conduction de la surface de la terre vers les profondeurs et de la convection des profondeurs vers la surface due aux dégradations des roches souterraines.

CHAPITRE 3 :

CARACTERISATION GEOTHERMIQUE POUR LE REFROIDISSEMENT DES LOCAUX : ETUDE THEORIQUE

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons aborder l'étude théorique de l'échangeur destiné au rafraichissement du bureau.

3.1 Modélisation de la température de l'air

3.1.1 Hypothèses

Dans cette étude, on considère que :

- L'échange thermique se fait en régime stationnaire ;
- Le sol est considéré homogène ;
- Les caractéristiques de l'air et du sol (masse volumique, conductivité thermique, chaleur massique...) sont considérées constantes ;
- Dans une section de conduit perpendiculaire à l'écoulement, l'air est considéré homogène, l'échange convectif est régi par un coefficient convectif moyen ;
- La température extérieure du tube est constante, ce qui revient à considérer que l'inertie thermique du sol est grande devant les quantités de chaleur échangées ;
- La vitesse de l'air est considérée constante le long du tuyau.

3.1.2 Etablissement du modèle analytique

Le sol est considéré comme un massif semi infini. L'échange thermique se fait par conduction de sa surface vers l'intérieur d'après l'équation de la conduction. Dans cette étude, on considère la température du sol constante. Il s'agira de rechercher à partir des équations du bilan énergétique, l'expression analytique qui traduit l'évolution de la température de l'air le long de l'échangeur en fonction des paramètres suivant :

- La température ambiante à l'extérieur du local T_e ;
- La température du sol à la profondeur considérée T_s ;
- La température de l'air le long du tube T_a ;
- Les caractéristiques thermo-physiques du sol ;
- La géométrie et la nature du conduit ;
- Le débit d'air ;

Le flux thermique (ϕ) échangé par unité de surface à travers la paroi du conduit est proportionnel à la différence de température entre la surface interne et externe du tube :

$$\phi = \frac{T_s - T_{air}}{R}$$

Avec R la résistance thermique d'une paroi cylindrique [3], donnée par l'expression :

$$R = R_{cd} + R_{cv} = \frac{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}{2\pi \cdot \lambda \cdot L} + \frac{1}{5.55 * v^{0.8}}$$

La La quantité de chaleur échangée par unité de temps s'écrit :

$$dQ = \phi \times S \times dt$$

$$dQ = \frac{T_s - T_{air}}{R} \times S \times dt$$

$$dQ = \frac{T_s - T_a}{R} \times 2\pi \times r \times L dt$$

$$\text{Or } v = \frac{dL}{dt} \Rightarrow dt = \frac{dL}{v}$$

$$\text{donc } dQ = \frac{T_s - T_a}{R} \times 2\pi \times r \times L \frac{dL}{v} \quad (1)$$

Cet échange de chaleur entraîne une variation de température de l'air, donnée par :

$$dQ = \rho \times c \times V \times dT_{air}$$

$$dQ = \rho \times c \times \pi \times r^2 \times L \times dT_{air} \quad (2)$$

En égalisant les équations (1) et (2), on aura :

$$\frac{T_s - T_a}{R} \times 2\pi \times r \times L \frac{dL}{v} = \rho \times c \times \pi \times r^2 \times L \times dT_{air} \quad ;$$

$$\frac{T_s - T_a}{R} \times 2 \frac{dL}{v} = \rho \times c \times r \times dT_{air} \quad ;$$

$$\frac{T_s - T_{air}}{dT_{air}} = \frac{\rho \cdot c \cdot r \cdot v \cdot R}{2dL}$$

$$\frac{dT_{air}}{T_s - T_{air}} = \frac{2dL}{\rho \cdot c \cdot r \cdot v \cdot R}$$

L'expression (7) peut être intégrée de $T_{entrée}$ (T_e) à T_{sortie} (T_a) de l'air et de zéro jusqu'à la longueur L de l'échangeur :

$$\int_{T_e}^{T_a} \frac{dT_{air}}{T_s - T_{air}} = \int_0^L \frac{2 \times dL}{\rho \times c \times r \times v \times R}$$

$$\int_{T_e}^{T_a} \frac{dt_{air}}{T_{air} - T_s} = \int_0^L \frac{-2 \times dL}{\rho \times c \times r \times v \times R}$$

$$[\ln(T_{air} - T_s)]_{T_e}^{T_a} = \left[\frac{-2 \times dL}{\rho \times c \times r \times v \times R} \right]_0^L$$

$$\ln(T_a - T_s) - \ln(T_e - T_s) = \frac{-2L}{\rho \cdot c \cdot r \cdot v \cdot R}$$

$$\ln\left(\frac{T_a - T_s}{T_e - T_s}\right) = \frac{-2L}{\rho \cdot c \cdot r \cdot v \cdot R}$$

$$\frac{T_a - T_s}{T_e - T_s} = e^{\frac{-2L}{\rho \cdot c \cdot r \cdot v \cdot R}}$$

$$T_a - T_s = (T_e - T_s) \exp\left(\frac{-2L}{\rho \cdot c \cdot r \cdot v \cdot R}\right)$$

$$T_a = T_e \times \exp\left(\frac{-2L}{\rho \times c \times r \times v \times R}\right) - T_s \times \exp\left(\frac{-2L}{\rho \times c \times r \times v \times R}\right) + T_s$$

D'où l'expression de la température de l'air dans l'échangeur :

$$T_a = T_e \times \exp\left(\frac{-2L}{\rho \times c \times r \times v \times R}\right) + T_s \times (1 - \exp\left(\frac{-2L}{\rho \times c \times r \times v \times R}\right))$$

L'objectif de cette partie, étant de comparer les résultats de l'étude expérimentale et l'étude théorique, nous avons établi le modèle théorique qui permet d'exprimer l'évolution de la température en fonction de la longueur de la tuyauterie qui donne :

$$T_a = T_e * e^{\frac{-2L}{\rho * c * r * v * R}} + T_{sol} * (1 - e^{\frac{-2L}{\rho * c * r * v * R}})$$

3.2 Application et simulation dans le logiciel SCILAB

3.2.1 Application

Avec les hypothèses émis, on a :

- Température d'entrée de l'air T_{ae} : *Température ambiante*, 33 °C
- Température du sol T_{sol} : 28 °C
- Masse volumique de l'air : $\rho = 1,292 \text{ Kg/m}^3$
- Chaleur massique de l'air : $C = 1005 \text{ J/Kg K}$

- Vitesse de l'air : $v = 3,77 \text{ m/s}$

$$\text{soit } m = \rho * C * r_1 * v = 1,292 * 1005 * \frac{0,1538}{2} * 3,77 = 376.44$$

$$T_a = T_{ae} * e^{\frac{-2L}{m*R}} + T_{sol} * (1 - e^{\frac{-2L}{m*R}})$$

- Résistance thermique : $R = R_{cd} + R_{cv} = \frac{\ln \frac{D_2}{D_1}}{2\pi\lambda_{tube}L} + \frac{1}{h.\pi.D.L}$

- $\lambda_{tube} = 1,7 \text{ W/m K}$ et $\lambda_{air} = 0,0262 \text{ W/mK}$

Pour un tube PVC de diamètre intérieur 153.8 mm et diamètre extérieur 160 mm.

$$R = \frac{\ln \frac{160}{153,8}}{2\pi * 1,7 * L} + \frac{1}{5,55 * 5,02^{0.8}} \text{ K/W}$$

$$R = \frac{0,0037}{L} + \frac{1}{20,18} \text{ K/W}$$

$$\text{Et on a : } T_a = T_e * e^{\frac{-2L}{376,44*R}} + T_{sol} * (1 - e^{\frac{-2L}{376,44*R}})$$

3.2.2 Simulation avec SCILAB

❖ Simulation de la température de l'air T_a en fonction de la longueur l de la tuyauterie dans SCILAB

Scilab est dans la famille des logiciels de calcul scientifique. C'est un outil de modélisation et de calcul. Contrairement à beaucoup de produits que l'on rencontre dans le monde industriel qui sont conçus pour une thématique précise, Scilab est généraliste et peut s'adapter à divers contextes par le développement de boîte à outils. Les logiciels de calcul numérique reçoivent en entrée des données numériques (en général des flottants 32 ou 64 bits) et crachent à la sortie des résultats numériques. Dans cette catégorie on peut citer :

- R, SPSS : spécialisés en statistique ;
- Octave ;
- Scilab ;
- Matlab : généralistes ;

– Excel ;

❖ Code de Ta en fonction de L dans SCILAB

```
Tae=33; Tsol=28; m=376.44;  
function A=Ta(L)  
  R=(1/20.18)+(0.0037/L)  
  A=(Tae*exp((-2*L)/(m*R)))+(Tsol*(1-exp((-2*L)/(m*R))));  
endfunction  
  
tabTa=1:1:50;  
for x=1:1:50;  
  tabTa(x)=Ta(x)  
end  
  
y=1:1:50;  
plot2d(y,tabTa,style=5,leg="Evolution de la température en fonction de la longueur de la tuyauterie");
```

❖ Graphique obtenu

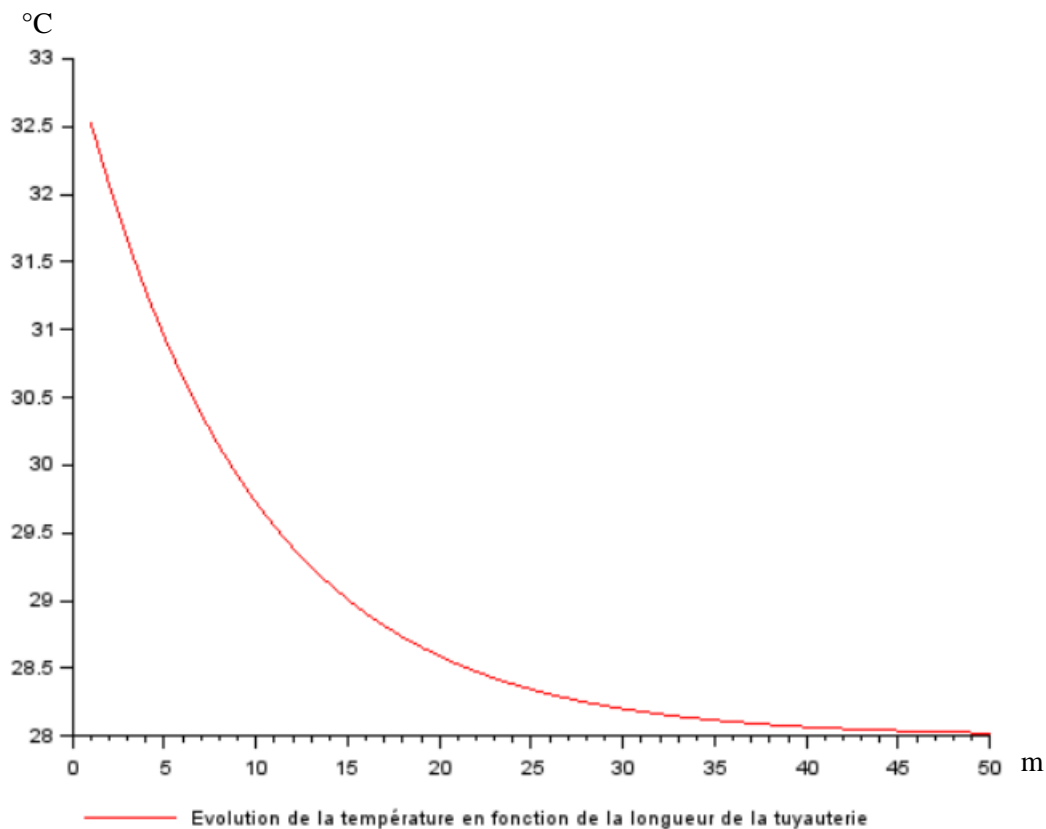


Figure 24 : Evolution de la température en fonction de la longueur de la tuyauterie

$$T_a = T_{ae} * e^{\frac{-2L}{1133,87 * R}} + T_{sol} * (1 - e^{\frac{-2L}{1133,87 * R}})$$

La simulation faite considère la longueur (1 à 100m) et on a obtenu la température qui varie de 33 °C à 28°C.

3.3 Confort thermique

❖ Confort thermique du local

Un système de ventilation peut permettre d'accroître le confort intérieur du bâtiment. Il offre notamment des conditions intérieures plus proches de celles trouvées à l'extérieur et évite ainsi les méfaits éventuels des chocs thermiques liés à l'usage d'air conditionné. La ventilation offre plus de flexibilité et de contrôle aux occupants, ceux-ci pouvant notamment modifier l'aération comme dans le système de conditionnement d'air que nous avons proposé avec l'échangeur air sol. Le ventilateur proposé dans l'étude expérimentale permettra non seulement d'extraire l'air depuis l'extérieure dans les cinq canalisations de tubes de 160 mm sur environ 16m mais également de modifier la vitesse de l'air afin que la température ressentie soit inférieure à la température du sol. Ainsi, la ventilation et l'hygrométrie permettent de modifier la température de l'air ressentie dans le local. Une vitesse de 1m/s peut ainsi permettre d'accroître la température de confort jusqu'à 30-31°C (différence entre température ressentie et température ambiante de l'ordre de 4°C) [18]

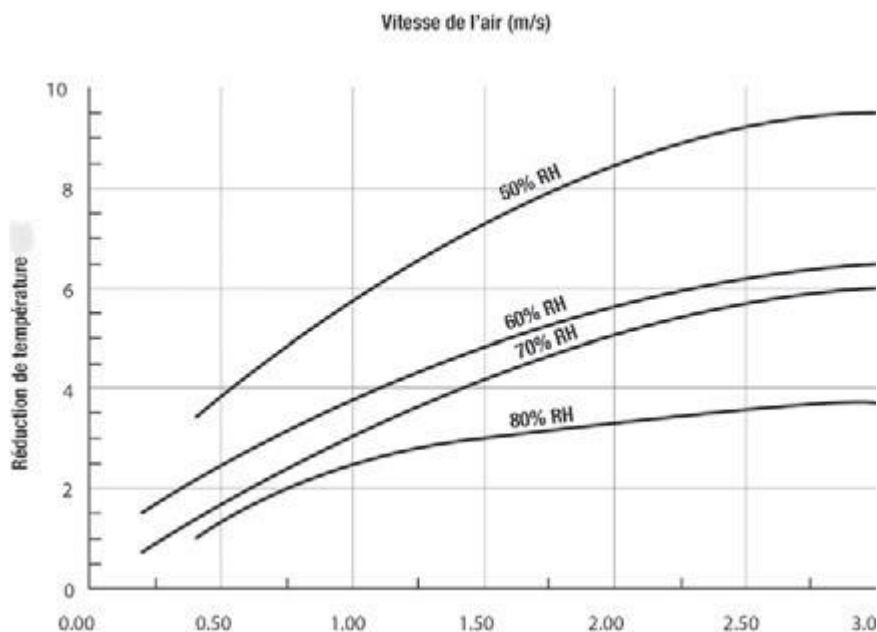


Figure 25 : Réduction de la température (°C) en fonction de la vitesse de l'air et l'hygrométrie [18]

La figure 33 extraite de Guide du bâtiment durable en régions tropicales Tome 1 : Stratégies de conception des nouveaux bâtiments en régions tropicales [18] montre la réduction de la température (°C) en fonction de la vitesse de l'air et de l'hygrométrie. De ce graphe nous

pouvons conclure que pour une vitesse d'air proche de 3 m/s et une hygrométrie de 60%, nous avons une réduction de température proche de 6 °C. Ainsi, la température de l'air au ressentie dans le local de l'étude expérimentale sera réduite de 6 °C soit de 28 °C à 22 °C. Nous pouvons ainsi réussir à assurer le confort thermique dans le local grâce à notre système.

❖ Modèle théorique pour différentes configurations de l'échangeur

Pour l'ensemble du système, le potentiel des échangeurs air-sol sera caractérisé via SCILAB, pour différentes configurations types (fonction de la géométrie de l'échangeur, du débit d'air, des conditions de surface, etc.). Ainsi, nous avons proposé le code de SCILAB qui permet d'avoir la température de l'air du local à climatiser pour différentes configurations de la tuyauterie et de la température à l'extérieur du local.

$$T_a = T_e + \frac{-2L}{e^{\rho * c * r * v * R}} + T_{sol} * (1 - e^{\frac{-2L}{\rho * c * r * v * R}})$$

- Masse volumique de l'air : $\rho = 1,2 \text{ Kg/m}^3$

- Chaleur massique de l'air : $C = 1005 \text{ J/Kg K}$

- Conductivité thermique : $\lambda = 0,16 \text{ W/m K}$

$$\rho * C * r_1 * v = 1,2 * 1005 * \frac{D_1}{2} * v = 603 * D_1 * v$$

- $T_a = T_{ae} + e^{\frac{-2L}{603 * D_1 * v * R}} + T_{sol} * (1 - e^{\frac{-2L}{603 * D_1 * v * R}})$

$$R = \frac{\ln \frac{D_2}{D_1}}{2\pi\lambda L} + \frac{1}{5,55 * v^{0,8}}$$

- $R = \frac{\ln \frac{D_2}{D_1}}{3,77L} + \frac{1}{5,55 * v^{0,8}}$

❖ Code dans SCILAB

```
function A=T_a(D1, D2, L, Tae, Tsol, v)
R=(log(D2/D1)/(3.77*L))+1/(5.55*(v^0.8))
A=(Tae*exp((-2*L)/(603*D1*v*R)))+(Tsol*(1-exp((-2*L)/(603*D1*v*R))));
Endfunction
```

Conclusion

Le modèle théorique obtenu fournit la température à la sortie de l'échangeur en fonction de la longueur de la tuyauterie selon les paramètres et les hypothèses de notre étude. Ce modèle mathématique obtenu nous a permis d'avoir l'allure de la courbe qui montre l'évolution de la température de l'air en fonction de la longueur de la tuyauterie de l'échangeur. Le confort thermique est assurée grâce à la température de ressenti de **22 °C** qu'offre le ventilateur du système de rafraîchissement du local par l'échangeur air-sol.

CHAPITRE 4 :

CARACTERISATION GEOTHERMIQUE POUR LE REFROIDISSEMENT DES LOCAUX : ETUDE EXPERIMENTALE

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons faire le bilan thermique du bureau dédié au projet puis s'en suivra le dimensionnement des composants de notre échangeur air/sol.

4.1 Bilan thermique de la climatisation du local

Le bilan thermique de la climatisation de l'appartement se situant à Hêvié (Hlouinmin) suivant la latitude : 6.408 N et longitude : 2.26 E.

4.1.1 Cahier de charge

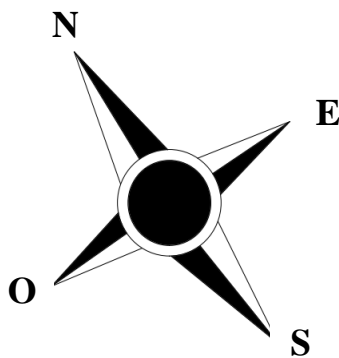


Figure 27 : Orientation Nord-Sud-Ouest-Est

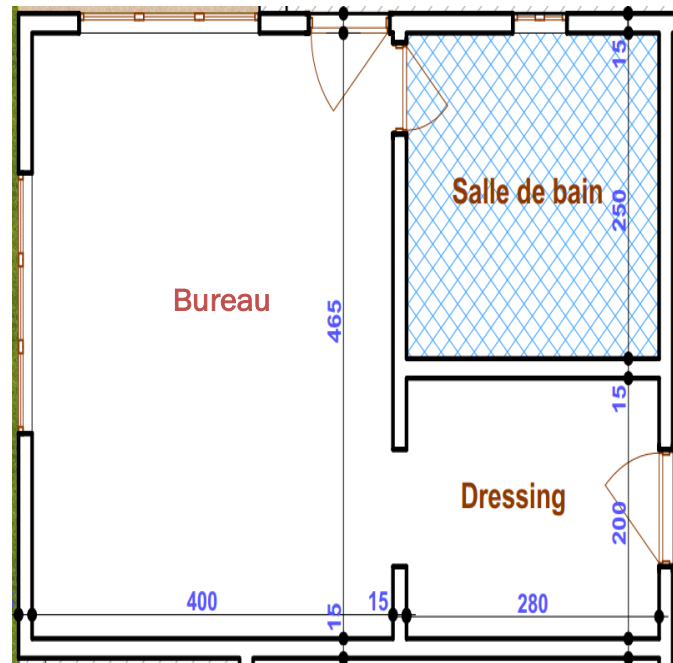


Figure 26 : Plan du local à climatiser

Le local dédié à notre étude expérimentale a les caractéristiques suivantes :

- Murs extérieurs en aggro creux de 15 cm avec enduit extérieur et intérieur au ciment ;
- Cloisons en agglomérés creux de 15 cm avec enduit extérieur et intérieur au ciment ;
- Plancher en béton de sable de 20 cm ;
- Plafond en béton de sable de 20 cm ;
- Hauteur sous plafond : $H = 3.20$ m
- Porte en, bois de 2.10 x 0.8 m, châssis en bois

- Porte en, bois de 2.10 x 0.6 m, châssis en bois
- Epaisseur des portes : 3.5 cm
- Fenêtre : 1.8x1.3 m, châssis en bois
- Fenêtre : 1.8x0.75 m, châssis en bois

Les appareils utilisés :

- 1 ordinateurs de bureau (chaleur sensible : 250 W ; chaleur latente : 0 W)
- Durée d'occupation 19h à 10 h
- Durée d'éclairage de 18h à 8 h
- Lampes utilisées : 3 Luminaires LED de 18W.

On donne :

- Température intérieure : 25 °C Humidité relative = 60 % $w = 12\text{kg/kg}$ d'air sec
- Température extérieure : 33 °C Humidité relative = 80% $w = 24.5\text{ kg/kg}$ d'air sec
- Mois de base : Mars
- Heure de base : 10h
- Ventilation mécanique ;
- Nombre d'occupants : 02 personnes
- Les parois exposées : Nord-Est, Nord-Ouest

Pour l'étude, il nous faut les conditions climatiques de la zone du local à savoir l'irradiation globale horizontale et la température moyenne mensuelle afin de dimensionner l'échangeur en fonction du mois le plus chaud. L'irradiation globale horizontale désigne le rayonnement solaire sur une surface horizontale de la terre, c'est-à-dire l'énergie rayonnante totale du soleil qui atteint directement la surface de la terre au cours d'une unité de temps précise exprimée en KWh/m^2 . La température moyenne mensuelle exprimée en degré Celsius et l'irradiation globale horizontale sont relevés à l'aide du logiciel PVGIS. PVGIS est une application web qui permet d'obtenir des données sur le rayonnement solaire et la production d'énergie photovoltaïque (PV), n'importe où dans la plupart des régions du monde. Son utilisation est entièrement gratuite, sans restriction sur l'utilisation des résultats et sans inscription nécessaire. Les valeurs de l'irradiation globale horizontale et de la température moyenne mensuelle de 2015 à 2020 issues du logiciel en ligne PVGIS sont mentionnées ci-dessous.

Irradiation globale horizontale

Mois	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Janvier	188.66	182.77	178.19	187.45	173.19	187.54
Février	162.84	182.99	170.5	159.14	157.34	182.21
Mars	180.1	173.89	193.21	188.45	187.5	187.36
Avril	192.43	189.06	184.41	183.66	178.75	170.04
Mai	179.42	170.75	151.81	168.98	160.84	174.67
Juin	128.3	129.85	128.17	148.57	148.77	130.3
Juillet	161.03	159.07	133.44	148.29	151.18	144.4
Août	150.43	162.5	138.85	173.27	176.07	182.74
Septembre	147.02	156.8	154.81	148.08	136.44	141.45
Octobre	169.35	153.78	176.95	167.94	126.6	165.45
Novembre	172.5	173.32	168.43	156.71	160.39	164.9
Décembre	187.33	176.52	169.37	177.76	174.14	177.21

Figure 28 : Valeurs de l'irradiation globale horizontale à Hêvié entre 2015 et 2020 en KWh/m²

La figure 27 montre les courbes de l'irradiation globale horizontale et la température moyenne mensuelle de la zone considérée à Hervié pour l'étude.

Irradiation solaire mensuelle

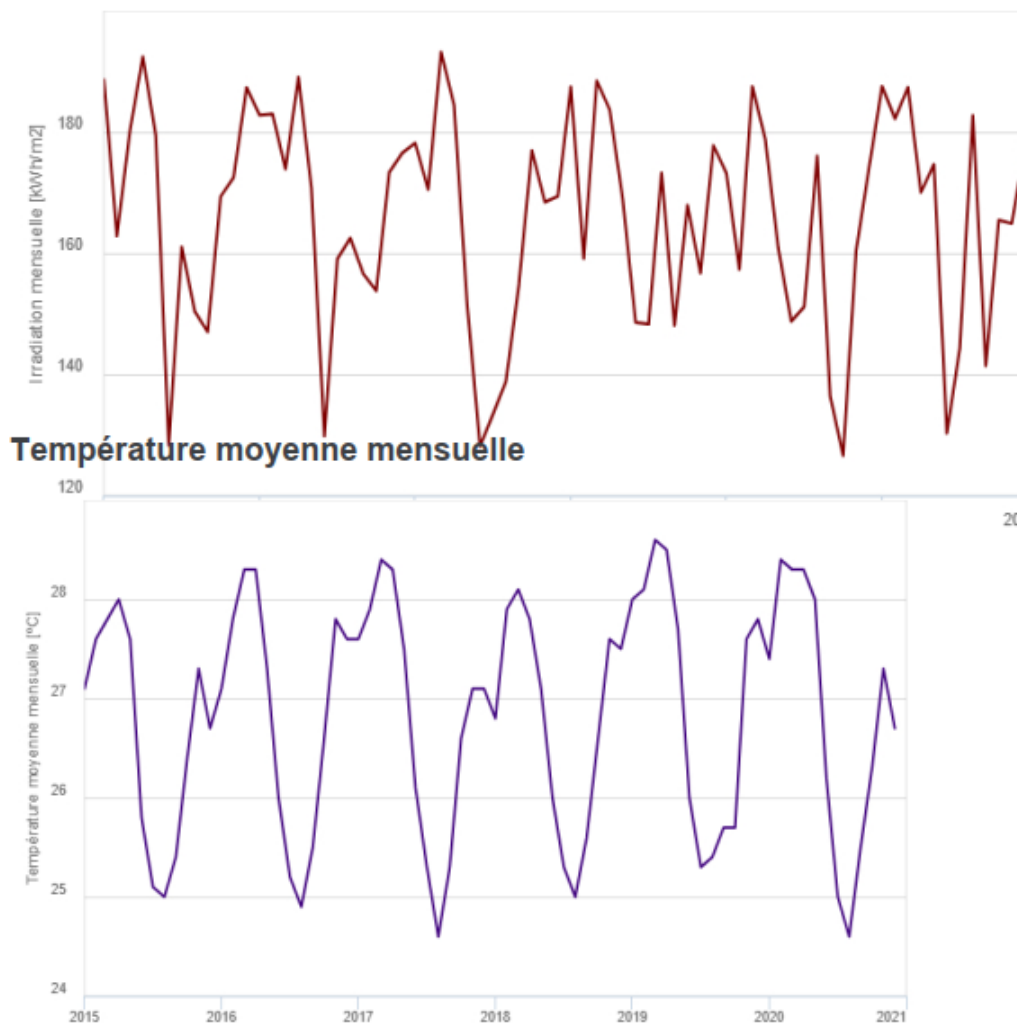


Figure 29 : Irradiation solaire mensuelle et température moyenne mensuelle à Hêvié

Après analyse des figures 25 et 26, le mois de mars présente l'irradiation solaire maximale sur les cinq années considérées (2015 à 2020) estimée à 193.21 kWh/m². De même les températures moyennes mensuelles des mois de mars sont plus élevées que les autres mois de 2015 à 2020. De tout ce qui précède, nous considérons que le mois de mars est le mois le plus chaud de la zone considéré pour l'étude. Il reste à déterminer alors l'heure de la journée qui présente l'irradiation la plus élevée.

Heure de charge thermique du local

Nous avons calculé la charge thermique des faces du local qui sont exposées au soleil aux deux heures critiques de la journée où le soleil est ardent à savoir 10h et 13h. Les faces du local qui sont exposées au soleil sont la face Nord-Ouest et la face Nord-Est.

$$Q_{thermique} = m * s + v * s$$

Avec s la surface considéré.

Heu	Hor	N		S		E		O		N-E		N-O		S-E		S-O	
		m	V	M	V	m	v	m	v	m	v	M	v	m	V	m	v
7	604	129	103	164	131	585	468	127	102	476	380	127	102	426	341	127	102
8	410	158	126	177	141	312	249	158	126	280	224	158	126	253	203	158	126
9	639	225	180	267	213	450	360	225	180	414	331	225	180	355	284	225	180
10	800	254	203	322	258	482	385	254	203	463	371	254	203	367	293	254	203
11	870	284	227	362	290	408	326	284	227	427	341	284	227	317	253	284	227
12	836	283	226	357	285	283	226	283	226	335	268	335	268	283	226	283	226
13	749	250	200	315	252	250	200	354	283	250	200	370	296	250	200	277	222
14	610	205	164	253	203	205	164	367	294	205	164	354	283	205	164	285	228
15	437	154	123	182	146	154	123	308	247	154	123	283	226	154	123	243	194
16	237	95	76	105	84	95	76	178	142	95	76	160	128	95	76	146	117
17	66	34	27	35	28	34	27	45	36	34	27	42	34	34	27	41	33

Figure 30 : Intensité du rayonnement solaire sur les murs (m) et vitrages (v) W/m²

Tableau 3 : Détermination de l'heure de charge thermique du local

Face exposées		10 h	13h
Nord –Est	m	4 065,14	2 195,00
	v	868,14	468,00
Nord – Ouest	m	3 185,16	4 639,80
	v	475,02	692,64
Total		8 593,46	7 995,44

La charge thermique du local à 10h est de 8 593.46 W/m² et de 7 995.44 W/m² à 13h, ce qui prouve que le local reçoit plus de chaleur à 10h dans la journée d'où l'heure de charge maximale

est 10h. C'est pour cela que nous avons fait nos études en mars et relevé les données de des forages entre 10h et 11h.

4.1.2 Bilan des apports calorifiques

- **Apport de chaleur au travers des murs, vitrages et portes**

$$Q_{str} = U.S.\Delta\theta \text{ (Quantité de chaleur)}$$

$$Q_{SRm} = \alpha.F.S.Rm \text{ (Quantité de chaleur transmise par rayonnement)}$$

$$Q_{SRv} = \alpha.g.S.RV \text{ (Quantité de chaleur transmise par rayonnement)}$$

Tableau 4 : Détermination des quantités de chaleur

Parois	S	U	$\Delta\theta$	QStr (U.S. $\Delta\theta$)	α	F	Rm	QSRm ($\alpha.F.S.Rm$)	g	RV	QSRv ($\alpha.g.S.RV$)
Mur N-E	8,78	2,20	8	154,53	0,40	0,11	268	103,53			0,00
Vitre N-E	2,34	5,80	8	108,58	1,00	0,00		0,00	0,45	231	243,24
Porte N-E	1,68	3,18	8	42,74	0,70	0,16	268	50,11			0,00
Mur N-O	12,54	2,20	8	220,70	0,40	0,11	380	209,67			0,00
Vitre N-O	2,34	5,80	8	108,58	1,00	0,00		0,00	0,45	326	343,28
Mur S	12,80	2,20	5	140,80	0,00	0,00		0,00			0,00
Mur S-E	9,00	2,20	5	99,00	0,00	0,00		0,00			0,00
Porte S-E	5,88	3,18	5	93,49	0,00	0,16		0,00			0,00
Plancher	18,60	1,08	-5	-100,44	0,00	0,00		0,00			0,00
Plafond	18,60	1,14	20	424,08	0,40	0,06	686	290,92			0,00
Total				1 292,06				654,23			586,52

De ce tableau on a $Q_{str}=1\ 192.06W$; $Q_{SRm}=654.23\ W$ et $Q_{SRv}=586.52\ W$

- **Apport de chaleur par Renouvellement d'air**

$$Q_{inf} = Q_s + Q_l$$

- Gains sensibles par renouvellement d'air : $Q_{sr} = q * (\theta_e - \theta_i) * 0.33$

$$Q_{sr} = 59.52 * (33 - 25) * 0.33 = 157.13\ W$$

- Gains latents par renouvellement d'air : $Q_{lr} = q * (\omega_e - \omega_i) * 0.84$

$$Q_{lr} = 59.52 * (24.5 - 12) * 0.84 = 624.96\ W$$

$$Q_{inf} = Q_s + Q_l = 782.09\ W$$

- **Apport de chaleur par les personnes**

Cet apport est calculé en fonction de la température intérieure et du degré d'activités (nombre d'occupant). La salle étant un appartement et d'après le tableau 1.16 à 25 °C, on a : $C_{sen} = 67$ W et $C_{lat} = 49$ W avec $n = 2$ personnes.

$$Q_{per} = n * (C_{sen} + C_{lat}) * 0.9$$

$$Q_{per} = 2 * (49 + 67) * 0.9$$

$$Q_{per} = 208.8 \text{ W}$$

- **Apport de chaleur par l'éclairage**

$$Q_{ecl} = 1 * P$$

$$Q_{ecl} = 1 * 23$$

$$Q_{per} = 23 \text{ W}$$

- **Apport de chaleur par les équipements**

Le tableau 1.18 donne les apports de chaleur pour les machines et appareillages (Q_{equip})

$$Q_{equip} = n_{ord} * P$$

$$Q_{equip} = 1 * 150$$

$$Q_{equip} = 150 \text{ W}$$

- **Bilan thermique total Q_T**

La quantité de chaleur consommée au sein du local est exprimée par :

$$Q_T = Q_{str} + Q_{srm} + Q_{srv} + Q_{inf} + Q_{per} + Q_{ecl} + Q_{equip}$$

$$Q_T = 1\,292.06 + 654.23 + 586.52 + 782.09 + 208.8 + 23 + 150$$

$$Q_T = 3\,696.7 \text{ W}$$

4.2 Dimensionnement de l'échangeur air/sol

4.2.1 Caractéristiques de l'échangeur

❖ Détermination du débit massique du fluide

$$q_m = \frac{Q_T}{Cp * \Delta t}$$

$$q_m = \frac{3\,696.7}{1005 * (33 - 25)}$$

$$q_m = 0.459 \text{ kg/s}$$

❖ Détermination du débit volumique

$$q_v = \frac{q_m}{\rho}$$

$$q_v = \frac{0.459}{1.292} = 0.35$$

Avec $\rho=1.292 \text{ kg/m}^3$ la masse volumique de l'air.

Il s'agira de cinq réseaux de tuyaux dans le sol pour se conformer à la norme NF_ DTU 683 qui fixe la vitesse du découlement à au maximum 4 m/s donc $q_v = \frac{0.35}{5} = 0.07 \text{ m}^3/\text{s} = 252 \text{ m}^3/\text{h}$

❖ Calcul de la vitesse d'écoulement

$$V = \frac{4 * q_v}{\pi * d_1^2}$$

Pour un tuyau de diamètre extérieur 160mm et diamètre intérieur 153.8 mm.

$$V = \frac{4 * 0.07}{\pi * 0.1538 * 0.1538}$$

$$V = 3.77 \text{ m/s}$$

❖ Détermination de la longueur de tube

Calcul du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{V * d_1 * \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{3.77 * 0.1538 * 1.292}{0.000015}$$

$$Re = 49\,942.35$$

$$Pr = \frac{\mu \times Cp}{\lambda}$$

$$Pr = \frac{19.38 \times 10^{-6} \times 1005}{0.028}$$

$$Pr = 0.695$$

$$6000 < Re < 10^7 \text{ et } 0,5 < Pr < 120$$

On applique alors la corrélation empirique de Dittus-Boelter [13] :

$$Nu = 0.023 \times 49942.35^{0.8} \times 0.695^{0.3}$$

$$Nu = 118.33$$

On sait que $Q_T = K \cdot \Delta T$ avec $K = \frac{1}{R_{th}}$

$$R_{th} = R_{tube} + R_{conv}$$

$$R_{tube} = \frac{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}{2\pi \cdot \lambda_{tube} \cdot L}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot S}$$

$$\text{Or } S = 2\pi \cdot R1 \cdot L \text{ et } h = \frac{Nu \lambda_{air}}{d1}$$

$$\text{On a donc : } R_{conv} = \frac{1}{(Nu \cdot \lambda_{air} \cdot 2\pi \cdot R1 \cdot L) / d1}$$

Alors la relation devient :

$$R_{th} = \frac{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}{2\pi \cdot \lambda_{tube} \cdot L} + \frac{1}{(Nu \cdot \lambda_{air} \cdot 2\pi \cdot R1 \cdot L) / d1}$$

$$Q_T = K \cdot \Delta T$$

$$Q_T = \frac{\Delta T}{\frac{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}{2\pi \cdot \lambda_{tube} \cdot L} + \frac{1}{(Nu \cdot \lambda_{air} \cdot 2\pi \cdot R1 \cdot L) / d1}}$$

$$\frac{\Delta T}{Q_T} = \frac{1}{L} \left[\frac{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}{2\pi \cdot \lambda_{tube}} + \frac{1}{(Nu \cdot \lambda_{air} \cdot 2\pi \cdot R1)/d1} \right]$$

$$\frac{1}{L} = \frac{\Delta T}{Q_T \cdot \left[\frac{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}{2\pi \cdot \lambda_{tube}} + \frac{1}{(Nu \cdot \lambda_{air} \cdot 2\pi \cdot R1)/d1} \right]}$$

$$L = \frac{Q_T}{\Delta T} \left[\frac{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)}{2\pi \cdot \lambda_{tube}} + \frac{1}{Nu \cdot \lambda_{air} \cdot \pi} \right]$$

$$L = \frac{739.34}{5} \left[\frac{\ln\left(\frac{160}{153.8}\right)}{2\pi * 1.7} + \frac{1}{118.33 * 0.0262 * \pi} \right]$$

Les conductivités thermiques usuelles sont celles qui sont utilisées dans les calculs.

Avec $\lambda_{air} = 0.0262 \text{ W/mK}$ à 28°C

$\lambda_{tube} = 1.7 \text{ W/mK}$

$\Delta T = 33 - 28 = 5$

$$L = 15.73\text{m}$$

❖ Pertes de charge Linéaires

Les pertes de charges linéaires dans un réseau de canalisations selon la norme NF DTU 68.3 sont déterminées avec l'expression simplifiée de la formule Colebook.

$$JL = K * \frac{Q^{1.9}}{D^5} * L$$

Avec $K = 3.10^6$ pour les conduits lisses (tous les matériaux)

Q : le débit d'air en m^3/h (252 m^3/h) on choisit un extracteur de 430 m^3/h

D : le diamètre intérieur en mm (153.8 mm)

L : La longueur de la canalisation par réseau m (15.73 m)

$$JL = 3.10^6 \frac{252^{1.9}}{153.8^5} * 15.73$$

$$J_L = 20.03 \text{ Pa}$$

❖ Calcul de perte de charge singulière

Les pertes de charges singulières dans les canalisations selon la norme sont déterminées avec l'expression : NF DTU 68.3

$$J_S = \varepsilon * \frac{1}{2} \rho_{air} * V^2$$

Avec $\varepsilon = 1.22$ selon la norme NF DTU 68.3.

ρ_{air} : La masse volumique de l'air (1.292 kg/m³)

V : La vitesse de l'air en (3.77 m/s)

Nous avons prévu 4 coudes par réseau dans la conception (selon le plan adopté)

$$\text{Donc } J_S = 4 * 1.22 * \frac{1}{2} * 1.292 * 3.77^2$$

$$J_S = 44.80 \text{ Pa}$$

❖ Pression de sortie par réseau

$$P = J_L + J_S = 20.03 + 44.8$$

$$P = 64.83 \text{ Pa}$$

4.2.2 Choix des équipements et coût du projet

1- Caisson filtre

L'entrée de l'échangeur sera couverte par un caisson filtre contre les poussières et les insectes en acier galvanisé et un couvercle d'accès à fermeture rapide [14]. Elle est isolée en laine de verres afin de limiter les pertes thermiques avec un débit 300 m³/h de et 500 Pa.

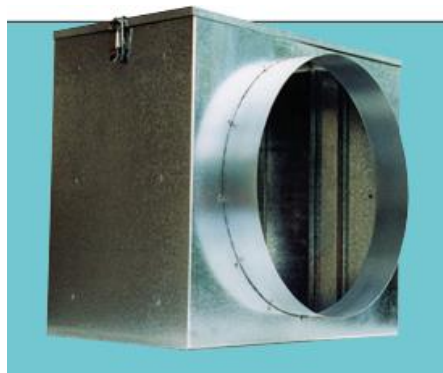


Figure 31 : Caisson de filtre

2- Extracteur

Nous avons choisi un extracteur model C0 VENT SYSTEME en tôle d'acier galvanisé avec des raccordements par viroles circulaires (*ventilateur centrifuge de gaine à flux d'air* de marque *France Air*) de débit $300 \text{ m}^3/\text{h}$, de pression 500 Pa et de puissance 65W avec les caractéristiques suivantes [15]:

- Tailles : C 100 à C 200 (aubes plastiques) et C 250 à C 315 (aubes aciers).
- Équilibrage dynamique
- Pilotage par signal 0 - 10 V ou PWM.
- Variation de vitesse soit par un potentiomètre intégré, soit par un signal externe 0 - 10 V.



Figure 32 : Image d'extracteur de marque C0 VENT SYSTEME

3- Tube PVC

Les tubes PVC-U de marque SOTICI et de diamètre 160 sont fiables et répondent aux exigences internationaux et sont adaptés pour la climatisation en géothermie [16]. Le tube PVC-U sera environ de 16 m par réseau, soit un total de 80 m et servira à acheminer l'air de l'extérieur vers l'intérieur du local à travers une canalisation de 5m de profondeur.



Figure 33 : Tubes PVC-U de marque SOTICI

4- Bouche de soufflage (Diffuseur)

La bouche de soufflage est rattachée à la fin de l'installation. Elle est chargée de la répartition des flux d'air climatisé dans le local. Le diffuseur choisi est circulaire et réglable en emballage individuel sous film plastique [17].



Figure 34 : Bouche de soufflage de marque France Air

- **Coût de l'échangeur**

Le refroidissement du bureau par l'échangeur air/sol fera intervenir les équipements (extracteur, caisson filtre, tubes PVC 315 mm, bouche de soufflage et accessoires) et un forage pour les conduits de l'air dans le sol.

Designation	Prix Unitaire	Quantité	Prix total
Forage	50 000	3	150 000
Extracteur 300 m ³ /h	250 000	5	1 250 000
Caisson filtre	35 250	5	176 250
Tubes PVC 160 mm	8000	80	640 000
Bouche de soufflage	22 300	5	111 500
Acessoires	72 500	1	72 500
Total			2 400 250

La réalisation de l'échangeur coûte **2 400 250 FCFA**. A ce coût il faudra ajouter le coût du système solaire capable d'alimenter les cinq extracteurs pendant 12h (4h le jour et 8h la nuit) de temps de fonctionnement.

- **Coût du dimensionnement solaire**

Désignation	Unité	Quantité	Prix Unitaire	Montant
Panneau solaire Polychristalin 150WC	U	4	75 000	300 000
Batteries solaire 12V-150 AH	U	2	160 000	320 000
Régulateur de charge 12V/70 A	U	1	90 000	90 000
fusible protection batterie 200A avec support	U	1	20 000	20 000
Disjoncteur de protection 5 A	U	1	10 000	10 000
Câble solaire 1x6 mm ²	MI	100	1 500	150 000
Matériels de fixation panneaux, support batteries et autres	Ens	1	30 000	30 000
Onduleur	U	1	450 000	450 000
Total				1 370 000

Le dimensionnement solaire équivalent au système vaut 1 370 000 FCFA.

Le coût total du projet est alors de **3 770 250 FCFA**

- **Comparaison du système proposé à un système de climatisation classique**

Pour le même local, la climatisation nécessitera un climatiseur de 18000 BTU

N°	Désignation	U	Qté	Prix Unitaire F CFA (Hors taxes)	Montant F CFA (Hors taxes)
1	Unité intérieur et extérieur DAIKIN 18000 BTU-5,5 KW INVERTER	U	1	1 260 176	1 260 176
2	Liaison frigorifique ¼	Rlx	1	22 000	22 000
3	Liaison frigorifique ½	Rlx	1	38 000	38 000
4	Armaflex diam int 1/4 ep 19	U	30	1 000	30 000

5	Armaflex diam int 1/2 epl9	U	30	1 200	36 000
6	Ecoulement Condensat	Ens	1	10 000	10 000
7	Liaison condenseur-Evapo	m	15	1500	22 500
8	Raccordement électrique	U	1	72 000	72 000
9	Ingénierie de pose et de raccordement	FF	1	150 000	150 000
10	Entretien	U	4	10 000	40 000
11	Consommation annuelle	U	1	788 400	788 400
Total					2 469 076

La climatisation du local de façon classique coûte 2 469 076 FCFA en un an y compris l'installation et la consommation d'électricité pendant 365 jours. Il faut alors déterminer la durée de retour sur investissement pour étudier la rentabilité du projet.

$$PRI = \frac{3\,770\,250}{2\,469\,076} = 1.52 \text{ an}$$

Après 1 an 6 mois, le local pourra continuer à profiter du rafraîchissement géothermique sans factures d'électricité annuelles, ce qui montre que notre échangeur fonctionnant grâce au solaire est une opportunité à saisir pour le rafraîchissement des locaux.

- **Synoptique du réseau de rafraîchissement du local**

Ce synoptique est constitué de tous les éléments qui rentrent dans la conception de l'échangeur air sol à savoir le caisson d'air neuf, les cinq tubes de conduites de l'air de l'extérieur vers le local immergés à 5 mètres du sol, les extracteurs et les bouches de soufflage.

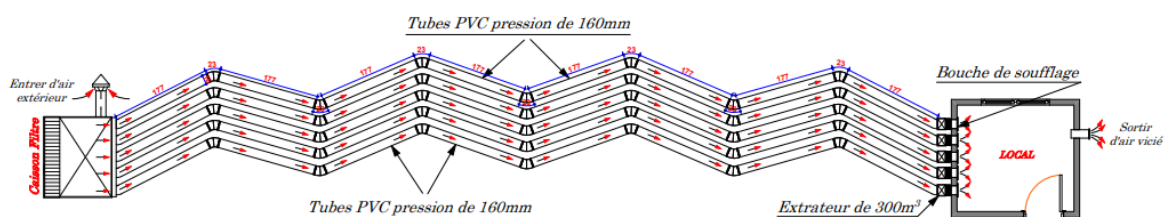


Figure 35 : Synoptique du réseau de rafraîchissement du local

- **Rendement de l'échangeur**

Pour caractériser les performances thermiques d'un échangeur, la démarche la plus naturelle est de comparer sa puissance thermique Φ avec le flux maximum Φ_{\max} précédemment défini. On appelle efficacité thermique E de l'échangeur le rapport Φ / Φ_{\max} , qui est évidemment sans dimension :

$$E = \frac{\Phi}{\Phi_{\max}} \text{ avec } 0 < E \leq 1$$

Dans notre cas d'étude, il ne s'agit pas de deux fluides échangeant de la chaleur au travers d'une paroi mais d'un seul fluide qui est l'air qui cède sa chaleur à la terre. L'efficacité est ainsi relative au fluide chaud qui est l'air extérieur et la chaleur de la terre et exprimé par :

$$E = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}}$$

D'après l'étude théorique on a :

$$T_{ce}=33 \text{ °C} ; T_{cs}=28.93 \text{ °C} ; T_{fe}=28 \text{ °C}$$

$$E = \frac{33 - 28.93}{33 - 28} = 0.814$$

Le rendement de l'échangeur est de 81.4%.

4.2.3 Analyse des résultats

L'objectif de l'étude étant de montrer que la ressource géothermique au Benin précisément à Hêvié peut servir à la climatisation des locaux, l'étude expérimentale du dispositif dimensionné doit correspondre aux résultats de l'étude théorique. Ainsi dans l'étude expérimentale, la température de l'air à la sortie de l'échangeur est supposée atteindre la température du sol c'est-à-dire **28 °C** sur une longueur de tuyauterie de **15.73 m**. Le modèle théorique obtenu fournit la température à la sortie de l'échangeur en fonction de la longueur de la tuyauterie selon les paramètres et les hypothèses de notre étude. Il nous a permis d'avoir l'allure de la courbe qui montre l'évolution de cette température de l'air en fonction de la longueur de tuyauterie de l'échangeur. En comparaison, pour la même longueur de tuyauterie qui est de **15.73 m** obtenue dans l'étude expérimentale, la température de l'air passe de **33 °C** à **28.93 °C** dans l'étude théorique, soit une erreur relative sur la température de **3.32%** comparativement à l'étude expérimentale. Ceci prouve l'efficacité de notre modèle théorique

avec un rendement du dispositif de **81.4%**. Les résultats expérimentaux se rapprochent des résultats théoriques et confirme ainsi que le rafraîchissement des locaux par la géothermie est une option envisageable. De plus avec une période de retour sur investissement PRI de 1 an 6 mois, cette méthode représente une opportunité en efficacité énergétique dans le bâtiment.

Conclusion

Au terme de notre étude expérimental, l'échangeur de chaleur air-sol placé à une profondeur de 5 m avec une pente de 2% sera constitué de cinq réseaux de tubes en PVC de longueur total de 80 m, de diamètre extérieur 160 mm. Le choix du tuyau PVC de marque SOTICI a été fait en tenant compte de plusieurs considérations qui sont le coût, l'étanchéité, la rigidité et la durabilité. Chaque sortie du tube sera reliée à un extracteur d'air. L'extracteur sera ensuite relié à la bouche de soufflage. Le projet coûte 3 770 250 FCFA avec un temps de retour sur investissement de 1 an 6 mois. L'échangeur air/sol permet d'amener la température de l'air qui est à l'extérieur qui est de 33 °C, à la température du sol estimée à 28 °C. L'étude confirme que pour une température de sol proche du confort thermique, la climatisation air/sol est une option avantageuse par rapport aux techniques de climatisation existantes surtout comparativement au coût.

CONCLUSION GENERALE

Face au réchauffement climatique grandissant, le confort thermique devient de plus en plus un problème majeur qui interpelle et il faudrait réfléchir pour faire appel à d'autres ressources et d'autres technologies. Dans ce travail, nous avons réalisé l'étude expérimentale et théorique du rafraîchissement par la géothermie en prenant comme cas d'étude un local d'un site à Hêvié au sud du Benin. Après avoir fait un état des lieux des recherches scientifiques menées par rapport à la question de la climatisation des locaux grâce à la géothermie, mesurer la ressource géothermique pour le cas pratique à Hêvié, nous avons comparé les résultats des études expérimentale et théorique grâce à un modèle théorique que nous avons simulé dans SCILAB.

Avec la mesure géothermique du cas pratique du local à Hêvié, nous avons la plus petite température observée à 5 m du sol qui est de l'ordre de 28°C ce qui engendre une température de ressenti de 22°C. Le modèle théorique développé nous a permis d'obtenir une expression de la température de l'air en fonction de la longueur de la tuyauterie de l'échangeur. La température de l'air au ressenti dans le local peut être réduit de 6°C soit de 28°C à 22°C grâce à la ventilation qu'offre un tel système. L'étude expérimentale a montré que l'échangeur de chaleur air-sol pour la climatisation du local choisi sera constitué d'un système de cinq réseaux de tube en PVC de longueur 15.73 chacun m de diamètre 160 mm placé à une profondeur de 5 m avec une pente de 2%. Ce qui nous a permis d'amener la température de l'air de 33°C à 28°C. Ainsi l'échangeur air/sol proposé coûte 3 770 250 avec un retour sur investissement de 1 an 6 mois. Ainsi, ces résultats confirment que la climatisation des locaux au Benin grâce à la chaleur du sol est une opportunité exploitable surtout au regard du coût de l'énergie électrique mis en jeu dans le confort thermique. Comme perspective, il serait souhaitable que l'étude par rapport à la mesure de la ressource géothermique soit réalisée dans tous les départements du Benin afin de mieux exploiter cette réserve qui permettra sans doute au Benin de combler ses déficits énergétiques.

REFERENCES

- [1] P. HOLLMULLER, Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments, Genève: Atelier de reproduction de la Section de Physique. Thèse N° 3357, 2002.
- [2] CDE, «connaissancedesenergies,» 21 Juin 2011. [En ligne]. Available: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/geothermie-haute-temperature>.
- [3] M. N., B. H., H. N., M. A. et Y. A. S., «Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Briska,» *Revue des Energie Renouvelables*, vol. Vol. 13 , n° % 1N°3 (2010) 399 - 406, 28 Septembre 2010.
- [4] M. Khabbaz, B. Benhamou, K. Limam, P. Hollmuller, H. Hamdi et A. Bennouna, «Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for air cooling in a residential building in hot semi-arid climate,» *Energy and Buildings*, vol. Volume 125, pp. Pages 109-121, 1 August 2016.
- [5] H. Su, X.-b. Liu, L. Ji et J.-Y. Mu, «A numerical model of a deeply buried air–earth–tunnel heat exchanger,» *Energy and Buildings*, pp. Volume 48, May 2012, Pages 233-239, 2012.
- [6] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agarwal et J. Mathur, «Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for winter heating,» *Energy and Buildings*, pp. Volume 41, Issue 11, Pages 1151-1154, November 2009.
- [7] T. S. Bisioniya, A. Kumar et P. Baredar, «Experimental and analytical studies of earth–air heat exchanger (EAHE) systems in India: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. Volume 19, pp. Pages 238-246, March 2013,.
- [8] M. Benhammou et B. Draoui, «Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. Volume 44, pp. 348-355, April 2015.
- [9] N. A. Elminshawy, F. R. Siddiqui, Q. U. Farooq et M. F. Addas, «Experimental investigation on the performance of earth-air pipe heat exchanger for different soil compaction levels,» *Applied Thermal Engineering*, pp. Volume 124, September 2017, Pages 1319-1327, Septembre 2017.

- [10] H. Chien-Yeh, C. Yuan-Ching, C. Zi-Jie et C. Sih-Li, «Investigation on performance of building-integrated earth-air heat exchanger,» *Energy and Buildings*, pp. Volume 169, 15 June 2018, Pages 444-452, 2018.
- [11] V. Bansal, R. Misra, G. Agrawal et J. Mathur, «Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for summer cooling,» *Energy and Buildings*, Vols. %1 sur %2Volume 42, Issue 5, pp. Pages 645-648, May 2010.
- [12] S. B. M. B. D.Belatrache, Numerical analysis of earth air heat exchangers at operating conditions in arid climates, vol. 42, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, pp. 8898-8904.
- [13] Laboratoire d’Essais et De Recherches en Génie Civil (LERGC S.A) , «RAPPORT D’INVESTIGATION GEOPHYSIQUES N°1GPH202011001/CSMC-CE/DG/LERGC/SA,» 2021.
- [14] Institut de la francophonie pour le développement durable (IFDD), Guide du bâtiment durable en régions tropicales Tome 1 : Stratégies de conception des nouveaux bâtiments en régions tropicales, Québec , Canada, 2011, p. 63.
- [15] S. Mergui, TRANSFERTS THERMIQUES, SORBONNE: SORBONNE UNIVERSITE.
- [16] France Air, Filtration Caisson C, Paris, 2023.
- [17] France Air, Ventilation CANAL AIR CECM, Paris, 2023.
- [18] SOTICI, Documentation techniques des tubes PVC Pression, Abidjan,
- [19] France Air, Erratum, Paris, février 2010.
- [20] B. Kaboré, W. Ouedraogo, S. Kam, M. Ousmane et D. Bathiébo, «Echangeur de chaleur air-sol à Ouagadougou: Revue de la littérature, étude analytique et expérimentation,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. Vol. 20 , n° %1N°3, pp. 363-375, 30 Septembre 2017.
- [21] ECOBATI, «ECOBATI,» [En ligne]. Available: <https://ecobati.com/fr/produits/isolation-thermique/lambda-materiaux>. [Accès le MARS 2024].

ANNEXES

Annexe 1 :

Tableau 5 : Les relevés de température en fonction des profondeurs dans les 3 milieux à 10h

Profondeur	Température milieu 1	Température milieu 2	Température milieu 3	Température moyenne
0m	31,8	32	33	32.26
1m	31,4	32	32	31.8
2m	31,1	31,4	31,8	31.43
3m	30,7	30,8	34,4	31.96
4m	28,9	28,9	29,1	26.96
5m	28,06	28,7	29,1	28.62
6m	31	31,1	31,1	31.06
7m	33,3	35,3	34,9	34.5
8m	31,5	31,6	31,6	32.76
9m	33,4	33,4	33,4	33.4
10m	32,1	32,2	32,3	32.2

Annexe 2 :

Tableau 6 : Les valeurs de la température en fonction du temps dans le milieu 1

Heure	T°C (0m)	T°C (1m)	T°C (2m)	T°C (3m)	T°C (4m)	T°C (5m)	T°C (6m)	T°C (7m)	T°C (8m)	T°C (9m)	T°C (10m)
7h	29,6	31,4	31,1	30,7	28,9	27,3	32,2	33,4	31,5	33,2	31
8h	29,6	31,5	31,1	30,7	28,9	27,3	32,2	33,4	31,5	33,2	31
9h	29,6	31,4	31,1	30,7	28,9	27,4	32,2	33,4	31,5	33,2	31
10h	30	31,4	31,1	30,7	28,9	28,06	31	33,3	31,5	33,4	32,1
11h	31,8	31,4	31,1	30,7	28,9	28,06	31	33,3	31,5	33,4	32,1
12h	31,8	31,4	31,2	30,7	28,9	28,06	31	33,3	31,5	33,4	32,1
13h	31,8	31,5	31,2	30,7	28,9	28,06	31	33,3	31,5	33,4	32,1
14h	31,8	31,5	31,1	30,7	28,9	28,06	31	33,3	31,5	33,4	32,1
15h	31,8	31,5	31,1	30,7	28,9	28,1	31	33,3	31,5	33,4	32,1
16h	30,2	31,5	31,1	30,7	28,9	28,1	31	33,6	31,5	33,4	32,2
17h	30,2	31,5	31,1	30,7	28,9	28,15	31	33,6	31,5	33,4	32,2
18h	28	31,5	31,2	30,7	28,9	28,1	31	33,6	31,5	33,4	32,2
19h	28	31,5	31,1	30,7	28,9	27,7	31	33,6	31,5	33,4	32,2
20h	28	31,5	31,1	30,7	28,9	27,6	31	33,6	31,5	33,4	32,2
21h	28	31,5	31,1	30,7	28,9	27,4	31	33,6	31,5	33,4	32,2

Annexe 3 :

Tableau 7 : Les valeurs de la température en fonction du temps dans le milieu 2

Heure	T°C (0m)	T°C (1m)	T°C (2m)	T°C (3m)	T°C (4m)	T°C (5m)	T°C (6m)	T°C (7m)	T°C (8m)	T°C (9m)	T°C (10m)
7h	31	32	31	30,6	28,9	28,5	31,1	35,2	31,6	33,5	32,1
8h	31	32	31	30,7	28,9	28,6	31,1	35,2	31,6	33,5	32,1
9h	31	32	31,3	30,8	28,9	28,6	31,1	35,2	31,6	33,5	32,1
10h	31	32	31,4	30,7	28,9	28,6	31,1	35,2	31,6	33,5	32,1
11h	31,4	32	31,4	30,7	28,9	28,6	31,1	35,3	31,6	33,4	32,2
12h	32	32	31,4	30,8	28,9	28,6	31,1	35,3	31,6	33,4	32,2
13h	32	32	31,4	30,9	28,9	28,6	31,1	35,3	31,6	33,4	32,2
14h	32	31,5	31,4	30,9	28,9	28,6	31,1	35,3	31,6	33,4	32,2
15h	32	31,7	31,4	30,7	28,9	28,6	31,1	35,3	31,6	33,4	32,2
16h	31,2	31,7	31,4	30,9	28,9	28,6	31,1	35,3	31,6	33,4	32,2
17h	31,2	31,7	31,4	30,7	28,9	28,6	31,1	35,3	31,6	33,4	32,2
18h	29	31,5	31,4	30,8	28,9	28,6	31,1	35,3	31,6	33,4	32,2
19h	29	31,5	31,4	30,8	28,9	28,6	31,1	35,3	31,6	33,4	32,2
20h	29	31,5	31,4	30,8	28,9	28,6	31,1	35,3	31,6	33,4	32,2
21h	29	31,5	31,4	30,8	28,9	28,6	31,1	35,3	31,6	33,4	32,2

Annexe 4 :

Tableau 8 : Les valeurs de la température en fonction du temps dans le milieu 3

Heure	T°C (0m)	T°C (1m)	T°C (2m)	T°C (3m)	T°C (4m)	T°C (5m)	T°C (6m)	T°C (7m)	T°C (8m)	T°C (9m)	T°C (10m)
7h	31	32	31,8	34,4	29,1	28,6	31,1	35,1	31,6	33,5	32,1
8h	31	32	31,8	34,4	29,1	28,6	31,1	35,1	31,6	33,5	32,1
9h	31	32	31,8	34,4	29,1	28,6	31,1	35,1	31,6	33,5	32,1
10h	32	32	31,8	34,4	29,1	29,1	31,1	35,1	31,6	33,5	32,1
11h	32	32	31,8	34,4	29,1	29,1	31,1	35,1	31,6	33,4	32,2
12h	33	32	31,8	34,4	29,1	29,2	31,1	34,9	31,6	33,4	32,3
13h	33	32	31,8	34,3	29,1	29,2	31,5	34,9	31,6	33,4	32,3
14h	33	31,5	31,8	34,3	29,1	29,2	31,5	34,9	31,6	33,4	32,2
15h	33	31,7	31,8	34,3	29,1	29,2	31,5	34,9	31,6	33,4	32,2
16h	32	31,7	31,7	34,3	29,1	29,5	31,5	34,9	31,6	33,4	32,2
17h	31,2	31,7	31,7	34,5	29,1	29,5	31,1	34,8	31,6	33,4	32,2
18h	29,6	31,5	31,7	34,5	29,1	29,5	31,1	34,8	31,6	33,4	32,2
19h	29,6	31,5	31,7	34,5	29,1	29,6	31,1	34,8	31,6	33,4	32,2
20h	29,6	31,5	31,7	34,5	29,1	29,6	31,1	34,8	31,6	33,4	32,2
21h	29,6	31,5	31,7	34,5	29,1	29,6	31,1	34,8	31,6	33,4	32,2

RESUME

Le présent mémoire traite de l'étude théorique et expérimentale du rafraîchissement par la géothermie en prenant comme cas d'étude, un local à Hêvié au sud du Bénin. Le constat fait est que dans le bâtiment au Bénin, le problème d'efficacité énergétique se pose davantage à cause d'une part de la recherche permanente du confort dans le bâtiment et d'autre part, du réchauffement climatique grandissante. Le portrait de la situation actuelle quant aux sources d'approvisionnement et de consommation d'énergie exige le choix des solutions durables et appropriées. L'objectif de notre étude est de faire l'étude théorique et expérimentale du rafraîchissement d'un local grâce aux échangeurs air-sol. Pour cela, nous avons dans un premier temps réalisé une mesure de la ressource géothermique du domaine choisi pour l'étude et dans un second temps réaliser l'étude théorique et expérimentale du dispositif. La mesure de la ressource géothermique a révélé que la plus petite température observée à 5 m dans le sol est de l'ordre de 28°C dans la zone considéré. L'étude théorique réalisée nous a permis d'avoir un modèle mathématique qui exprime la température de l'air à l'intérieur du local en fonction de la longueur de l'échangeur air-sol. L'étude expérimentale est venue confirmer les résultats de l'étude théorique à 96% avec un rendement de l'échangeur voisinant 81,4%, ce qui démontre que l'énergie géothermique du sous-sol est une opportunité en efficacité énergétique dans le bâtiment.

Mots Clés : Géothermie ; Rafraîchissement des bâtiments ; Modélisation ; Etude expérimentale ; Etude théorique

ABSTRACT

This thesis deals with the theoretical and experimental study of cooling by geothermal energy by taking as a case study, a room in Hêvié in the south of Benin. The observation made is that in the building industry in Benin, the problem of energy efficiency is more important because of the permanent search for comfort in the building on the one hand and the growing global warming on the other. The current picture of the current situation in terms of energy supply and consumption requires the choice of sustainable and appropriate solutions. The aim of our study is to carry out a theoretical and experimental study of space cooling using air-to-ground heat exchangers. To do this, we first carried out a measurement of the geothermal resource of the domain chosen for the study and then carried out the theoretical and experimental study of the device. The measurement of the geothermal resource revealed that the lowest temperature observed at 5 m from the ground is of the order of 28°C in the area under consideration. The theoretical study carried out allowed us to have a mathematical model that expresses the temperature of the air inside the room as a function of the length of the air-ground exchanger. The experimental study confirmed the results of the theoretical study at 96% with an efficiency of the exchanger of around 81.4%, which demonstrates that geothermal energy from the subsurface is an opportunity for energy efficiency in the building.

Keywords: Geothermal energy; Refreshment of buildings; Modeling; Experimental study; Theoretical study