



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN**

# MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

**MASTER EN PHYSIQUE**

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Par : Mlle DEHBI Ribab

Sur le thème

---

## **ETUDE DES PERFORMANCES DES SONDES GÉOTHERMIQUES COAXIALES ET EN U PAR LE LOGICIEL EWS**

---

Soutenu publiquement le 11 Juillet 2021 à Tlemcen devant le jury composé de :

Dr. BENDAHMANE Mohammed Fawzi	MCB	Université de Tlemcen	Président
Pr. MERAD Laarej	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrant
Pr. FRÖLÉN RIBEIRO Luis	Professeur	I.P de Bragance - Portugal	Co-Encadrant
Dr. BOUCHAOUR Mama	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice
Dr. BOUTASTA Amel	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice

*Année Universitaire : 2020 ~ 2021*

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué à l'Unité de recherche « *Matériaux et Energies Renouvelables* », URMER de la Faculté des Sciences de l'Université de Tlemcen. Il a été dirigé par **Dr. Laarej MERAD**.

Pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité, je tiens particulièrement à lui exprimer ici ma profonde et amicale reconnaissance. J'ai été très touchée par la confiance qu'il ma témoignée tout au long de mon travail.

Mes remerciements distingués vont à mon Co-encadreur **Pr. FRÖLÉN RIBEIRO Luis**, Professeur à Institut Polytechnique de Bragança (Portugal), pour sa disponibilité, et ses conseils précieux durant toute la période de réalisation de ce mémoire.

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à **Dr. Mohammed Fawzi BENDAHMANE** maitre de conférences (B) à l'université de Tlemcen d'avoir bien voulu présider le jury.

Je veille à ce que **Dr. Mama BOUCHAOUR**, Maitre de Conférence (B) à l'Université de Tlemcen, agrée ma haute considération pour avoir pris part au jury. Je la remercie vivement.

Au **Dr. Amel BOUTASTA**, Maitre de Conférences (B) à l'Université de Tlemcen, à que je suis entièrement redevable pour sa participation au jury, j'adresse mes sincères remerciements.

Au cours de ces années d'études, nombreuses ont été les personnes qui ont contribué à ce travail et je voudrais leur exprimer ici toute ma sympathie.

Je tiens à remercier sincèrement tous les membres de l'URMER pour leurs encouragements, sans oublier mes collègues des autres laboratoires de recherche.

Merci à tous...

Mlle Rihab DEHBI

## *Dédicaces*

**Je dédie ce travail à :**

Ma Mère, Mon Père,  
Mes Chers frères Rafik et Tamer,  
Mes Chères Sœurs Soumia, Chaima, Abir,  
Ainsi qu'à Tous ceux qui me sont chers.

## Liste des Figures

Figure (I.1) : Couverture des besoins énergétiques mondiaux en 2015 [11].....	19
Figure (I.2) : Sources d'énergies renouvelables [13]......	19
Figure (I.3) : Panneaux solaires thermiques[19].....	21
Figure (I.4) : Panneau solaire photovoltaïque[21]. .....	22
Figure (I.5) : Schéma d'une éolienne à axe horizontal[23].....	23
Figure (I.6) : Centrale hydraulique[27].....	24
Figure (I.7) : Différentes sources de biomasse[31]. .....	26
Figure (I.8) : Réservoir géothermique[33]. .....	27
Figure (I.9) : Évolution de la production d'énergie primaire (2009-2018)[35].....	29
Figure (I.10) : Tendence des émissions de CO <sub>2</sub> en Algérie de 2008 à 2018[38]. .....	28
Figure (I.11) : Distribution de l'irradiation solaire en Algérie[43].....	29
Figure (I.12) : Potentiel de vitesse du vent en Algérie[45].....	30
Figure (I.13) : L'emplacement des barrages et des rivières en Algérie pour la production d'hydroélectricité [38]. .....	30
Figure (I.14) : Localisation du potentiel géothermique en Algérie[49].....	31
Figure (I.15) : Les principaux usages de la géothermie en fonction de la température des couches géologiques[52]. .....	33
Figure (I.16) : Carte mondiale des ressources favorables de production l'énergie géothermique [54].....	33
Figure (I.17) : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur de sondes géothermiques [56].....	34
Figure (I.18) : Système (GSHP) en boucle ouverte (a, b, c) et fermé (d, e, f)[61]. .....	36
Figure (I.19) : Système d'énergie géothermique en boucle ouverte[62]. .....	37
Figure (I.20) : Systèmes (GSHP) en boucle fermée [64]. .....	38
Figure (I.21) : Différents systèmes de géothermie[68].....	41
Figure (II.1) : Zone de simulation et condition aux limites extérieures [7]. .....	47
Figure (II.2): Grille de simulation du forage [8].....	48
Figure (II.3) : convention de désignation (Huber&Pahud,1999) [10]. .....	49
Figure (II.4) : Démarrage du programme EWS. ....	53
Figure (II.5) : Interface du logiciel EWS. ....	53

Figure (II.6) : Interface de l'onglet « Sondes ».....	54
Figure (II.7) : Onglet « Sondes » avec les différentes configurations de sondes dans la partie 'g-function'.....	55
Figure (II.8) : « champ des sondes » dans le menu 'données'.....	55
Figure (II.9) : Onglet « champ de sondes » avec 15 sondes.....	56
Figure (II.10) : Onglet « Saumure ».....	56
Figure (II.11) : Onglet « Terrain ».....	57
Figure (II.12) : Onglet « Extraction ».....	58
Figure (II.13) : Onglet « Charge ».....	60
Figure (II.14) : L'onglet « Charge » avec l'entrée de l'énergie du chauffage. ....	60
Figure (III.1): Situation géographique de la wilaya de Tlemcen[11].....	67
Figure (III.2) : Variation du rayonnement horizontal, global, diffus.....	69
et plan incliné global à Tlemcen [12]. ....	69
Figure (III.3) : Variation des températures journalières (Max et Min) ambiantes et au sol du site de Tlemcen[18].....	71
Figure (III.4) : Variation journalière des Températures ambiantes Moyennes Diurnes (TMD) et Nocturnes (TMN) du site de Tlemcen[18].....	71
Figure (III.5) : Plan architectural de l'habitat. ....	73
Figure (III.6) : Implantation des sondes géothermiques verticales[20].....	79
Figure (III.7) : Schématisation de la section transversale du forage coaxial [21].....	79
Figure (III.8) : Schématisation de la section transversale du forage simple U [21]..	80
Figure (III.9) : Profil de charge thermique échangée avec le sol. ....	82
Figure (III.10) : Température d'entrée et de sortie du fluide caloporteur .....	82
Des forages coaxial et simple U. ....	82
Figure (III.11) : Comparaison entre la température moyenne du fluide caloporteur des forages coaxial et simple U ( $\lambda=2,75$ W/mK « calcaire »).....	84
Figure (III.12) : Comparaison entre la température moyenne du fluide caloporteur des forages coaxial et simple U ( $\lambda=0,8$ W/mK « gravier »).....	85
Figure (III.13) : Evolution de la température du sol des forages coaxial et simple U après 30 ans de l'utilisation pour chauffage et rafraichissement. ....	87
Figure (III.14) : Comparaison de l'influence thermique de deux types de conductivité thermique $\lambda$ [W/mK] du calcaire et du gravier sur le forage coaxial. ....	88

Figure (III.15) : Comparaison de l'influence thermique de deux types de conductivité thermique $\lambda$ [W/mK] du calcaire et du gravier sur le forage simple U.....	88
Figure (III.16) : Influence de la conductivité thermique du matériau de remplissage à la température moyenne du fluide caloporteur dans le forage coaxial.....	90
Figure (III.17) : Influence de la conductivité thermique du matériau de remplissage à la température moyenne du fluide caloporteur dans le forage simple U .....	90

### Liste des tableaux :

Tableau (III.1) : Echelle du confort thermique (ISO, 1994, ASHRAE-55,2010)[6]. .....	66
Tableau (III.2) : Données climatiques de la Wilaya de Tlemcen [10]. .....	68
Tableau (III.3) : Calcul du nombre de degrés jours mensuel (DJ) [18].....	72
Tableau (III.4) : Totale des déperditions d'énergie dans l'habitat.....	75
Tableau (III.5) : Propriétés des types de sol. ....	77
Tableau (III.6) : Caractéristiques du Fluide caloporteur. ....	77
Tableau (III.7) : Besoins Énergétiques de la maison étudiée. ....	78
Tableau (III.8) : Caractéristiques du forage coaxial. ....	80
Tableau (III-9) : Caractéristiques du forage simple U.....	80
Tableau (III.10) : L'énergie mensuelle extraite et injectée dans le sol. ....	81
Tableau (III.11) : Température moyenne mensuelle (à la fin du mois) du fluide caloporteur des forages coaxial et simple U ( $\lambda=2.75\text{W/mK}$ le calcaire). ....	83
Tableau (III.12) : Température moyenne mensuelle (à la fin du mois) du fluide caloporteur des forages coaxial et simple U avec une conductivité thermique du sol $\lambda= 0,8 \text{ W/mK}$ « gravier ».....	85
Tableau (III.13) : Résistance thermique de forage $R_b$ [mK/W].....	85
Tableau (III.14) : Comparaison de l'influence thermique des deux types de matériaux de remplissage sur le comportement thermique des deux forages, coaxial et simple U. ....	90

## **Nomenclature :**

$\alpha$  : Coefficient de transfert de chaleur du fluide de forage [W/m<sup>3</sup>K].

$\gamma$  : Constante d'Euler ( $\gamma= 0.5772$ ).

$\lambda$  : Conductivité thermique du sol [W/mK].

$a$  : Diffusivité thermique du sol [m<sup>2</sup>/s].

$B$  : Distance du forage [m].

$C$  : Capacité thermique du forage [J/K].

COP : Coefficient de Performance de la PAC.

$c_p$  : Capacité thermique spécifique [J/KgK].

$dl$  : Epaisseur de la couche de sol [m].

$D_f$  : Diamètre de forage [m].

$D_i$  : Diamètre intérieur du tube de forage [m].

$E_s$  : Le nombre d'Eskilson.

ECS : Eau chaude sanitaire.

EER (Energy Efficiency Ratio) : Le coefficient d'efficacité frigorifique.

EWS (ErdWärmeSonden) : Sondes géothermiques.

$f$  : Facteur de grille.

$G$  : Coefficient de déperdition thermique (W/m<sup>3</sup>K).

GES : Gaz à Effet de Serre.

GSHP (The Ground Source Heat Pump) : La Pompe à Chaleur Géothermique.

$H$  : Profondeur de forage [m].

$P$  : Perte thermique de L'habitat [W/°C]

PAC : Pompe A Chaleur Géothermique.

$\dot{q}$  : Taux d'extraction de Chaleur spécifique [W/m].

$\dot{q}_{Geo}$  : Flux géothermique [W/m].

$\Delta\dot{q}$  : Perte de charge thermique du fluide caloporteur [W/m].

$\rho$  : Masse volumique du fluide [Kg/m<sup>3</sup>].

$r_0$  : Rayon intérieur du tube de forage [m].

$r_1$  : Rayon de Forage [m].

$R_\alpha$  : Résistance du transfert thermique [mK/W].

$R_a$  : Résistance thermique interne du forage [mK/W].

$R_b$  : Résistance thermique du forage [mK/W].

$R_c$  : Résistance thermique de remplissage de forage [mK/W].

$R_g$  : Résistance thermique du sol [mK/W].

$t_s$  : Constante de temp d'Eskilson [s].

$T_0$  : Température moyenne mensuelle de l'air extérieur [K].

$T_c$  : Température de Confort [K].

$\Delta T_{\text{Sol}}$  : Température de sol par rapport à l'état non affectée [K].

$\Delta T_{\text{Grad}}$  : Gradient de température du sol [K].

$T_f$  : Température moyenne de forage [K].

$T_F$  : Température moyenne fluide [K].

$T_m$  : Température moyenne du sol [K].

## SOMMAIRE

<b>Introduction Générale .....</b>	<b>13</b>
<b>Chapitre I: Généralités sur les sources d'énergies et l'énergie géothermie</b>	
<b>I. INTRODUCTION .....</b>	<b>16</b>
<b>II. ENERGIES NON RENOUVELABLES.....</b>	<b>16</b>
II.1. Energies fossiles .....	17
<b>II.1.1. Charbon.....</b>	<b>17</b>
<b>II.1.2. Pétrole .....</b>	<b>17</b>
<b>II.1.3. Gaz Naturel .....</b>	<b>18</b>
II.2. Energie nucléaire.....	18
<b>III. Energies renouvelables .....</b>	<b>19</b>
III.1. Différentes sources d'énergie renouvelables .....	20
III.1.1. Énergie Solaire .....	20
<b>III.1.1.1. Énergie solaire thermique .....</b>	<b>21</b>
<b>III.1.1.2. Énergie photovoltaïque :.....</b>	<b>21</b>
III.1.2. Énergie éolienne .....	22
III.1.3. Énergie Hydraulique.....	24
III.1.4. Biomasse.....	25
III.1.5. Énergie géothermique .....	26
<b>IV. Profil énergétique en Algérie.....</b>	<b>27</b>
<b>V. ÉMISSION DES GAZ A EFFET DE SERRE .....</b>	<b>27</b>
<b>VI. DEVELOPPEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES EN ALGERIE.....</b>	<b>28</b>
<b>VII. ÉNERGIE GEOTHERMIQUE .....</b>	<b>32</b>
VII.1. Historique.....	32
VII.2. Ressources mondiales de la géothermie.....	33
VII.3. Principe de la géothermie .....	34
<b>VII.3.1. Système d'échange d'énergie dans le sous-sol .....</b>	<b>34</b>
<b>VII.3.2. Pompe à Chaleur (PAC).....</b>	<b>34</b>

<b>VII.3.3. Distribution dans le bâtiment .....</b>	<b>36</b>
<b>VIII. Technologies de la pompe à chaleur géothermique GSHP (the Ground Source Heat Pump).....</b>	<b>36</b>
VIII.1. CARACTERISTIQUES DE LA POMPE A CHALEUR GEOTHERMIQUE (GSHP) .....	39
VIII.2. Différents types de géothermie .....	40
<b>VIII.2.1. Géothermie très basse énergie.....</b>	<b>40</b>
<b>VIII.2.2. Géothermie profonde de basse énergie .....</b>	<b>40</b>
<b>VIII.2.3. Géothermie haute énergie (productrice d'électricité) .....</b>	<b>40</b>
<b>CONCLUSION :.....</b>	<b>41</b>
<b>Chapitre II : PRESENTATION DU LOGICIEL EWS</b>	
<b>I. INTRODUCTION :.....</b>	<b>46</b>
<b>II. BASES PHYSIQUES DU LOGICIEL EWS :.....</b>	<b>47</b>
II.1 ZONE DE SIMULATION : .....	47
II.2 METHODE « CRANK-NICHOLSON » POUR SIMULER LE VOISINAGE DE LA SONDE :.....	47
II.3. EQUATION DE CHALEUR ET REPOSE THERMIQUE g : .....	50
<b>II.3.1. EQUATION DE CHALEUR : .....</b>	<b>50</b>
<b>II.3.2. REPOSE THERMIQUE SANS DIMENSION g :.....</b>	<b>51</b>
II.4 TEMPERATURE DE FORAGE ET LA TEMPERATURE DE FLUIDE :.....	51
<b>II.4.1. TEMPERATURE DU FORAGE :.....</b>	<b>51</b>
<b>II.4.2 TEMPERATURE DU FLUIDE :.....</b>	<b>52</b>
II.5 Résistances thermiques $R_a$ et $R_b$ de Forage : .....	52
<b>III-PRESENTATION DU LOGICIEL EWS :.....</b>	<b>53</b>
III.1 Onglet « Sondes » : .....	54
III.2 : Onglet « Saumure » : .....	56
III.3 : Onglet « Terrain » : .....	57
III.4. Onglet « Extraction » :.....	58
III.5. Onglet « Charge » :.....	59
<b>IV. RESULTATS DE LA SIMULATION : .....</b>	<b>61</b>
<b>CONCLUSION :.....</b>	<b>61</b>
<b>Chapitre III : RESULTATS ET DISCUSIONS</b>	
<b>I. NTRODUCTION.....</b>	<b>65</b>

<b>II. CONFORT THERMIQUE.....</b>	<b>65</b>
<b>III. PARAMETRES INFLUENÇANT LE CONFORT THERMIQUE .....</b>	<b>67</b>
III.1. Caractéristiques géographiques .....	67
III.2. Radiations solaires.....	68
III.3 Humidité relative .....	69
III.4. Vitesse de l'air .....	70
III.5. Température de l'air .....	70
<b>IV. BESOINS ENERGETIQUES.....</b>	<b>70</b>
IV.1. Nombre de degré jours pour le chauffage et/ou le refroidissement .....	70
<b>V. Description de l'habitat étudié :.....</b>	<b>73</b>
<b>VI. CARTE DES SOLS D'ALGERIE .....</b>	<b>76</b>
<b>VII. Modélisation et simulation des sondes géothermiques coaxiale et simple U.....</b>	<b>77</b>
VII.1. Fluide Caloporteur .....	77
VII.2. Besoins énergétiques mensuelles de l'habitat étudié.....	78
VII.3. Implantation des sondes sur le terrain .....	78
VII.4. Caractéristiques de l'échangeur de chaleur coaxial.....	79
VII.5. Caractéristiques de l'échangeur de chaleur simple U.....	80
VII.6. Influence de la conductivité thermique du sol sur le comportement thermique des échangeurs de chaleur coaxial et simple U .....	88
VII.7. Influence du matériau de remplissage sur le comportement thermique des échangeurs de chaleurs coaxial et tube en U.....	89
<b>VIII. CONCLUSION .....</b>	<b>91</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>96</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>98</b>

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction Générale

Avec l'augmentation continue de la population dans le monde au 21<sup>e</sup> siècle, les activités humaines ont augmenté de façon très spectaculaire, et donc la consommation d'énergie a augmenté. La grande partie de cette énergie est produite en brûlant les combustibles fossiles (le pétrole, le gaz, le charbon), elle représente 86% de la production mondiale d'énergie. En Algérie, les combustibles fossiles répondent à 99% de la demande énergétique nationale. Cependant, les problèmes inhérents à l'utilisation des combustibles fossiles, tels que leurs disponibilités en quantité limitée et leurs effets nuisibles sur le plan environnemental (les émissions des gaz à effet de serre, l'empreinte carbone, l'appauvrissement de la couche d'ozone...) et politique, ont mené l'humanité à chercher des ressources d'énergie autres les hydrocarbures « les énergies renouvelables » y compris, l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie.

A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à source illimitée. Le type d'énergie renouvelable faisant l'objet du présent travail est l'énergie géothermique.

L'énergie géothermique est l'énergie thermique stockée dans le sous-sol, y compris tout fluide continu qui est disponible pour l'extraction et la conversion en produits énergétiques. Cette énergie est devenue une alternative tangible pour le chauffage des bâtiments institutionnels, commerciaux et industriels, surtout en climat tempéré où les besoins en chauffage et climatisation sont importants.

La chaleur géothermique produite dans le monde présente 164.6TWh avec une capacité de 70.9GW. La géothermie s'est alors retrouvée sur le devant de la scène car elle est depuis toujours par excellence une option du développement durable.

Plusieurs technologies existent pour assurer l'échange de chaleur entre le locale et le sous-sol, par exemple, de la pompe à chaleur géothermique (GSHP) cette technologie est utilisée pour des profondeurs de sous-sol inférieure à 30m (la température est d'environ 12 à 15°C) ce qui est suffisant pour pouvoir chauffer une maison individuelle, dont, le rôle majeur de la (GSHP) est d'élevé la température du fluide caloporteur capté à partir du sous-sol deux ou trois fois pour atteindre les besoins énergétiques de chauffage et de refroidissement de l'habitat, ce concept de captation par la (GSHP) permet d'économiser jusqu'à 70% d'énergie par rapport aux installations électriques traditionnelles.

L'objectif de cette étude est d'analysé le comportement thermique des échangeurs de chaleur de forage coaxial et simple U par le logiciel EWS pour le chauffage et le refroidissement d'une maison individuelle par une pompe à chaleur géométrique.

La présentation de ce travail est scindée en trois chapitres qui se présentent comme suit :

Le premier chapitre présente des généralités sur les sources d'énergies, y compris les énergies fossiles et les énergies renouvelables, nous avons également tenu à présenter la situation énergétique en Algérie, ensuite, nous avons montré le principe et les différentes technologies de la géothermie.

Dans le deuxième chapitre, le logiciel EWS et son utilisation pour la simulation et l'optimisation du comportement thermique des échangeurs de chaleur de forage est présenté.

Le troisième et le dernier chapitre dédié à la simulation numérique sur le comportement thermique des échangeurs de chaleur coaxial et simple U par le logiciel EWS.

La conclusion et les perspectives sont présentées à la fin du manuscrit.

**Références:**

- [1] Hopenergie, Quelle différence entre énergie renouvelable et non renouvelable, Site Internet. Consulté le 12 juin 2021.
- [2] Souhila CHERFI. L'avenir énergétique de l'Algérie : quelles seront les perspectives de consommation, de production et d'exportation du pétrole et du gaz à l'horizon 2020-2030. PDF, 2011.
- [3] Aubonne, DOSSIER, EnergieÔ Vinzel, un projet de géothermie de moyenne profondeur sur la côte lémanique, le 20 mai 2015.
- [4] Planète Énergies. Qu'est-ce que la géothermie. Site Internet, 27 Août 2014.

**Chapitre I : Généralités sur les différentes  
Sources d'énergies et l'énergie  
géothermique**

## **I. INTRODUCTION**

Il y'a environ 300 millions d'années les arbres et les végétaux ont été enfouis et ont subi une transformation appelée 'fossilisation'. Cela a donné les énergies fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz. Les énergies fossiles sont en quantité limitée et mettent un temp énorme à se former. On dit donc qu'elles ne sont pas renouvelables, par exemple, il faut plus de dix milles années pour du pétrole forme. Depuis leurs utilisations par l'humain, les réservoirs s'épuisent rapidement car les énergies fossiles représentent 86% de la consommation mondiale d'énergie. De plus, leur combustion est responsable de la production de CO<sub>2</sub> ; gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique. C'est la raison pour laquelle l'homme tente de se tourner vers des énergies dites renouvelables, c'est-à-dire inépuisables et peu polluantes. L'énergie renouvelable est l'énergie fournie par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées, ou encore la croissance des matières organiques.

Les avantages des énergies renouvelables sont nombreux :

- Elles sont inépuisables sur l'échelle du temps humain.
- Elles sont plus écologiques que les énergies non renouvelables.
- Elles engendrent peu ou pas des déchets ou d'émissions polluantes.
- Elles participent à la lutte contre le changement climatique.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les sources d'énergie (non renouvelables et renouvelable), ensuite, nous présentons un aperçu sur la situation énergétique dans l'Algérie. Enfin, nous présenterons le principe et les différentes technologies de la géothermie.

## **II. ENERGIES NON RENOUVELABLES**

Les énergies non renouvelables présentent 86% de la production mondiale d'énergie. On appelle énergie non renouvelable toute énergie présente sur la terre en quantité limitée et dont le stock décroît à mesure que l'homme l'utilise[2].

Il existe deux types de sources d'énergie non renouvelable (ou épuisables) :

## **II.1. Energies fossiles**

Les combustibles fossiles se sont formés à partir de matière organique. Cette matière a été soumise à des températures et des pressions élevées pendant des millions d'années avant de se transformer en l'une des formes suivantes :

### **II.1.1. Charbon**

Le charbon représente 24% de la demande mondiale d'énergie primaire. Cette énergie est massivement employée depuis la révolution industrielle[3]. Le charbon est un combustible fossile d'origine organique. Il est le résultat de la transformation de biomasse (résidus de forêts notamment) enfouie dans le sol au cours des temps géologiques. Par enfouissement, sous l'effet des pressions et des températures croissantes avec la profondeur (gravité, gradient thermique), les végétaux ensevelis sont en effet décomposés puis transformés en une matière solide et combustible à haute teneur en charbon [4].

Le charbon représente une source d'énergie particulièrement bon marché, accessible à un prix très avantageux. Aussi, sa demande est en augmentation. D'après les études réalisées, les réserves de charbon estimées permettraient de répondre aux besoins pendant encore 150 ans [5]. Toutefois, le charbon est une source de pollution non négligeable et sa combustion entraîne des rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère [5].

### **II.1.2. Pétrole**

Le pétrole représente 36% de la demande mondiale d'énergie primaire. On l'emploie principalement comme matière première (fabrication des plastiques...), et pour la production des carburants.

Le 20<sup>e</sup> siècle a été l'âge d'or du pétrole. Il a entraîné un développement important et rapide du transport de marchandises, des Personnes, par route par mer et par air. La production mondiale de pétrole s'établit à 95,62 millions de barils par jour soit presque 1107 barils par seconde. En 2014 les États-Unis sont devenus les premiers producteurs mondiaux grâce au pétrole de schiste. Le diesel, le kérosène, l'essence et même le gaz du pétrole liquéfié sont extraits de cet hydrocarbure.

La combustion du pétrole a un impact dangereux sur l'environnement à cause de la diffusion élevée du CO<sub>2</sub> et des particules polluantes dans l'atmosphère [6].

### **II.1.3. Gaz Naturel**

Le gaz naturel, représente 21% de la demande mondiale d'énergie primaire. Comme tous les hydrocarbures, le gaz naturel est composé d'atome de carbone (C) et d'hydrogène (H), mais à température et pression normale, les composés de ces atomes se présentent sous forme gazeuse. Il s'agit principalement de méthane (CH<sub>4</sub>) de propane (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), de butane (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), d'éthane (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) et de pentane (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>). La proportion de ces différents types de gaz varie d'un gisement à un autre, mais le méthane (CH<sub>4</sub>) est toujours dominant, soit de 70 à 98% du poids moléculaire [7].

Le gaz naturel est l'énergie jumelle du pétrole, lorsqu'il est consommé, il émet 25% moins de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) que le pétrole, le charbon avec respectivement 55,75 et 100 kg de CO<sub>2</sub> émis par gigajoule de chaleur produite. Le gaz naturel est utilisé dans plusieurs domaines tels que le chauffage et la cuisine, les centrales électriques l'industrie (dont la pétrochimie) ou le transport [8, 9].

### **II.2. Energie nucléaire**

L'énergie nucléaire représente 5% (Figure I.1) de la demande mondiale d'énergie primaire [10]. C'est l'énergie qui est obtenue à partir du noyau de certains atomes. Il existe différents moyens de libérer cette énergie :

- La fission,
- La fusion du noyau
- La radioactivité.

L'énergie nucléaire dépend d'un combustible fissile (l'Uranium), il permet de produire de l'électricité au sein des centrales nucléaires. En effet, la chaleur dégagée par la fission des atomes d'uranium transforme l'eau en vapeur. Celle-ci est utilisée pour mettre en mouvement des turbines, elles-mêmes reliées à des alternateurs qui produisent ainsi l'électricité.

L'énergie nucléaire est principalement utilisée pour produire de l'électricité, mais elle peut également être utilisée dans les secteurs sanitaires, militaires, environnementaux... [10]

Dans le monde il existe aujourd'hui plus de 440 réacteurs nucléaires leur puissance totale est de 390220MW[10]. L'énergie nucléaire ne produit pas de gaz à effet de serre contrairement au pétrole, au gaz et au charbon.

Elle pose cependant le problème du devenir des déchets nucléaires (rejets radioactifs, rejets thermiques, rejets chimiques) extrêmement difficile à traiter.

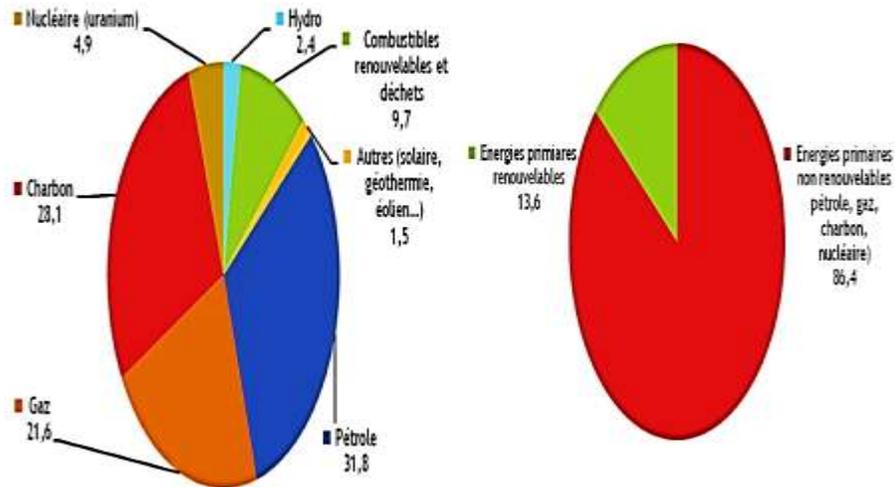


Figure (I.1) : Couverture des besoins énergétiques mondiaux en 2015 [11].

### III. Energies renouvelables

Les énergies renouvelables (Figure I.2) sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain[12].

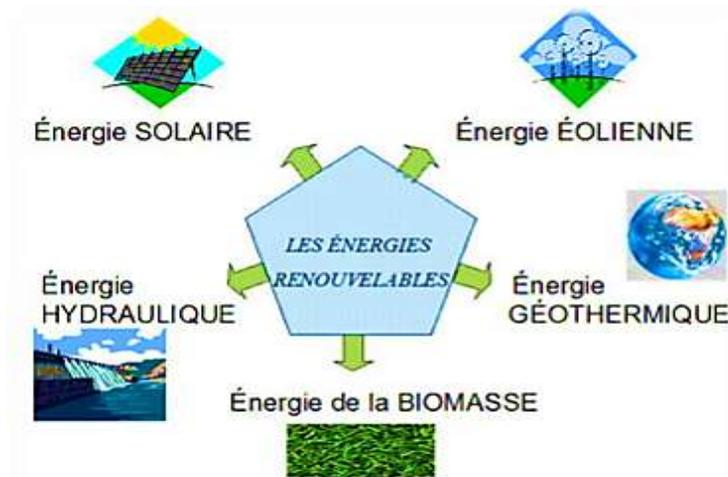


Figure (I.2) : Sources d'énergies renouvelables [13].

Le soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables. Son rayonnement est le vecteur de transport de l'énergie utilisable (directement ou indirectement) lors de la photosynthèse, ou lors du cycle de l'eau (l'hydroélectricité), l'énergie des vagues (énergie houlomotrice), la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans (énergie thermique des mers) ou encore la diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau de mer (énergie osmotique). Cette énergie solaire alliée à la rotation de la terre est à l'origine des vents (énergie éolienne) et les courants marins (énergie hydrolienne).

L'énergie solaire comme la chaleur interne de la Terre proviennent de réactions nucléaires (fusion nucléaire dans le cas du soleil, fission nucléaire dans celui de la chaleur interne de la Terre). Seule l'énergie marémotrice ne découle pas de l'activité nucléaire mais de la gravitation (couple Terre-Lune)[15, 16].

La chaleur interne de la terre (géothermie) est assimilée à une forme d'énergie renouvelable, et le système Terre-Lune engendre les marées des océans et des mers permettant la mise en valeur de l'énergie marémotrice[14].

### **III.1. Différentes sources d'énergie renouvelable**

#### **III.1.1. Énergie Solaire**

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel se trouvent notamment les rayons cosmiques, (gamma), X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radio en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnement électromagnétique véhiculent l'énergie. Le niveau d'irradiance (le flux énergétique) mesuré à la surface de la terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire.

Deux grandes familles d'utilisation de l'énergie solaire à cycle court se distinguent [17]:

- L'énergie solaire thermique : Utilisation de la chaleur transmise par le rayonnement solaire.
- L'énergie photovoltaïque : Utilisation du rayonnement lui-même pour produire de l'électricité.

### III.1.1.1. Énergie solaire thermique

Le soleil émet principalement dans le rayonnement visible, entre 0,4 et 0,8  $\mu\text{m}$ . En entrant en contact avec un corps, le rayonnement solaire augmente la température de ce corps. On parle ici d'énergie solaire thermique (Figure I.3).

Cette source d'énergie est connue depuis très longtemps et utilisée par exemple pour chauffer ou sécher les objets (y compris le corps humain) [18].

L'énergie thermique peut être utilisée directement ou indirectement :

- Directement pour chauffer des locaux ou de l'eau sanitaire (serres, architectures bioclimatique, panneaux solaires chauffants et chauffe-eau solaire) ou des aliments (fours solaire),
- Indirectement pour la production de vapeur d'un fluide caloporteur pour entrainer des turbines et ainsi obtenir une énergie électrique (énergie solaire thermodynamique)[17].



Figure (I.3) : Panneaux solaires thermiques[19].

### III.1.1.2. Énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques (à base semi-conducteurs). Ces derniers sont des composantes électroniques qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module solaire photovoltaïque (Figure I.4) ou un panneau photovoltaïque[20].

Il existe plusieurs technologies des modules solaires photovoltaïques, parmi ces modèles on trouve [20] :

- Les modules solaires monocristallin qui possèdent le meilleur rendement au  $m^2$  et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints et pour optimiser la production d'une centrale photovoltaïque.
- Les modules solaires polycristallins qui représentent une technologie proposent des rendements plus faibles que la technologie monocristalline.
- Les modules solaires amorphes qui sont des panneaux solaires proposant un rendement largement inférieur aux modules solaires cristallins. Cette solution nécessite donc une plus grande surface pour la même puissance installée.

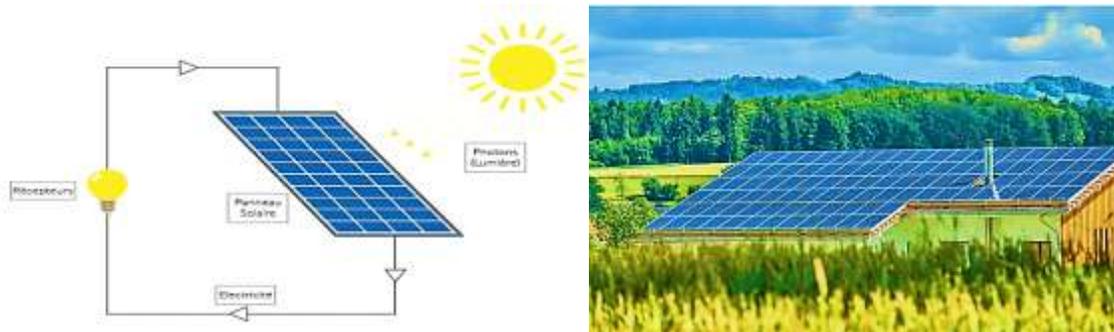


Figure (I.4) : Panneau solaire photovoltaïque[21].

### III.1.2. Énergie éolienne

L'énergie éolienne est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Le vent est provénu d'un réchauffement inégale à la surface de la terre qui crée des zones des températures et des pressions différentes (les anticyclones et les dépressions), plus les dépressions sont importantes plus le vent est fort.

Il existe plusieurs types d'éoliennes. Elles sont regroupées en deux catégories[22] :

- EAV : Eolienne à Axe Vertical (Type Savonius et Type Darrieus).
- EAH : Eolienne à Axe Horizontal (Amont, Aval) (Figure I.5).

Dans tous les cas, les éoliennes captent l'énergie du vent et la transforment soit en énergie électrique (aérogénérateurs) ou en énergie mécanique (éolienne de pompage, de sciage, etc.).

Soit en mer ou sur terre une éolienne s'inspire du moulin à vent avec des pales portés par un rotor produisent de l'électricité lorsque le vent souffle à plus de 15Km/h, le rotor et la nacelle sont sur un mât qui peut mesurer plus de 130m, plus l'éolienne montant haut plus le vent est stable et plus elle en capte, les éolienne sont placées dans des zones ou le vent est suffisant et régulier. Une éolienne est donc ; un mât ; un rotor ; et une nacelle. On retrouve des appareils tels qu'un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent et stopper le rotor si le vent dépasse 100Km/h. On trouve aussi des capteurs qui indiquent la direction du vent. Les pales peuvent pivoter pour capter un maximum d'énergie, la nacelle abrite toutes les composantes nécessaires pour la production d'électricité.

Le mouvement du rotor fait tourner un axe qui fait à son tour tourner un alternateur. Dans l'alternateur l'interaction entre les électroaimants du rotor (Parties mobiles) et les bobines de fils de cuivre du stator (Parties fixes) produit un courant électrique. Enfin un transformateur basé en bas du mât élève la tension à 20000 volts pour l'envoyer ensuite sur le réseau.

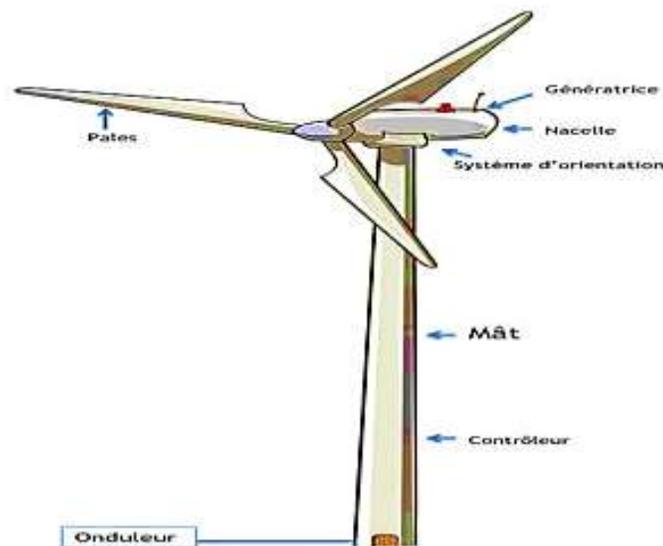


Figure (I.5) : Schéma d'une éolienne à axe horizontal[23].

### III.1.3. Énergie Hydraulique

A l'instar de l'énergie éolienne, les énergies hydrauliques (à l'exception de l'énergie marémotrice) ont leur origine principale dans les phénomènes météorologiques et donc l'énergie solaire. Le soleil provoque l'évaporation de l'eau, principalement dans les océans et en libère une partie sur les continents à des altitudes variables. On parle du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements. L'eau (en fait, la vapeur d'eau) possède, en altitude, une énergie potentielle de pesanteur. Cette énergie peut être captée et transformée dans des barrages hydroélectriques, lors du retour de l'eau vers les océans. Avant l'avènement de l'électricité, les moulins à eau permettaient de capter cette énergie mécanique pour entraîner des machines ou des outils (machine à tisser, moulins à moudre le blé...). Depuis l'invention de l'électricité cette énergie mécanique est transformée en énergie électrique ; l'hydroélectricité (Figure I.6) est après la biomasse la deuxième énergie renouvelable[24].

Selon l'Agence internationale de l'énergie, elle fournit 2,3% de l'énergie primaire produite dans le monde en 2011, sur un totale de 13,3% d'énergie renouvelables[25]. D'autre énergies hydrauliques existent et proviennent généralement de sources marines [26].



Figure (I.6) : Centrale hydraulique[27].

**Énergie des vagues :** Elle est produite par le mouvement des vagues et peut être captée par des dispositifs tels le Pélamis, sorte de ver en métal articulé ou le Searev. Leur puissance correspond à celle d'une petite éolienne.

**Énergie marémotrice :** Elle est produite par le mouvement de l'eau créé par les marées (variations du niveau de la mer, courants de marée).

**Énergie hydrolienne :** Elle est issue de l'utilisation des courants sous-marins.

**Énergie thermique des mers :** Elle est produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans.

**Énergie osmotique :** Elle a pour origine la diffusion ionique qui a lieu lors de l'arrivée et du mélange d'eau douce dans l'eau salée de la mer. L'idée remonte aux années 1970, elle consiste à tirer parti du phénomène d'osmose qui se produit lors du mélange d'eau de mer et d'eau douce (grâce à leur salinité différente). D'après la société Statkraft, le potentiel technique mondial de l'énergie osmotique serait de 1600 TWh par an, soit 50% de la production électrique de l'Union Européenne [26].

#### **III.1.4. Biomasse**

Cette énergie est exploitée par combustion ou métabolisation, elle est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites ; cette condition n'est pas toujours remplie. On peut citer notamment le bois et les biocarburants. Jusqu'au XVIIIe siècle, la biomasse était la principale ressource énergétique utilisée par l'humanité, en particulier sous forme de bois ; c'est encore aujourd'hui, et de loin, la principale énergie renouvelable.

Selon l'Agence internationale de l'énergie, la biomasse et les déchets fournissent 10% de l'énergie primaire produite dans le monde, sur 13,3% d'énergie renouvelable. Mais cette ressource produit de nombreux polluants et a l'inconvénient majeur d'exiger des surfaces considérables pour sa production, et surtout, sa production sous forme d'agrocarburant entre en conflit avec la production vivrière ; l'utilisation énergétique de la biomasse restera donc toujours limitée par ces multiples contraintes [28, 29].

Le fonctionnement d'une centrale biomasse (Figure I.7) est effectuée par [30] :

**La combustion :** La biomasse brûle dans une chambre de combustion en dégageant de la chaleur.

**La production de vapeur :** La chaleur transforme l'eau de la chaudière en vapeur.

**La production d'électricité :** La vapeur fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur. L'alternateur produit de l'électricité transportée dans des lignes de réseau.

**La production de chauffage :** A la sortie de la turbine, une partie de la vapeur est utilisée pour le chauffage grâce à un co-générateur.

**Le recyclage :** Le reste de la vapeur est transformé en eau grâce à un condenseur.



Figure (I.7) : Différents sources de la biomasse[31].

### III.1.5. Énergie géothermique

La géothermie, du grec géo (« la terre ») et thermos (« la chaleur »), désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à les exploiter (Figure I.8). Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la terre qui est convertie en chaleur[32]. La géothermie est utilisée depuis l'antiquité. Ce type d'énergie consiste à capter les calories du sous-sol par des sondes géothermiques constituées d'un circuit fermé dans lequel circule un fluide caloporteur.

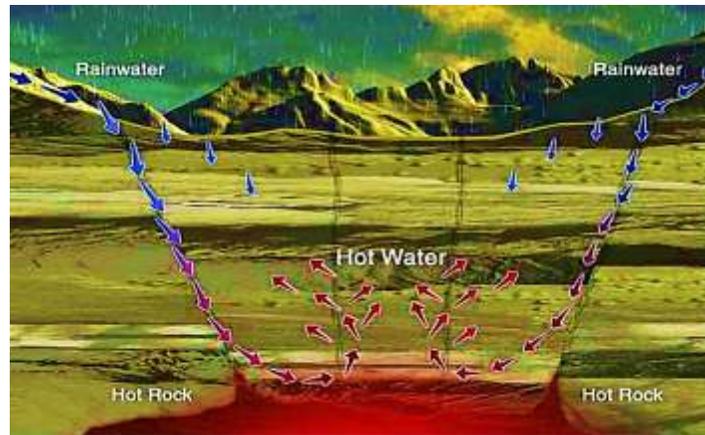


Figure (I.8) : Réservoir géothermique[33].

#### IV. Profil énergétique en Algérie

En Algérie, les combustibles fossiles (pétrole, gaz) répondent à 99% de la demande énergétique nationale, la partie restante étant satisfaite par l'hydroélectricité, d'où leur importance fondamentale pour l'économie.

Les principaux déterminants de la demande d'énergie sont l'évolution démographique et le développement économique. L'accroissement de la rente pétrolière, suite à l'augmentation conjointe des volumes produits et du cours des hydrocarbures, a permis une croissance moyenne du PIB de 4% par an entre 2001 et 2007.

Avec des hypothèses de taux de croissance économique de 3% et 5% et un taux de croissance démographique de 1,6% par an, pour la période 2007-2030, le taux de croissance de la demande énergétique serait compris entre 2,8% et 4,3% par an pour la période de projection ; le marché algérien absorberait, en énergie primaire, 61,5 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) en 2020 et 91,54 Mtep en 2030 [34].

#### V. ÉMISSION DES GAZ A EFFET DE SERRE CO<sub>2</sub>

L'Algérie est considérée comme l'un des plus importants émetteurs de CO<sub>2</sub> [36] (Figure I.9). Le gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est formé lors de la combustion de carbone et de la respiration d'êtres vivantes, et est considéré comme gaz à effet de serre [37].

L'Algérie se classe la troisième après l'Afrique du sud et l'Égypte selon (« Statistical Review of World Energy », 2019) comme émetteur de CO<sub>2</sub> en Afrique en raison de la croissance économique. L'Algérie dispose d'un potentiel diversifié et important de ressources énergétiques soit conventionnelles comme le pétrole ou le gaz naturel, soit renouvelable comme le solaire et l'éolien. Cependant, les hydrocarbures occupent toujours une place importante dans l'économie nationale. Elle est considérée parmi les trois premiers producteurs de pétrole en Afrique [35].

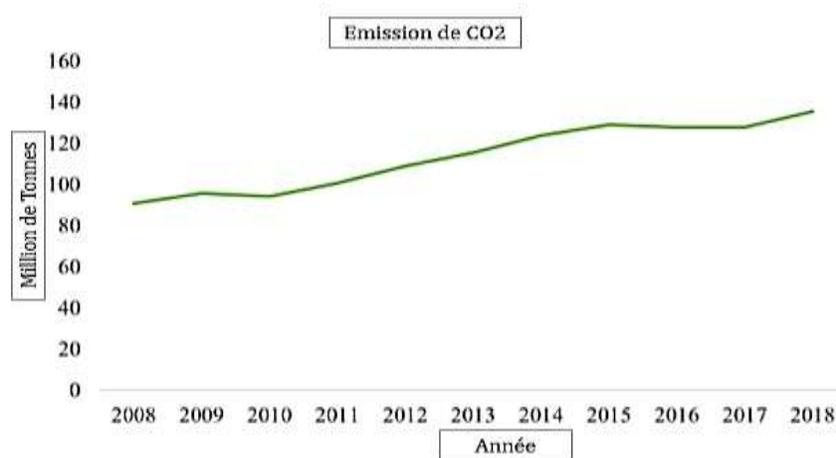


Figure (I.9) : Tendence des émissions de CO<sub>2</sub> en Algérie de 2008 à 2018[38].

## VI. DEVELOPPEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES EN ALGERIE

Le gouvernement algérien a lancé les politiques et les fonds pour le développement des énergies renouvelables dans le pays depuis 1998. L'Algérie a des sources d'énergies renouvelables prometteuses telle que l'hydroélectricité, le vent, la géothermie, la biomasse et le solaire en raison de la situation géographique [39]. L'objectif du programme national d'énergie renouvelable PENREE qui a été introduit en 2011, est d'avoir 22 GW de production d'énergie renouvelable contribuant à 27% au mix énergétique du pays d'ici 2030 [40].

Le programme d'énergie renouvelable a été mis à jour en 2015 et 2019. Il vise principalement à augmenter l'énergie solaire, le plan est d'avoir 13575 MW d'énergie solaire, 2000 MW de Centrale Solaires à Concentration (CSC), 5010 MW d'énergie éolienne, 1.00 MW de biomasse et 15 MW de production géothermique d'ici 2030.

Actuellement, il n'y a que 22 centrales photovoltaïques disponibles dans le pays avec un total de 400MW, une centrale à turbines d'une production totale de 10MW et une centrale CSC d'une capacité totale de 25 MW. Il existe 11 centrales hydrauliques dans le pays avec une production annuelle de 389,4GWh [41, 39].

Le pays reçoit une irradiation directe estimée à 169440 KW/m<sup>2</sup>/an avec une production potentielle de 3000KWh/an (Figure I.10). Le désert du pays est considéré parmi les hauts niveaux d'irradiations solaires et de température moyenne à l'échelle mondiale. La durée d'ensoleillement est d'environ 2000 à 3900 h/an avec un rayonnement horizontale de surface de l'ordre de 3 à 5kWh/m<sup>2</sup> [42, 43].

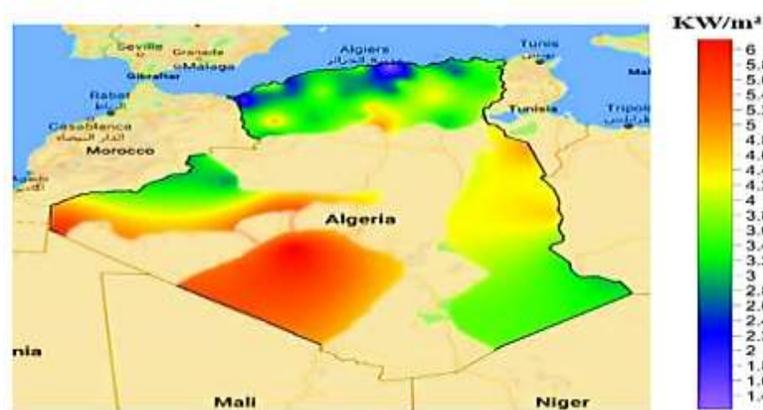


Figure (I.10) : Distribution de l'irradiation solaire en Algérie[43].

La ressource éolienne en Algérie varie d'un endroit à un autre en fonction de la topographie et du climat. Le pays est divisé en deux zones géographiques distinctes. La région nord du pays a un littoral de plus de 1600 Km<sup>2</sup> avec une topographie montagneuse. Alors que le désert est dans la région sud du pays. Plusieurs études ont été menées pour analyser le potentiel de la production d'énergie éolienne dans le pays. Sur la base de ces études, l'Algérie dispose d'un potentiel de génération éolienne dans plusieurs régions, telle que M'sila, Djelfa et Mècheria.

Ces emplacements ont des vents présents tout au long de l'année, avec des plages de vitesse de 6 à 7m/s (Figure I.11). Cependant, il existe d'autres endroits où la vitesse du vent est élevée comme à Adrar. Ces emplacements ne sont pas adaptés à une installation de production éolienne en raison des conditions géographiques et de l'indisponibilité du réseau de transport électrique. D'autre part, des températures

extrêmes jusqu'à 50°C limitent l'installation pour les emplacements désertiques du sud du pays[44].

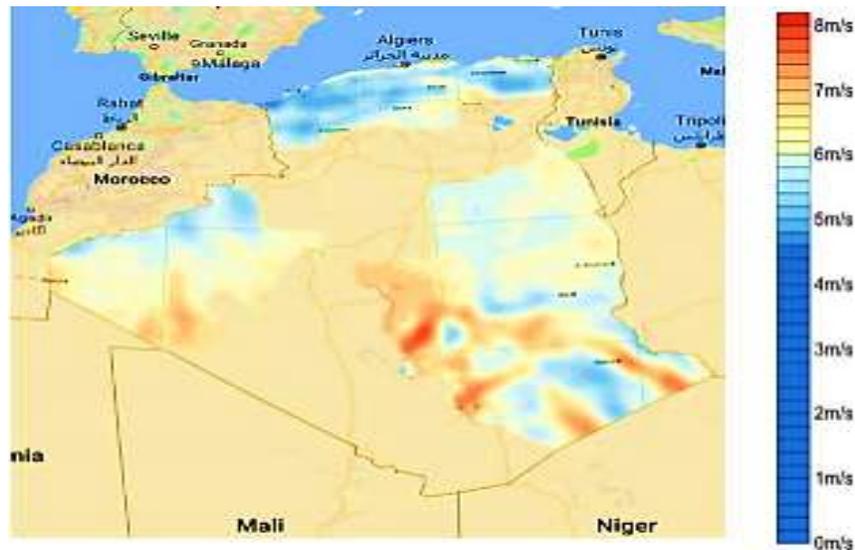


Figure (I.11) : Potentiel de vitesse du vent en Algérie[45].

L'Algérie a un potentiel prometteur pour la production d'hydroélectricité (Figure I.12) en raison de la disponibilité des sites de barrage et des précipitations moyennes élevées. La pluviométrie moyenne qui s'écoule sur le territoire algérien est estimée à 65 milliards de mètres cubes par an, avec un potentiel de 103 sites de barrages [46].



Figure (I.12) : Emplacement des barrages et des rivières en Algérie pour la production d'hydroélectricité [38].

L'Algérie dispose de ressources bioénergétiques vastes et diversifiées. L'évaluation des ressources bioénergétiques telle que la biomasse est essentielle pour le développement du secteur de la bioénergie dans le pays [47].

L'énergie géothermie (Figure I.13) est une solution importante pour augmenter l'intégration des énergies renouvelables dans le pays en raison de la disponibilité d'un grand nombre de sources chaudes. Il existe plus de 240 sources chaudes disponibles et réparties d'est en ouest et situées à une altitude modérée dans les régions montagneuses du pays. La température la plus élevée enregistrée était pour la zone Est 98°C, pour la zone Ouest 68°C et pour la zone centrale 80°C. Pendant ce temps, la zone sud a une température moyenne de 50°C[48].

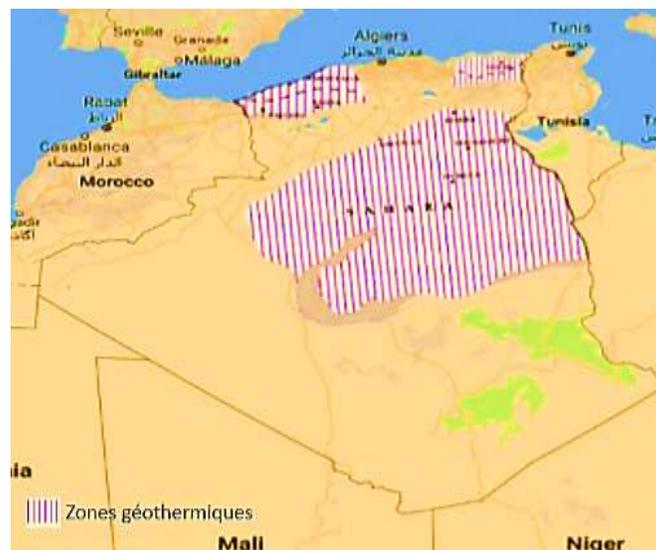


Figure (I.13) : Localisation du potentiel géothermique en Algérie[49].

Malgré la capacité énergétique et diversifiée dans l'Algérie de nombreux obstacles empêchent son utilisation, le plus grand obstacle est leur coût d'installation est assez important.

Pendant un temps, le principal reproche fait aux énergies renouvelables est leur coût par rapport aux énergies fossiles. C'est de moins en moins vraie, notamment pour le solaire dont le coût continue de baisser chaque année. Nous assistons en ce moment à une campagne de lobbying à l'échelle mondiale pour faire pression sur le gouvernement et libérer les capitaux pour les énergies « propres ».

## **VII. ÉNERGIE GEOTHERMIQUE**

### **VII.1. Historique**

La géothermie n'est pas seulement un mode de chauffage, c'est d'abord la science des phénomènes thermiques internes de la terre, ainsi que l'exploitation de ces phénomènes pour produire de l'énergie[50]. La présence des volcans, des sources chaudes et d'autres phénomènes thermiques indique que l'intérieur de la terre était chaud. Entre le 16<sup>ème</sup> et le 17<sup>ème</sup> siècle, l'homme a déduit à partir de simples sensations physiques, que la température de la terre augmente avec la profondeur. Les premières mesures au thermomètre ont été effectuées en 1740 par De Gensanne, dans une mine près de Belfort en France [50]. En 1870, des méthodes scientifiques modernes étaient utilisées pour étudier le régime thermique de la terre. Au 20<sup>ième</sup> siècle le rôle de la chaleur radiogénique avait été découvert, ce rôle indiquait qu'il existe deux phénomènes principaux qui expliquent l'origine de la chaleur rencontrée dans la croûte terrestre [33] :

- La désintégration des éléments radioactifs présents dans les roches (Uranium, Thorium, Potassium, etc.),
- Le refroidissement correspondant à la dissipation de l'énergie dite primitive accumulée lors de la formation de la terre. La chaleur émise par la fission varie avec la composition chimique des roches, elle est environ trois fois plus élevée, par exemple, les granites et les basaltes. Elle varie aussi selon l'âge des roches, raison pour laquelle les gradients géothermiques sont élevés dans les plates formes jeunes, comme en France et en Europe du sud, ou dans les roches anciennes, comme en Scandinavie[33, 51].

En 1904, c'est dans la ville de Larderello (Italie) (Figure I.14), la géothermie est utilisée pour la première fois pour produire de l'électricité. Cette année-là, cinq ampoules ont été allumées grâce à l'électricité produite par la vapeur d'eau du sol. Ensuite, une centrale géothermique est ouverte en 1911, et resta la seule pendant 50 ans. En 1942, la capacité géo thermoélectrique installée avait atteint 127,650 KW. et depuis ce temps jusqu'à maintenant, cette énergie se développe partout dans le monde [51, 50].

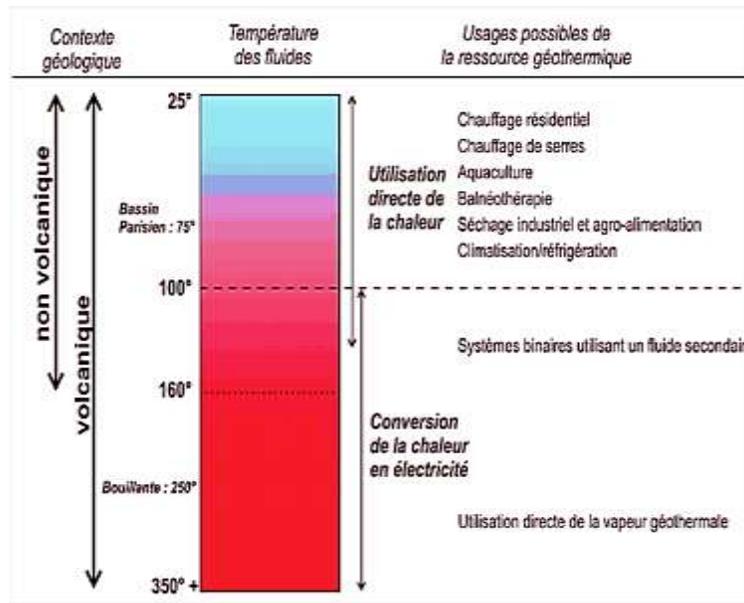


Figure (I.14) : Les principaux usages de la géothermie en fonction de la température des couches géologiques[52].

## VII.2. Ressources mondiales de la géothermie

Ces réserves ne sont pas situées dans quelques sites particuliers, éventuellement désertiques ou au fond des mers, la chaleur du sous-sol est présente sur tous les continents[53].

Les ressources géothermiques (Figure I.15) sont dispersées à travers le monde comme le montre la carte suivante :

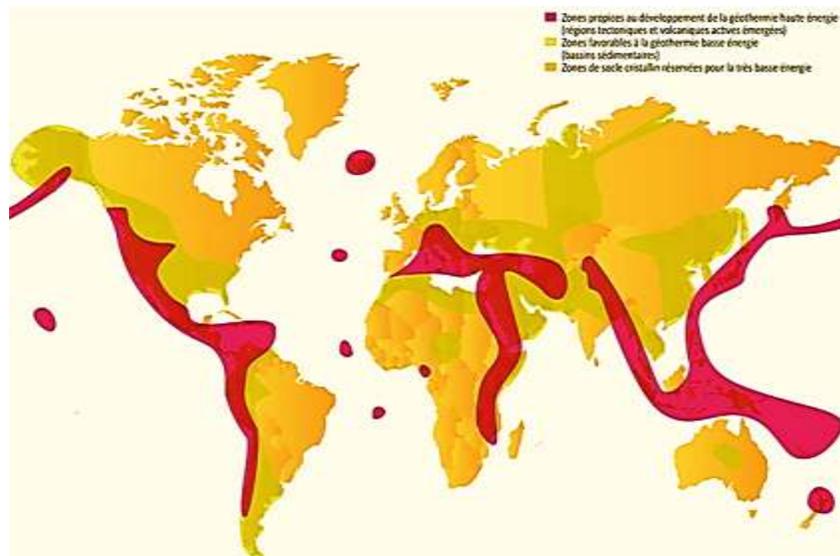


Figure (I.15) : Carte mondiale des ressources favorables de production l'énergie géothermique [54].

### VII.3. Principe de la géothermie

Un système géothermique (Figure I.16) permet de transfert de chaleur ou de froid depuis le sous-sol dans lesquels circule un liquide spéciale appelée fluide caloporteur. Celui-ci capte l'énergie sous forme des calories et les véhicules vers des locaux à chauffer où à refroidir, par association [55] :

- D'un système d'échange d'énergie dans le sous-sol (généralement appelé échangeur géothermique vertical ou horizontal).
- D'une Pompe à Chaleur (PAC).
- D'un système à distribution et d'émission d'énergie dans les locaux.

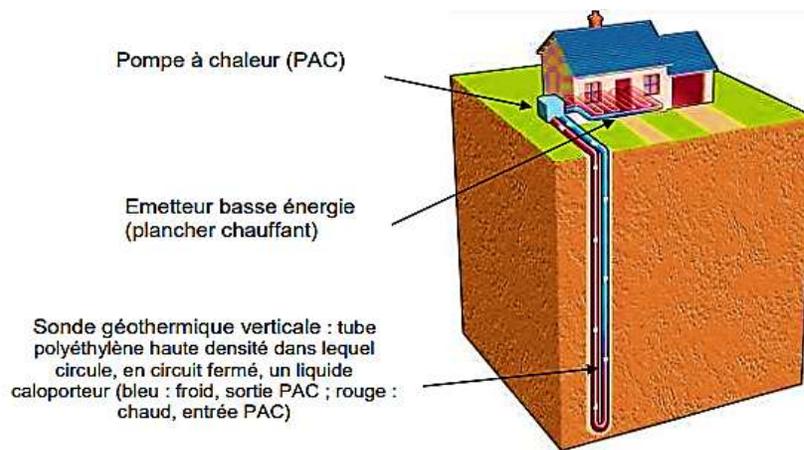


Figure (I.16) : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur sur sondes géothermiques [56].

#### VII.3.1. Système d'échange d'énergie dans le sous-sol

Le rôle de l'échangeur géothermique est de puiser ou d'injecter l'énergie dans le sous-sol et de l'acheminer jusqu'à la PAC.

On distingue deux principaux types de systèmes d'échanges de chaleur[57]:

- Les systèmes sur eau de nappe ou sur aquifère.
- Les systèmes sur sol (verticales, horizontales).

#### VII.3.2. Pompe à Chaleur (PAC)

La PAC constitue l'organe central du système géothermique puisque c'est elle qui va assurer le transfert d'énergie entre le sous-sol et les locaux.

Son principe de fonctionnement s'apparente à celui du réfrigérateur mais produit l'effet inverse (la chaleur), elle prélève de l'énergie d'un milieu à faible température

(le sous-sol) et elle injecte cette énergie dans un autre milieu à une température plus élevée (les émetteurs des locaux à chauffer). Son fonctionnement repose pour l'essentiel sur l'exploitation des propriétés thermodynamiques des fluides et gaz frigorigènes soumis à des opérations de compression et de détente successives (cycle thermodynamique). Elle est dite réversible lorsqu'elle permet également de rafraichir.

Une PAC réversible permet de chauffer ou de rafraichir un bâtiment. En mode rafraichissement, elle fonctionne de la même manière qu'un réfrigérateur ; l'intérieur de réfrigérateur correspond alors au bâtiment et l'échangeur et l'extérieur du réfrigérateur correspond à l'échangeur géothermique. En mode chauffage ou production l'Eau Chaude Sanitaire (ECS) le sens est inversé, c'est alors le bâtiment qui correspond à l'extérieur du réfrigérateur et l'échangeur géothermique qui représente l'intérieur du réfrigérateur[58]. La PAC est composée de quatre éléments principaux [59]:

**Le Compresseur :** Aspire le fluide frigorigène qui est sous forme de gaz à basse température, en comprimant le gaz, sa température s'élève en même temps que sa pression. A la sortie du compresseur, on obtient un gaz chaud à pression élevée.

**Le Condenseur :** Le gaz chaud est dirigé vers le condenseur dans lequel circule un fluide à réchauffer. Le gaz chaud transmet une partie de son énergie au fluide à chauffer dont la température augmente. Le gaz frigorigène se condense et dégage la chaleur vers un réservoir d'eau chaude qui alimente le système de distribution.

**Le détenteur :** Le frigorigène reste liquide à pression élevée et est détendu. La température du frigorigène baisse en proportion et devient inférieure à la température de la source de récupération.

**L'évaporateur :** Extrait la chaleur de l'eau dans la boucle au sol. Alors le frigorigène se transforme en gaz à une température très basse.

### VII.3.3. Distribution dans le bâtiment

Le rôle du système de distribution est d'acheminer l'énergie aux différents émetteurs un bâtiment à chauffer ou à refroidir. Les systèmes géothermiques sur PAC présentent une grande souplesse d'utilisation en autorisant une grande variété de système de distribution. Ce système est consisté et disposé d'un chauffage au sol ou d'un radiateur pour chauffer l'espace et pour stocker l'eau chaude [60].

### VIII. Technologies de la pompe à chaleur géothermique GSHP (the Ground Source Heat Pump).

La pompe à chaleur géothermique (GSHP) valorisé les calories du sol ou de l'eau des nappes par le biais de réseaux de capteurs, de sondes ou de forages d'eau. Les capteurs étant installés à la profondeur requise pour que la température soit quasiment constante toute l'année. Ce type de PAC est performant quelle que soit la température hivernale[57].

Il existe deux principaux types de GSHP :

- Les systèmes en boucle ouverte.
- Fermée (Figure I.18,).

Les systèmes ouverts (Figure I.17, a, b, c) extraient directement l'eau de la source. L'eau souterraine est prélevée (pompée) à partir de sources de forages ou de mines inondées.

Dans les systèmes en boucle fermée (Figure I.17, d, e, f), un fluide caloporteur circule dans une boucle fermée de conduite enterrée et n'est pas en contact direct avec le sol ou la roche. Ce dernier est souvent appelé échangeur de chaleur souterraine ou géo échangeur.



Figure (I.17) : Systèmes (GSHP) en boucle ouverte (a, b, c) et fermée (d, e, f)[61].

Les systèmes en boucle ouverte sont constitués d'une pompe à chaleur dans le bâtiment à chauffer/ refroidir, d'un puit de prélèvement, d'un puit d'injection (Figure I.18). Dans certains cas, l'eau prélevée n'est pas réinjectée dans le sol mais rejetée en surface (dans les réseaux d'assainissement par exemple), évitant ainsi le coût d'un deuxième forage. Cette pratique n'est recommandée que lorsqu'il n'y a aucun risque de réduire la nappe phréatique dans l'aquifère, et doit être effectuée avec les précautions nécessaires pour éviter l'impact environnemental. La réinjection de l'eau prélevée est également réglementée par les lois locales, qui définissent les limites d'utilisation. La quantité d'eau à prélevée, le taux de prélèvement et la distance entre les deux puits doivent être correctement planifiés. Ils dépendent de la demande de chaleur et les propriétés thermiques et hydrauliques du sol. Les puits de prélèvement et l'injection doivent être suffisamment éloignés pour éviter les courts circuits thermiques entre les deux pendant la durée de vie de l'installation, généralement de 20 à 30 ans.

Les systèmes ouverts ont l'avantage d'utiliser de l'eau naturelle, et peuvent être utilisées aussi pour le refroidissement gratuit et naturel ou pour l'abreuvement en fonction de sa qualité. De plus, ils absorbent plus de chaleur du sol qu'un géo échangeur de même taille et à demande de chaleur égale, ils coutent moins cher car ils nécessitent moins longueur de forage.

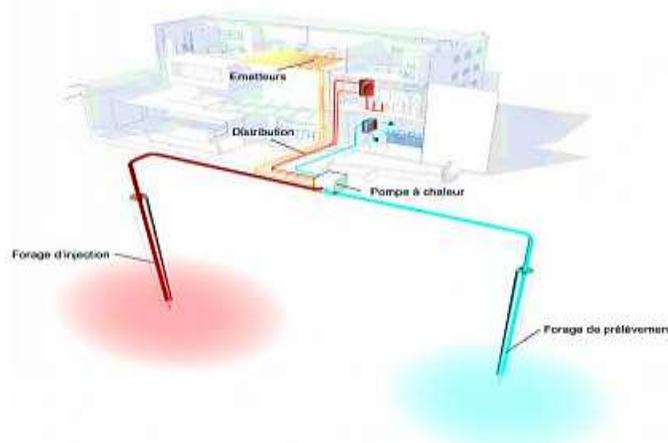


Figure (I.18) : Un système d'énergie géothermique en boucle ouverte[62].

Les systèmes en boucle fermée (Figure I.19) sont constitués de tubes en boucle fermée qui peuvent être installés horizontalement en boucle dans des tranchées, verticalement dans des puits ou sous forme des paniers.

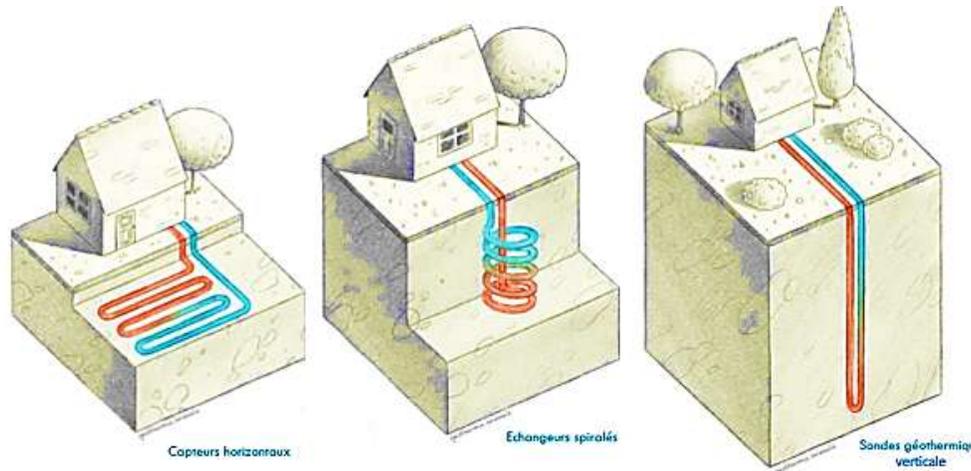


Figure (I.19) : Systèmes (GSHP) en boucle fermée [64].

La boucle est généralement constituée de tuyaux en Polyéthylène haute densité et contient un mélange d'eau et antigel. La taille du champ de la boucle dépend du type de sol, de l'humidité, de la température moyenne de forage et des caractéristiques de perte ou de gain de chaleur du bâtiment.

Les boucles horizontales peuvent être utilisés partout où il y a une surface disponible suffisante pour leur installation, et sont plus rarement installé pour le chauffage et le refroidissement des locaux des bâtiments que les échangeurs de chaleur verticaux.

Les échangeurs de chaleur verticaux sont généralement constitués d'un ou plusieurs tubes en U ou coaxiaux, plus fréquemment utilisées pour les forages plus profonds.

Les forages sont espacés d'au moins 5 à 6 mètres et la profondeur dépend des caractéristiques du sol et du bâtiment. Les tuyaux de systèmes d'échangeur de chaleur peuvent être intégrés directement dans les fondations en béton des bâtiments et des autres constructions et sont appelée sondes thermiques[63, 64].

### **VIII.1. CARACTERISTIQUES DE LA POMPE A CHALEUR GEOTHERMIQUE (GSHP)**

Les pompes à chaleur géothermiques peuvent réduire la consommation d'énergie et les émissions de polluants atmosphérique correspondants, jusqu'à 44% par rapport aux pompes à chaleur aérothermique et jusqu'à 72% par rapport au chauffage par résistance électrique avec un équipement de climatisation standard [63].

La performance des PAC est généralement exprimée par le Coefficient de Performance « COP », qui est le rapport entre la puissance de chaleur produite par la PAC et l'énergie électrique consommé par le compresseur [65].

Les performances de refroidissement sont généralement exprimées par le coefficient d'efficacité frigorifique ou (Energy Efficiency Ratio) « EER », tandis que les performances de chauffage et de refroidissement des PAC à inversion sont généralement exprimées en tant que Facteur de Performance Saisonnier (SPF), la moyenne de COP et EER [66].

Les performances sont influencées par tous les composants du système installé, y compris les conditions du sol, l'échangeur de chaleur couplé au sol, la pompe à chaleur et la distribution du bâtiment, mais sont largement déterminées par la différence entre la température d'entrée et de sortie.

La technologie des (GSHP) est utilisée pour le chauffage et le refroidissement des locaux, des bâtiments individuels petits et grands et dans les systèmes de chauffage urbain.

La GSHP consommé 1KWh d'énergie électrique pour produire 3 à 4KWh d'énergie thermique (la chaleur du sol). Soit 2 à 3 KWh d'énergie renouvelable géothermie.

## **VIII.2. Types de géothermie**

On distingue généralement trois catégories de géothermie (Figure I.20) [67] :

### **VI.2.1. 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 de 10 à 200 mètres. Ce niveau de température ne permet pas une utilisation directe de la chaleur par simple échange mais nécessite l'appoint en surface de pompe à chaleur géothermique (GSHP) qui augmente 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. Les échangeurs de chaleurs qui sont généralement utilisés dans ce type sont :

Les échangeurs horizontaux, verticaux en circuit fermé ou une nappe phréatique.

### **VIII.2.2. Géothermie profonde de basse énergie**

Le principe est le même que pour la géothermie de très basse énergie, mais les forages sont plus profonds entre 200 à 2500 mètres, et la température de l'eau est supérieure généralement entre 30 et 90°C. L'eau géothermale est captée puis réinjectée dans le sous-sol via deux forages, qui forment « doublet » à partir de ce type on peut chauffer des quartiers de milliers d'habitants ou des parcs industriels.

### **VIII.2.3. Géothermie haute énergie (productrice d'électricité)**

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 chauds, 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.

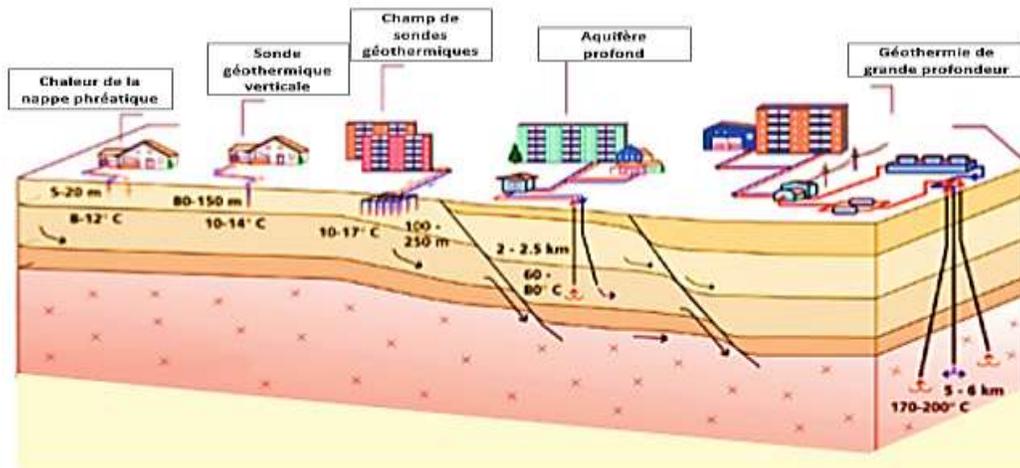


Figure (I.20) : Différents systèmes pour différents types de la géothermie[68].

## CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les inconvénients des énergies fossiles comme le pétrole, le gaz et le charbon sur l'environnement et le problème de l'effet de serre, par conséquent, les énergies renouvelables sont considérées comme la solution principale qui permet d'atténuer le réchauffement climatique et de contribuer au développement durable, notamment, l'énergie solaire, l'éolienne, l'hydroélectrique, la biomasse et l'énergie géothermique.

Les technologies géothermiques utilisent des ressources énergétiques renouvelables pour produire de l'électricité et de la chaleur tout en produisant de très faibles niveaux d'émissions de Gaz à Effet de Serre (GES). Cette ressource d'énergie est présente dans plus d'une vingtaine de pays aussi bien dans des pays industrialisés que dans des pays en développement, la technologie de l'énergie géothermique permet des économies de chauffage pouvant atteindre 70%. Notre pays possède un grand potentiel géothermique non exploité à l'heure actuelle.

**Bibliographie :**

- [1] « Ressources et consommation énergétiques mondiales », *Wikipédia*. Mai 19, 2021.
- [2] Hopenergie, « Quelle différence entre énergie renouvelable et non renouvelable ? », *Hopenergie*.
- [3] « ECOMET - Espace environnement - Les ressources énergétiques non renouvelables ».
- [4] « La consommation de charbon dans le monde | Connaissances des énergies », janv. 27, 2016.
- [5] T. Duflot, « Quelles sont les énergies renouvelables et non renouvelables ? »
- [6] « Les sources d'énergie : liste et explications », Chaplain Énergie.
- [7] « Gaz naturel : la filière technico-économique », Encyclopédie de l'énergie, févr. 18,2020.
- [8] « Tout savoir sur le gaz naturel », IFPEN.
- [9] « Gaz naturel : ressources et impact sur l'environnement », Selectra, janv. 08, 2014.
- [10] « Les autres applications du nucléaire | SFEN, Société Française d'Énergie Nucléaire ».
- [11] « 10306-ressources-energetiques-et-energie-electrique-ensps\_0.pdf ».
- [12] « Qu'est-ce qu'une énergie renouvelable ? », *EDF France*, juill. 20, 2015.
- [13] « les énergies renouvelables - Energie-eolienne ».
- [14] « Chapitre\_4\_Le\_Soleil\_une\_source\_d\_energie\_essentielle.pdf ».
- [15] « Qu'est-ce que l'énergie solaire : exploitation thermique, photovoltaïque, thermodynamique », juill. 29, 2010.
- [16] « Expo-Energie-YA-Bertrand\_fiches.pdf ».
- [17] « Énergie renouvelable - Définition et Explications », *Techno-Science.net*.
- [18] « Énergie solaire thermique : définition, développement par pays, usages », août 30, 2010.
- [19] « Panneau solaire thermique ».
- [20] « Comment ça marche : l'énergie solaire photovoltaïque », juill. 2014.
- [21] H. Watt, « Fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque », Hello Watt.
- [22] ludovic, « Les différents types d'éoliennes », *Jardi brico*, févr. 15, 2016.
- [23] « Les énergies renouvelables : état des lieux et perspectives - Les différents types d'éoliennes ».
- [24] J. Bouchet, « Tout savoir sur l'énergie hydraulique – Energie efficiente ».
- [25] « L'énergie hydraulique - Les Energies Renouvelables », mars 25, 2009.
- [26] « Comment fonctionne une centrale hydraulique ? - Bricoleurs ».

- [27] « Comment surveiller et entretenir une centrale hydroélectrique pour une efficacité optimale », Blog WIKI, sept. 30, 2019.
- [28] « La biomasse | biomasse-conseil.fr ».
- [29] « Biomasse – Photosynthèse - Energie biomasse | Mtaterre ».
- [30] « La centrale biomasse - Les énergies 3B ».
- [31] « Une définition de la biomasse », Paperblog.
- [32] « Géothermie », Wikipédia. Juin 14, 2021.
- [33] « 1.1.INTRODUCTION\_presentation.pdf ». Consulté le : juin 15, 2021.
- [34] « 125713-Article Text-342367-1-10-20151113 (1).pdf ».
- [35] A. Bouraiou *et al.*, « Status of renewable energy potential and utilization in Algeria », *J. Clean. Prod.*, vol. 246, p. 119011, févr. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119011.
- [36] « inventaire-volume1\_0.pdf ». Consulté le : juin 15, 2021.
- [37] « Algérie - Émissions de CO2 (kt) | Statistiques ».
- [38] Y. Zahraoui, M. R. Basir Khan, I. Al Hamrouni, S. Mekhilef, et M. Ahmed, « Current Status, Scenario, and Prospective of Renewable Energy in Algeria: A Review », *ENGINEERING*, preprint, mars 2021. doi: 10.20944/preprints202103.0260.v1.
- [39] « RE 13.3 Plaquette\_PNEREE\_2016\_Fr.pdf ». Consulté le : juin 15, 2021.
- [40] « Énergie en Algérie », Wikipédia. sept. 13, 2020.
- [41] T. Hasni, R. Malek, et N. Zouioueche, « ALGERIA 100% RENEWABLE ENERGY », *Clim. CHANGE*, p. 31.
- [42] A. Khelif, « EXPERIENCE, POTENTIEL ET MARCHE PHOTOVOLTAIQUE ALGERIEN », p. 7.
- [43] F. Yettou, A. Boubaker, M. Ali, A. Gama, et N. L. Panwar, « Estimation et cartographie des températures d'un cuiseur solaire boîte avec et sans réflecteur en Algérie », oct. 2014.
- [44] « download.pdf ». Consulté le: juin 16, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.riob.org/fr/file/264177/download?token=jNyojwF>
- [45] « Carte du gisement éolien en Algérie - Centre de Développement des Energies Renouvelables ».
- [46] N. Boubou, « Efficacité énergétique et énergies renouvelables pour une gestion durable de l'eau en Algérie », mars 2019.
- [47] « LOUAI Nabila. Evaluation Energétique des déchets solides en Algérie, une solution climatique et un nouveau vecteur énergétique - PDF Free Download ».

- [48] S. Ouali, A. Khellaf, et K. Baddari, « Etude des ressources géothermiques du sud algérien », *Rev. Energ. Renouvelables*, vol. Vol. 10, p. 407 414, janv. 2007.
- [49] « Cartographie et caractérisation des ressources géothermiques de l Algérie - PDF Free Download ».
- [50] « Histoire de la géothermie : invention de la géothermie | SOLUT'EnR : votre solution de chauffage en énergies renouvelables ».
- [51] « La-Geothermie\_2eme-edition\_2008 - Copie.pdf ».
- [52] « La géothermie ou l'énergie de la Terre ».
- [53] M. H. Kuska, « Energy Modelling to Evaluate the Thermal Regulation of Aquaculture Raceways using Geothermal Heat Exchange », p. 148.
- [54] « Figure 1.1-Les ressources mondiales de géothermie. Source : BRGM », ResearchGate.
- [55] J.-Y. Ausseur, *Les pompes à chaleur géothermiques sur champ de sondes : manuel pour la conception et la mise en oeuvre : guide technique*. Angers]; [Orléans: ADEME ; BRGM, 2012.
- [56] « RP-59761-FR.pdf ». Consulté le : juin 19, 2021.
- [57] « pompe\_a\_chaleur\_geothermie.pdf ».
- [58] D. B. Sanner, « SHALLOW GEOTHERMAL SYSTEMS, GROUND SOURCE HEAT PUMPS », *GROUND SOURCE HEAT PUMPS*, p. 27.
- [59] B. Colliard, « Outil de décision et de quantification du potentiel géothermique pour l'implantation de sondes géothermiques verticales », p. 100.
- [60] J.-Y. Ausseur, *Les pompes à chaleur géothermiques sur champ de sondes : manuel pour la conception et la mise en oeuvre : guide technique*. Angers]; [Orléans: ADEME ; BRGM, 2012.
- [61] « Figure 3. Types de configurations de système de PAC géothermique », Researchgate.
- [62] « Pompes à chaleur - SIGES Seine-Normandie - ©2021 ».
- [63] A. Manzella, « Geothermal energy », *EPJ Web Conf.*, vol. 148, p. 00012, 2017, doi: 10.1051/epjconf/201714800012.
- [64] « pres-171109-pac-1-3-geoth-fr.pdf ». Consulté le : mars 19, 2021.
- [65] « 1 – SGV | ». Consulté le mars 24, 2021.
- [66] « EER : définition », Climamaison.
- [67] « Qu'est-ce que la géothermie ? », Planète Énergies.
- [68] « BFE\_Geothermie\_Deutsch.pdf ».

## **Chapitre II : Présentation du Logiciel EWS**

## I. INTRODUCTION :

Le module géothermique EWS a été développé en 1997 dans le cadre d'un projet de recherche (Huber, Schuler, 1997) [1] pour simuler des sondes géothermiques uniques, et élargi avec une extension de programme en 1999 pour les systèmes multisondes (Huber, Pahud, 1999) [2].

Le modèle mathématique du programme est un mélange d'une méthode de simulation numérique au voisinage de la sonde « Méthode du Crank-Nickolson » [3] et d'une méthode de facteur de réponse analytique pour les couches les plus éloignées de la terre. Ce mélange permet un temps de calcul très court avec une très bonne précision de calcul.

Avec le programme EWS il est possible de simuler des forages coaxiaux, simples ou doubles U, et un champ de sondes pouvant être calculer sur une période de 100 ans. Le programme calcule les températures d'entrées et de sorties, ainsi que le taux d'extraction de chaleur des sondes choisis librement. Il peut y avoir jusqu'à 10 couches de terre au maximum avec différents types de matériaux de sol et des propriétés correspondantes. Le débit volumique du fluide caloporteur dans les sondes et la distance entre les tuyaux, le diamètre et la profondeur de forage sont entrées par l'utilisateur [4].

Dans ce chapitre nous présentons les paramètres physiques et les caractéristiques du logiciel EWS utilisés dans la simulation afin d'optimiser le comportement thermique des forages.

## II. BASES PHYSIQUES DU LOGICIEL EWS :

### II.1 ZONE DE SIMULATION :

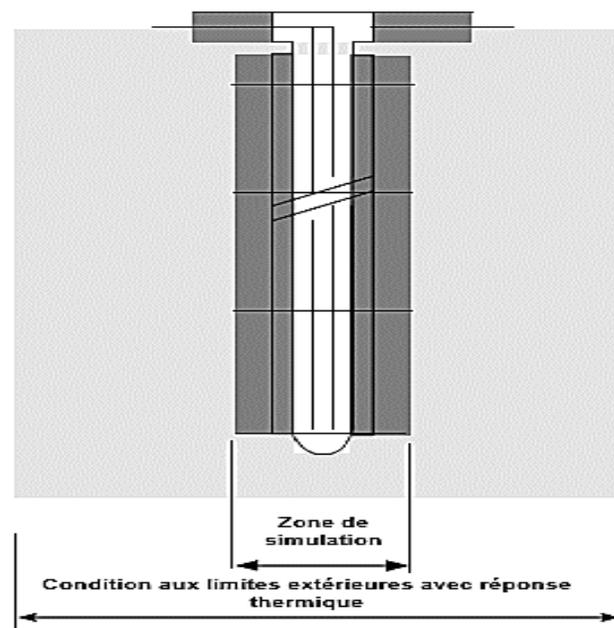


Figure (II.1) : Zone de simulation et la condition aux limites extérieures [7].

La méthode « Crank-Nicholson » [5] est utilisée pour la simulation des températures du sol à proximité des forages (<3m). La température moyenne du fluide de la couche correspondante est considérée comme une condition aux limites internes. Ainsi, il est possible de calculer le comportement au démarrage du forage.

La condition aux limites extérieures est calculée avec le facteur de réponse thermique sans dimension (fonction-g). Il y a la possibilité de choisir entre la méthode de Carslaw&jaeger ou celle d'Eskilson [6].

L'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques peut être résolue unidimensionnelle pour chaque couche. Ainsi, il est possible de définir différentes propriétés de la couche. Cela permet de calculer le cas courant dans lequel le sol est constitué de différentes couches aux propriétés différentes.

### II.2 METHODE « CRANK-NICHOLSON » POUR SIMULER LE VOISINAGE DE LA SONDE :

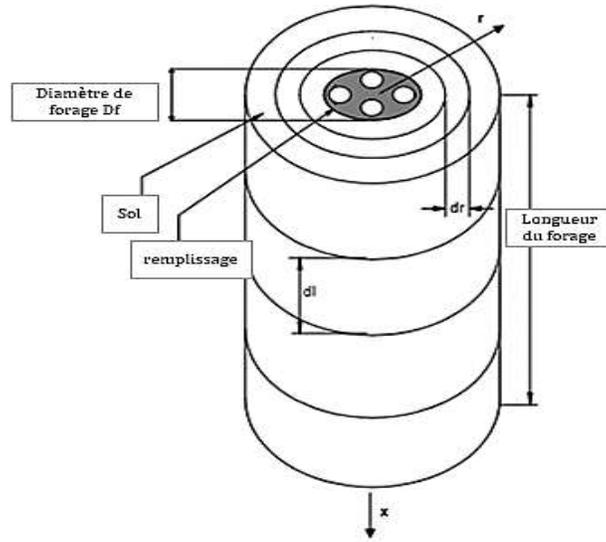


Figure (II.2): la grille de simulation du forage [8].

La grille de calcul est axialement symétrique. La terre est divisée dans la direction axiale en parties égales de longueur  $dl$ . La grille dans la direction radiale est variable.

La grille est définie par le facteur de grille  $f$  [9] :

$$f = \frac{r_{j+1} - r_j}{r_j - r_{j-1}} \quad (\text{II.1})$$

$f$  : Facteur de grille pour la grille de calcul dans la direction radiale. La grille peut être calculée comme il est indiqué en (II.2) à (II.4) ; la zone de simulation est définie sur le rayon de calcul maximal  $r_m$ , dont  $m$  représente le nombre de points de calcul dans la direction radiale :

$$r_0 = \frac{D_i}{2} \quad (\text{II.2})$$

$$r_1 = \frac{D_f}{2} \quad (\text{II.3})$$

$r_0$  : Rayon intérieure du tube de forage [m].

$D_i$  : Diamètre intérieure du tube de forage [m].

$r_1$  : Rayon de forage [m].

$D_f$  : Diamètre de forage [m].

$$\text{Pour } j \geq 2 : r_j = r_{j-1} + (r_m - r_1) \frac{1-f}{1-f^{m-1}} f^{j-2} \quad (\text{II.4})$$

Le point d'équilibre de masse ; important pour la détermination de la résistance thermique, peut être calculé :

$$r_{jz} = \sqrt{\frac{(r_j^2 + r_{j-1}^2)}{2}} \quad (II.5)$$

La figure (II.3) montre les conventions des désignations, qui seront utilisées et expliquées ultérieurement. Dans cet exemple avec trois nœuds arithmétiques.

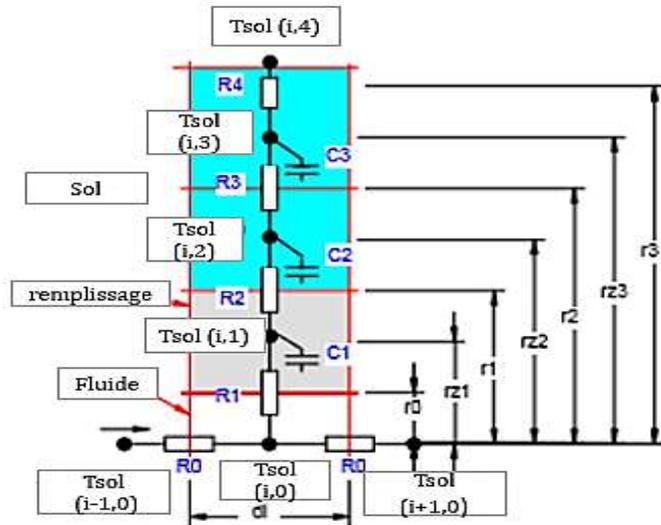


Figure (II.3) : convention de désignation (Huber&Pahud,1999) [10].

La carte thermique des capacités C calculées comme suit [1] :

$$C_1 = c_p \text{ remplissage } \rho \text{ remplissage } \pi (r_1^2 - 4r_0^2) dl$$

$$C_2 = c_{p_{\text{sol}}} \rho_{\text{sol}} \pi (r_2^2 - r_1^2) dl$$

$$C_3 = c_{p_{\text{sol}}} \rho_{\text{sol}} \pi (r_3^2 - r_2^2) dl$$

(II.6)

Avec :

C: Capacité thermique [J/K].

dl: Epaisseur de la couche [m].

$c_p$  : Capacité thermique spécifique [J/Kg.K].

$\rho$  : Masse volumique [Kg/m<sup>3</sup>].

## II.3. EQUATION DE CHALEUR ET LA REPONSE THERMIQUE g

### II.3.1. EQUATION DE CHALEUR :

Pour les considérations suivantes, on suppose que le mécanisme de transport de chaleur dominant dans la terre est la conductivité thermique. Le problème de la conductivité thermique de la terre autour d'un forage est axialement symétrique. L'équation de chaleur dans la direction radiale autour d'un trou de forage peut être écrit par [11] :

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T_{sol}}{\partial r^2} = \frac{\partial^2 T_{sol}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_{sol}}{dr} \quad (II.7)$$

a : Diffusivité thermique c'est-à-dire la capacité de la roche a laissé circuler la chaleur a l'intérieure du milieu [12].

$$a = \frac{\lambda_{sol}}{c_{p_{sol}} \lambda_{sol}} \text{ [m}^2/\text{s]} \quad (II.8)$$

L'équation de chaleur est linéaire, par conséquent, les trous de forage uniques ainsi que les champs de forage avec une similitude géométrique ont des réponses thermiques similaires. La vitesse d'extraction de chaleur d'un forage provoque une baisse de température  $\Delta T_{sol}$  dans la terre autour du forage par rapport à la terre non affectée. La chute de température  $\Delta T_{sol}$  peut être rendue sans dimensions en utilisant le taux d'extraction spécifique  $\dot{q}$  et la conductivité thermique  $\lambda_{sol}$ . Comme il est montré par l'équation suivante donnée par Eskilson, 1987 [13] :

$$g(r,t) = \frac{\Delta T_{sol}(r,t) 2\pi \lambda_{sol}}{\dot{q}} \quad (II.9)$$

$\Delta T_{sol}$  : Température de sol par rapport à l'état non affecté [K].

$\dot{q}$  : Taux d'extraction de chaleur spécifique [w/m].

$\lambda_{sol}$  : Conductivité thermique du sol [w/mK].

### II.3.2. REPONSE THERMIQUE SANS DIMENSION g :

Carslaw&Jaeger ont résolu analytiquement l'équation de la chaleur pour des sources linéaires infinies et ont trouvé pour g la relation suivante [14] :

$$g \cong \frac{1}{2} \cdot \left[ \ln \left( \frac{4 \cdot t \cdot a}{r^2} \right) - \gamma \right] \quad (\text{II.10})$$

$\gamma = 0,5772$  (constante d' Euler).

t : Temp [s]

r : Distance radiale de forage[m]

L'approche de Carslaw&Jaeger conduit à une croissance continue de l'entonnoir de température pour une source linéaire infinie de chaleur du forage. Aucune condition d'équilibre ne peut être atteinte avec l'approche de Carslaw&Jaeger. L'université de Lund [15] a développé une approche pour les forages avec une longueur de forage finie H ; parce que les forages finis utilisent principalement la chaleur qui est stockée dans la terre à travers la longueur du forage.

Selon Claesson&Eskilson les forages ont une constante de temps  $t_s$ . Le comportement temporel du sol autour du forage est [16] :

$$t_s = \frac{H^2}{9a} \quad [\text{s}] \quad (\text{II.11})$$

Ainsi, le nombre Eskilson [17] sans dimension  $E_s$  est :

$$E_s = \frac{t}{t_s} = \frac{9a}{H^2} t \quad (\text{II.12})$$

## II.4 TEMPERATURE DE FORAGE ET LA TEMPERATURE DE FLUIDE

### II.4.1. TEMPERATURE DU FORAGE

La température du forage  $T_f$  peut être calculée à partir de g et  $T_m$  [18] avec :

$$T_f(z) = T_m(z) - R_g \cdot \dot{q} = T_m(z) - \frac{\dot{q}}{2\pi\lambda_{\text{sol}}} g(t, r_1) \quad (\text{II.13})$$

$R_g$ : Résistance thermique du sol [mK/W].

$T_m$  : Température moyenne du sol a la profondeur z dans le forage. La température du forage est considérée comme étant constante sur toute la longueur du forage.

### II.4.2 TEMPERATURE DU FLUIDE

La température moyenne du fluide  $T_F$  est définie comme la moyenne arithmétique du fluide de forage montant et descendant [18].

$$T_F(z) = \frac{T_{\text{montant}}(z) + T_{\text{descendant}}(z)}{2} \quad (\text{II.14})$$

### II.5 Résistances thermiques $R_a$ et $R_b$ de Forage :

Pour le calcul des résistances thermiques de forage, les modules de Hellström (1991) [19] ont été implantés dans le module de programme EWS. Différentes résistances de forage peuvent être calculées dans chaque couche horizontale de la terre.

La résistance thermique interne du forage  $R_a$  [mK/W] est une valeur caractéristique des pertes thermiques  $\Delta q_i$  [w/m] liées à la longueur du fluide ascendant vers le fluide descendant [20].

$$R_a = \frac{T_{\text{ascendant}}(z) - T_{\text{descendant}}(z)}{\Delta q_i(z)} \quad (\text{II.15})$$

La résistance thermique du forage  $R_b$  [mK/W] est définie par la température moyenne du fluide  $T_F$  dans le forage et la température de forage  $T_f$  [21].

$$R_b = \frac{T_f(z) - T_F(z)}{\dot{q}} \quad (\text{II.16})$$

La résistance de forage  $R_b$  [mK/W] est composée de la résistance de remplissage de forage  $R_c$  [mK/W] et de la résistance de transfert de chaleur du remplissage vers le fluide de forage  $R_\alpha$  [mK/W] :

$$R_b = R_\alpha + R_c \quad (\text{II.17})$$

La résistance du transfert thermique  $R_\alpha$  [mK/W] peut être calculée :

$$R_\alpha = \frac{1}{8\pi \alpha r_0} \quad (\text{II.18})$$

$\alpha$  : Coefficient de transfert de chaleur du fluide de forage [w/m<sup>3</sup>. K].

### III. PRESENTATION DU LOGICIEL EWS

Après avoir démarré le programme EWS (Figure II.4), les paramètres peuvent être saisis à nouveau, ou le programme peut lire dans un fichier d'entrée existant.

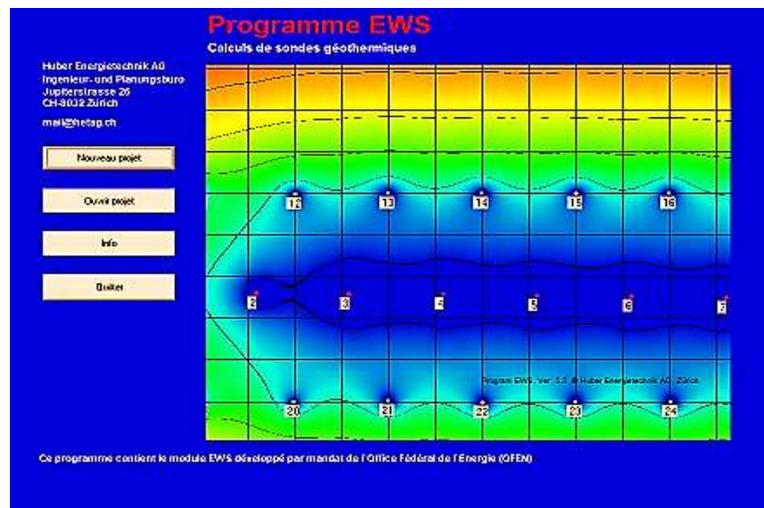


Figure (II.4) : Démarrage du programme EWS.

Les paramètres du programme (Figure II.5) sont saisis dans les sous-menus différents : « Sondes », « saumure », « Terrain », « Extraction », « Charge » [22] [17].

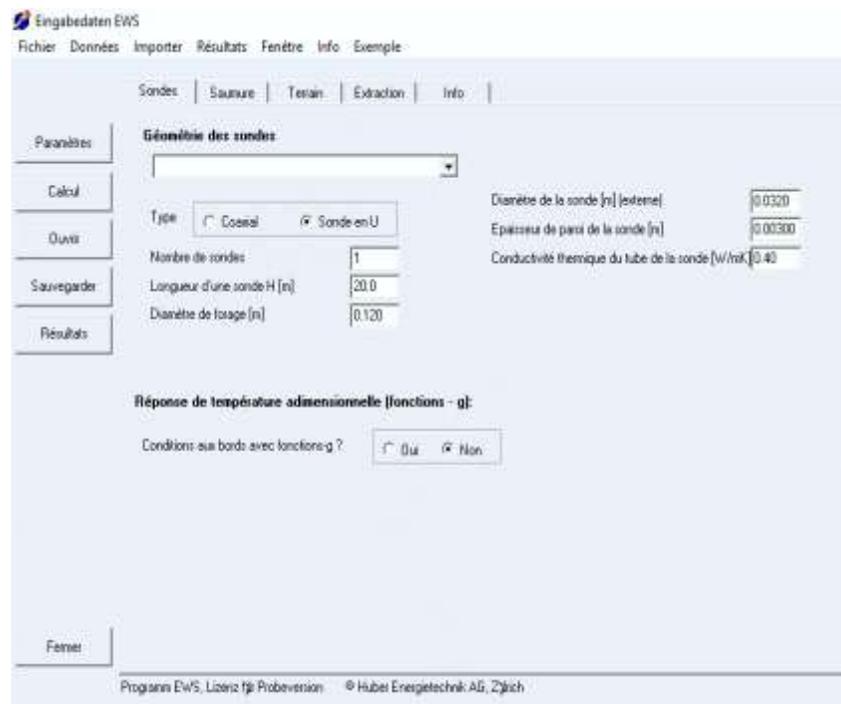


Figure (II.5) : Interface du logiciel EWS.

### III.1 L'onglet « Sondes » :

Cet onglet (Figure II.6) définit :

- Nombre de sondes, Longueur d'une sonde H [m], et Diamètre de forage [m].
- La géométrie des sondes : soit des sondes coaxiales, simple U, ou double U.
- Diamètre de la sonde [m] externe.
- Epaisseur de la paroi de la sonde (m).
- Conductivité thermique du tube de la sonde [w/mK].



Figure (II.6) : Interface du l'onglet « Sondes ».

Chaque type de configuration de forage peut être décrit par sa fonction de réponse thermique sans dimension  $g$  équation (II.9). Le programme EWS définit la condition aux limites extérieures de la zone de simulation en fonction de cette réponse thermique.

Le programme EWS définit la condition aux limites avec la fonction  $g$ , si le champ « Condition au bord avec fonction- $g$  ? » est défini sur « oui », sinon il utilise l'équation de Carslaw&Jaeger. La condition aux limites calculée par Carslaw&Jaeger n'est adéquate que pour les forages uniques et les périodes de simulation jusqu'au temps de réponse de l'équation (II.11).

Une fois le nombre de forages entré dépasse un, le champ « Condition au bord avec fonction- $g$  ? » est mis à « oui » et les conditions aux limites sont calculées avec les fonctions  $g$  les équations (II.9 et II.11).

En conséquence, le champ déroulant (Figure II.7) apparaît avec un choix des configurations de forage. Là, B / H représente le rapport entre la distance de forage B et la profondeur de forage H.

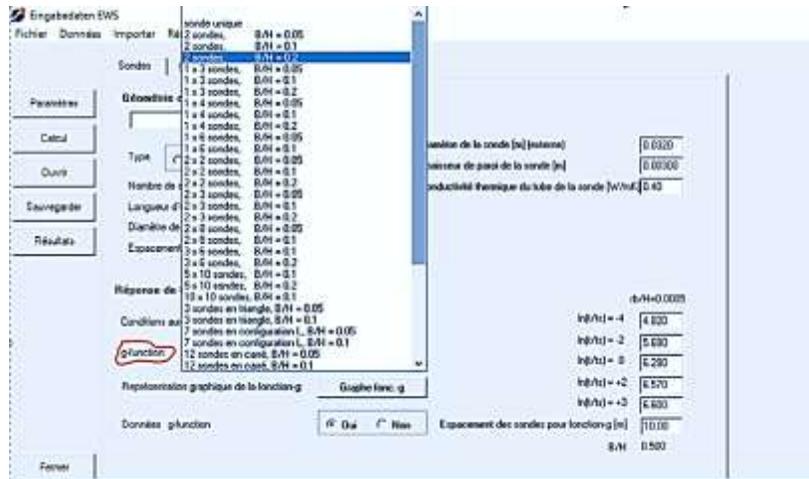


Figure (II.7) : l'onglet « Sondes » avec les configurations de sondes dans la partie 'g-fonction'.

Les champs  $\ln(t/t_s) = -4, -2, 0, +2, +3$  sont les valeurs de fonction de la fonction g des points données.  $r_b/H=0.0005$  est le rapport entre le rayon de forage  $r_b$  et la profondeur de forage H, est constante pour toutes les fonctions g de la bibliothèque de programme et pour la plupart des fonctions g publier.

L'application « champ de sonde » (Figure II.8) est proposée pour saisir tout type de configuration de forage jusqu'à 100 forages.

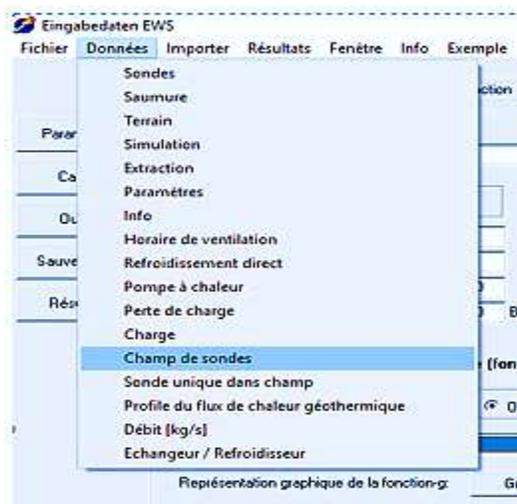


Figure (II.8) : Sélection dans « champ des sondes » dans le menu 'données'.

La distance entre deux lignes de la grille est d'un mètre, et entre tous les 10 mètres il y'a une ligne de quadrillage plus épaisse (Figure II.9) ; Les 3 cercles concentriques autour des trous montrent les couleurs. Dont les couleurs donnent un indice sur la valeur g (fonction de réponse thermique) du champ de trou de forage, le rouge indique une valeur g élevée et le bleu une valeur faible.

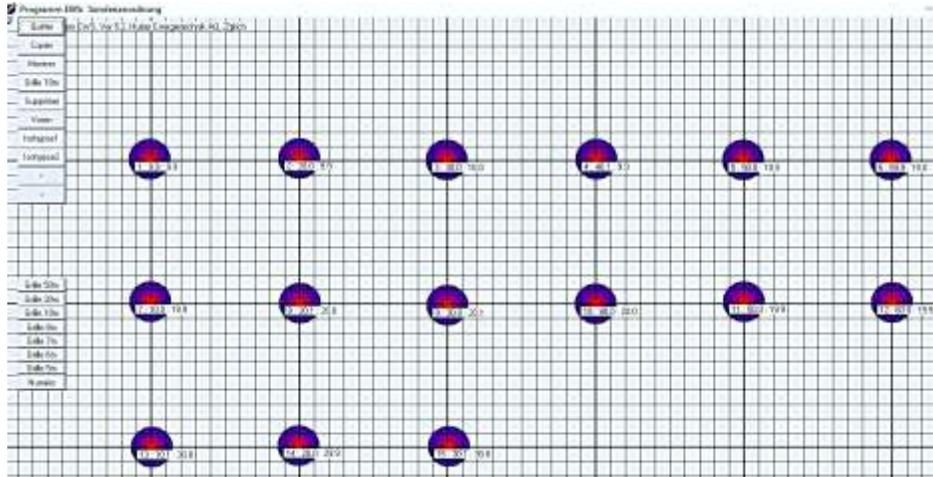


Figure (II.9) : Onglet « champ de sondes » avec 15 sondes.

### III.2 : Onglet « Saumure » :

Les paramètres physiques du fluide sont saisis dans le sous-menu « Saumure » (Figure II.10).

Figure (II.10) : Onglet « Saumure ».

Quand on saisit Les propriétés du fluide telle que :

- la conductivité thermique du fluide [W/m.K],
- Masse volumique du fluide [Kg/m<sup>3</sup>],
- chaleur spécifique du fluide [J/Kg. K],
- Viscosité cinématique du fluide[m<sup>2</sup>/s],

Sont entrées automatiquement au programme.

Le champ 'Débit [Kg/s]' représente le débit massique conçu (débit massique cumulé de tous les forages). Si le débit est inconnu alors on a la possibilité de saisir la différence de température entre l'entrée et la sortie du forage dans le champ 'Différence de température sur les sondes[K]'.

La température moyenne de l'air et le réchauffement supplémentaire de la surface sont simplement ajoutés au programme. Pour le gradient de température  $\Delta T_{Grad}$  [K] il existe une relation entre le flux géothermique  $\dot{q}_{Geo}$  [W/m]et la conductivité thermique de la terre  $\lambda_{sol}$  [W/mK].

$$\dot{q}_{Geo} [W/m] = \lambda_{sol} \cdot \Delta T_{Grad} \tag{II.19}$$

### III.3 : Onglet « Terrain »

Cet onglet définit les propriétés thermiques du sol et du matériau de remplissage (Figure II.11), le nombre de couches horizontales dans la terre « Nombre de strates horizontales » (le maximum est 10 couches), les résistances thermiques de forage  $R_a, R_b, R_c$ .

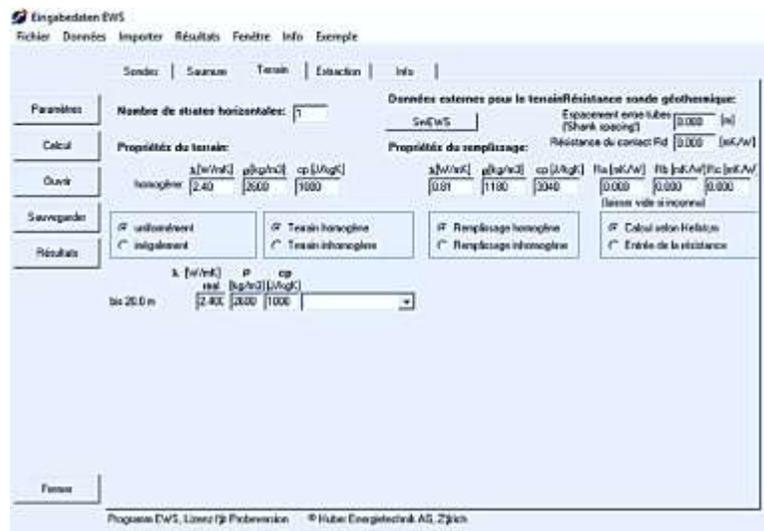


Figure (II.11) : Onglet « Terrain ».

La partie 'Propriétés du terrain' est représenté les propriétés physiques moyennes de la terre (La Conductivité thermique  $\lambda$ [W/mK] ; La masse volumique  $\rho$ [Kg/m<sup>3</sup>] et la capacité thermique spécifique  $cp$ [J/KgK]) est une aide d'entrée pour la moyenne arithmétique des propriétés physiques de toute la profondeur du forage.

Les propriétés de remplissage ' ( $\lambda$ [W/mK] ;  $\rho$ [Kg/m<sup>3</sup>] ;  $cp$ [J/KgK]) sont utiliser pour le calcul des résistances de forages  $R_a$  et  $R_b$  et  $R_c$ .

Si l'entrée 'Calcul selon Hellström', est sélectionnée alors il n'est pas nécessaire de saisir les valeurs des résistances thermiques  $R_a$  et  $R_b$  et  $R_c$ . Dans ce cas, le programme EWS calcules les résistances thermiques lors de la prochaine exécution en utilisent les équations d'Hellström 1991). La partie 'Espacement entre tubes' est calculée à partir du diamètre du trou de forage et du diamètre du tuyau.

Si on sélectionne sur la partie 'Uniformément' alors les couches sont également espacées. La partie 'inégalement' doit être sélectionner pour entrer des couches avec des profondeurs variables, pour chaque couche horizontale apparait une ligne pour entrer ses propriétés. Soit les propriétés peuvent être saisies directement dans les cellules, soit un type de terre peut être sélectionner dans le menu déroulant.

### III.4. Onglet « Extraction »

Le profil de charge des forages est renseigné dans cet onglet (Figure II.12).

Figure (II.12) : Onglet « Extraction » avec l'entrée du temps de fonctionnement journalier de la pompe à chaleur.

Si la question 'Crées un nouveau profil de charge avec les valeurs suivantes ?' est répondu par « Oui », un profil de chargement avec les données d'entrées de cette feuille est créé. Si la réponse est « non » le programme utilise les données d'entrées horaires d'un fichier d'entrée externe,

Il existe 2 options pour créer un profil de charge :

- L'entrée d'un temps de fonctionnement quotidien de la pompe à chaleur.
- L'entrée de l'extraction de chaleur mensuelle, un moins doit être ajouté à la durée de fonctionnement des mois pendant lesquels les trous de forage sont utilisés pour le refroidissement.

Le taux d'extraction de chaleur 'puissance d'extraction des sondes en mode chauffage [KW]' doit noter avec un signe positif, le taux d'injection de chaleur en condition de refroidissement 'puissance d'injection dans les sondes en mode rafraichissement [KW]' doit être noté également avec un signe positif.

Il existe une option pour simuler la charge de pointe dans le cas de chauffage:

- La durée de cette période est définie avec l'entrée dans le champ,
- Durée du fonctionnement continu des sondes fin février (jours).

La période est toujours simulée à la fin du mois de février, qui est la période la plus fraîche de l'année.

La partie 'puissance d'extraction en fonctionnement continue [KW]' définit le taux d'extraction de chaleur pendant cette période qui est égale au taux d'extraction de chaleur.

### **III.5. L'onglet « Charge » :**

Cet onglet est une autre possibilité de saisie la charge du forage.

On clique sur « Données » (Figure II.13) et ensuite sur le menu déroulant 'charge' et dont cette fenêtre est apparue au lieu du fenêtre « Extraction ». La fiche « Charge » (Figure II.14) a besoin en entrée de l'énergie de chauffage mensuelle pour calculer l'extraction de chaleur des forages en utilisant le COP d'une pompe à chaleur.

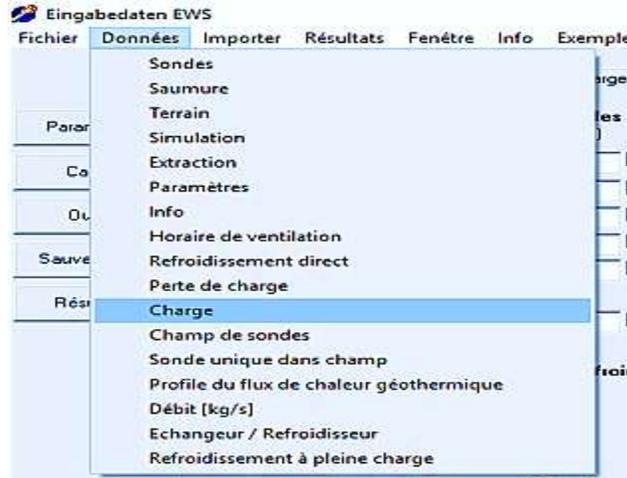


Figure (II.13) : Sélection d'onglet « Charge ».

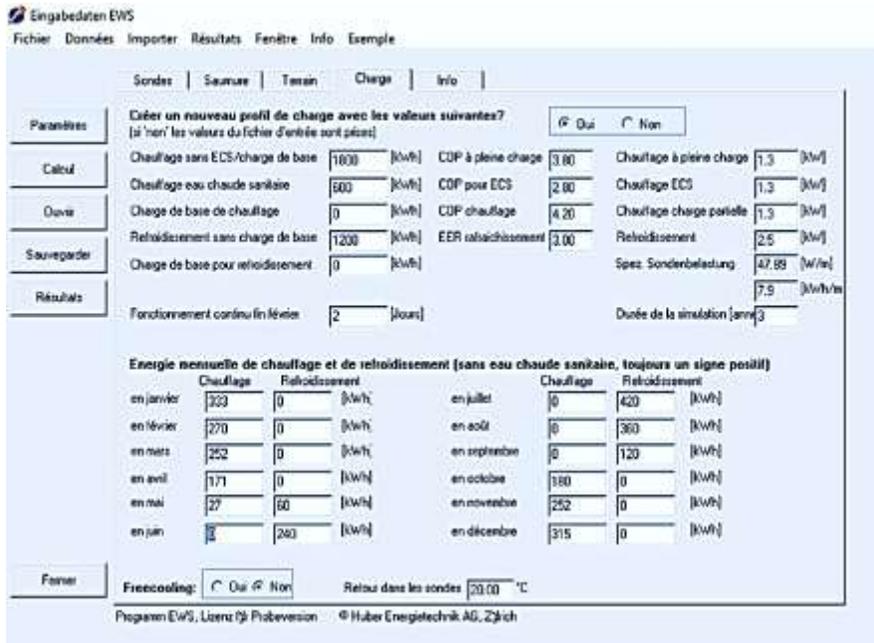


Figure (II.14) : L'onglet « Charge » avec l'entrée de l'énergie du chauffage.

Dans cette fiche la demande mensuelle d'énergie de chauffage et de refroidissement est définie, ces énergies sont en [KWh] et avec un signe positif.

Dans le cas de chauffage, le taux d'extraction de chaleur du forage est réduit par la puissance du compresseur qui peut être calculée avec le COP. Le taux d'injection de chaleur en condition de refroidissement est calculé avec l'EER (COP<sup>-1</sup>).

Si la question 'Créer un nouveau profil de charge avec les valeurs suivantes ?' est répondu par « Oui », le profil de charge est calculé avec les valeurs des champs

(toutes les cellules de cette feuille), si la réponse « non » le profil de charge est extrait du fichier d'entrée et les champs sont ignorés.

L'entrée 'chauffage a plein charge' représente le taux d'extraction de chaleur pendant la charge maximale, (Fin février). L'entrée 'Fonctionnement continue fin février' représente la durée d'extraction de chaleur pendant la charge maximale fin février.

'COP chauffage' représente le COP moyen de la pompe à chaleur pendant la période de chauffage. 'Chauffage charge partielle' représente le taux d'extraction de chaleur pendant une charge partielle. Ce taux d'extraction de chaleur est arrondi pour être égal à l'énergie de chauffage totale dans les cellules 'énergie mensuelle de chauffage et de refroidissement'.

L'entrée 'Durée de la simulation (année)' représente la durée de simulation (maximum 100 ans). Toujours la dernière année de la période est évaluée.

#### **IV. RESULTATS DE LA SIMULATION :**

Si tous les sous-menus ont été correctement remplis, le calcul peut être lancé. Le programme calcul les températures d'entrée et de sortie et moyenne du fluide caloporteur pour chaque mois. Ensuite, les deux températures pour chaque mois peuvent être affichées graphiquement. Cependant, pour la présentation définitive des données, un fichier de sortie doit être créé à partir duquel les données peuvent être copiées dans un programme graphique (par exemple Excel) et affichées.

#### **CONCLUSION**

Le logiciel EWS est un programme excellent pour simuler les sondes géothermiques. Il contient plusieurs paramètres de calcul le comportement des échangeurs de chaleur de forage et aussi la température d'entrée et de sortie, ainsi que le taux d'extraction de chaleur des trous de forage (unique ou champ des trous). Il est possible de calculer jusqu'à 150 sondes dans un champ de sondes.

**REFERENCES :**

- [1] Silvio Maraini, VERGLEICH VON SOFTWARE ZUR DIMENSIONIERUNG VON ERD. Thèse de Doctorat, Université Technique Fédérale de Zurich, Mars 2000.
- [2] Martin Stalder and al. Erweiterung der Programms WPCalc mit dem Berechnungsmodul für Erdwärmesonden EWS, Août 2001.
- [3] « Huber - Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfe.pdf ».
- [4] « Vortrag\_EMPA1.pdf ». Consulté le : juin 26, 2021.
- [5] « Méthode de Crank-Nicolson », Wikipédia. janv. 03, 2019. Consulté le : juin 26, 2021.
- [6] Per Eskilson, Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Grahns Boktryckeri AB, Lunds, Juin 1987
- [7] D. E. Shafai et al., « auf dem dynamischen Prüfstand », p. 50.
- [8] A. Huber, « Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder », p. 102.
- [9] « Direktheizsonde.pdf ». Consulté le : juin 26, 2021.
- [10] « Programm EWS - Huber Energietechnik AG | Manualzz », manualzz.com.
- [11] « MTTTH.pdf ». Consulté le : juin 26, 2021.
- [12] « pfe.gm.0036.pdf ». Consulté le : juin 26, 2021.
- [13] V. Godefroy, « ÉLABORATION ET VALIDATION D'UNE SUITE ÉVOLUTIVE DE MODÈLES D'ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES VERTICAUX », p. 161.
- [14] « Transfertdechaleur-vol1.pdf ». Consulté le : juin 26, 2021.
- [15] « 8161230.pdf ». Consulté le : juin 26, 2021.
- [16] P. Hudon, « MODÉLISATION DE PUIITS GÉOTHERMIQUES PAR CHARGES HORAIRES », p. 132.
- [17] A. Huber, « Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder », p. 102.
- [18] N. Khalkhal, « Pompe à chaleur géothermique », Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012. Consulté le : juin 27, 2021.
- [19] « FULL\_TEXT.pdf ». Consulté le : juin 27, 2021.
- [20] S. Chapuis, « STOCKAGE THERMIQUE SAISONNIER DANS UN CHAMP DE PUIITS GÉOTHERMIQUES VERTICAUX EN BOUCLE FERMÉE », p. 192.
- [21] Q. Liao, C. Zhou, W. Cui, et T.-C. Jen, « Effective Borehole Thermal Resistance of a Single U-Tube Ground Heat Exchanger », Numer. Heat Transf. Part -Appl. - NUMER HEAT Transf. PT -APPL, vol. 62, p. 197 210, août 2012, doi: 10.1080/10407782.2012.691061.

[22] A. Huber, « Calculation of Borehole Heat Exchangers », Software Manual, September 2011.

## **Chapitre III : RESULTATS ET DISCUSSIONS**

## I. INTRODUCTION

Les innovations technologiques dans le domaine du dimensionnement et de la conception des échangeurs de chaleurs peuvent contribuer à améliorer les performances thermiques, par conséquent, à réduire la longueur nécessaire du forage pour satisfaire les besoins énergétiques des bâtiments, cette réduction diminue les coûts d'installation géothermique.

Ce chapitre est consacré à comparer les performances thermiques de deux types de forage coaxial et simple U à l'aide du logiciel EWS, et l'influence des différents paramètres thermiques sur leurs comportements à court et à long termes.

## II. CONFORT THERMIQUE

Le confort thermique est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il est déterminé par l'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement thermique [1]. Conformément aux normes internationales (ASHRAE55 1992 ; ISO7730 1994), les chercheurs ont généralement défini ce concept comme la condition de l'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique (Fanger 1973 ; Hansen 1990 ; Castilla et al 2014)[2]. Dans le milieu bâti, le confort thermique constitue une exigence essentielle à laquelle le concepteur doit apporter les réponses nécessaires. La détermination du confort thermique est ainsi d'une grande importance pour le bâtiment afin de lui permettre d'atteindre ses objectifs de fonctionnalités tout en justifiant, à tort ou à raison, l'installation des équipements d'ambiance (chauffage, ventilation et climatisation)[3].

La notion de confort thermique désigne l'ensemble des multiples interactions entre l'occupant et son environnement où l'individu est considéré comme un élément du système thermique. Pour le définir on lui associe plusieurs paramètres notamment[4] :

- **Le paramètre physique** : L'homme est représenté comme une machine thermique où sont considérés ses interactions avec l'environnement en termes d'échanges de chaleur.

- **Le paramètre psychologique** : Il concerne les sensations de confort éprouvées par l'homme et la qualification des ambiances intérieures.

Dans les années soixante-dix, Fanger a établi une méthode qui permet d'analyser et d'évaluer l'ambiance thermique en vue de déterminer les conditions de confort thermique.

La méthode de Fanger[5] consiste à déterminer de façon analytique les échanges de chaleur entre le sujet et l'environnement. Puis en fonction de l'écart entre la chaleur produite et la chaleur dissipée par le corps humain, il a établi un indice PMV « Vote Moyen Prévisible » ; cet indice a été déterminé statistiquement à partir des études expérimentales sur près de 1300 sujets dans des chambres climatiques, pour déterminer l'acceptabilité de l'ambiance thermique[3]. Il a utilisé les principes du bilan thermique pour relier les facteurs clés du confort thermique (taux métabolique, isolation des vêtements, température de l'air, température radiante, vitesse de l'air et l'humidité) à la réponse moyenne des personnes sur l'échelle présentée dans le tableau III.1 [5]

<b>Echelle descriptive ASHRAE</b>	<b>Numérique</b>
Très chaude	+3
Chaude	+2
Tiède	+1
Neutre	0
Peu de fraîcheur	-1
Fraîcheur	-2
Froide	-3

Tableau (III.1) : Echelle de confort thermique (ISO, 1994, ASHRAE-55,2010)[6].

Ce tableau signifie les normes de confort thermique en introduisant la norme ISO, 1994 et sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE, 2010. A chacun de ces terme est associée une valeur de Vote Prévisible Moyen « PMV » entière allant de -3 pour « froide » à +3 pour « Très chaude » qui exprime une sensation de confort thermique « Inconfortable », en passant par une valeur de « PMV » nulle exprimant une sensation de confort optimale « Confortable ».

En 1978 Humphreys [6], a établi une relation entre la température de confort et la température moyenne extérieure :

$$T_c = 13,5 + 0,54T_0 \quad (\text{III-1})$$

$T_0$  : Température moyenne mensuelle de l'air extérieur [K].

### III. PARAMETRES INFLUENÇANT LE CONFORT THERMIQUE

Le confort thermique dépend de plusieurs paramètres tels que :

- Température de l'air,
- Température de surface,
- Radiations solaires incidentes,
- Humidité relative,
- Vitesse de l'air.

#### III.1. Caractéristiques géographiques

La Wilaya de Tlemcen (Figure III.1) est située sur le littoral Nord-ouest du pays et dispose d'une façade maritime de 120 km. C'est une wilaya frontalière avec le Maroc, avec une superficie de 9 017,69 km<sup>2</sup> [7]. Il s'agit d'une région située géographiquement dans l'extrême ouest algérien à 1°27' et 1°51' de longitude ouest et à 34°27' et 35°18' de latitude nord [8].

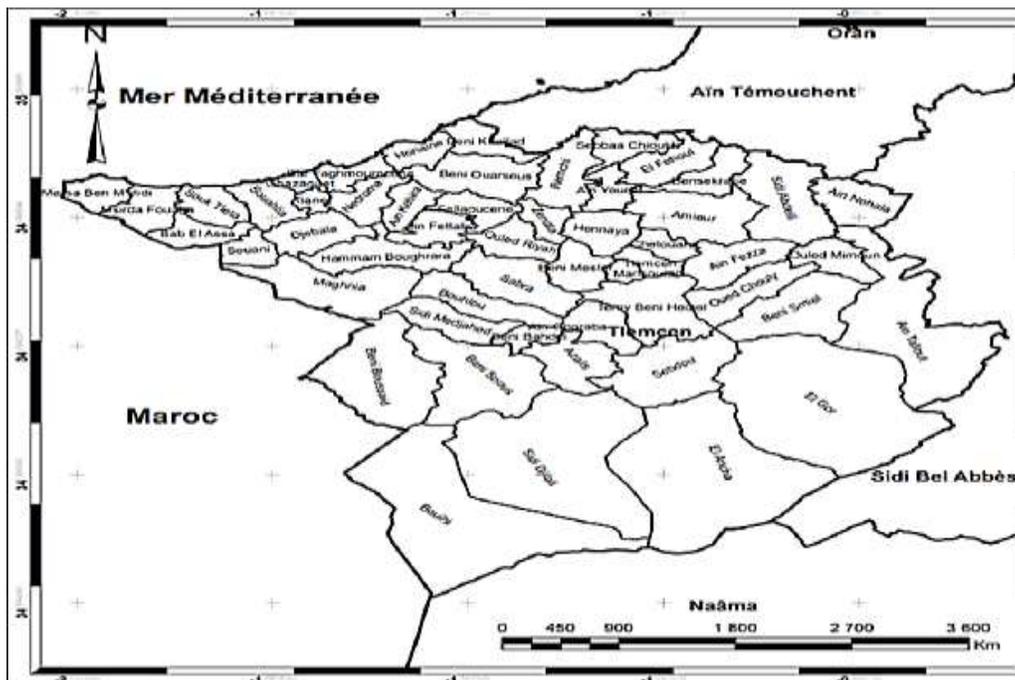


Figure (III.1): Situation géographique de la wilaya de Tlemcen[11].

Tlemcen à un climat méditerranéen, les étés sont courts, très chauds, humides, et les hivers sont longs, frisquets, venteux et partiellement nuageux. Au cours de l'année la température varie généralement de 2°C à 32°C, et est rarement inférieure à -2°C ou supérieur à 36°C [9]. Les précipitations varient de 60 mm entre le plus sec et le plus humide des mois (Tableau III.2). Une différence de 18,1°C existe entre la température la plus basse et la plus élevée sur toute l'année.

Mois	Température moyenne (°C)	Température minimale moyenne (°C)	Température maximale (°C)	Précipitations (mm)	Humidité (%)
<b>Janvier</b>	7,1	2,5	13	62	69
<b>Février</b>	7,9	2,9	13.7	52	69
<b>Mars</b>	10,6	5,2	16.8	59	67
<b>Avril</b>	13,2	7,4	19.5	55	65
<b>Mai</b>	16,8	10,6	23.2	38	61
<b>Juin</b>	21,5	14,8	28.1	11	55
<b>Juillet</b>	25,2	18,3	32.2	2	48
<b>Aout</b>	25,3	18,7	32.3	5	50
<b>Septembre</b>	21	15,2	27.5	23	59
<b>Octobre</b>	17,1	11,7	23.5	41	63
<b>Novembre</b>	11	6,5	16.5	61	67
<b>Décembre</b>	8,2	3,9	13.9	45	70

Tableau (III.2) : Données climatique de la Wilaya de Tlemcen [10].

### III.2. Radiations solaires

Le rayonnement solaire est le principal facteur pour les niveaux de confort thermique. Toute utilisation du rayonnement solaire doit tenir comptes les conditions climatiques locales et régionales. Il est généralement admis que tout les processus atmosphériques qui sont observés sont une conséquence du rayonnement solaires reçu.

La figure (III.2) montre la variation annuelle du rayonnement global direct, du rayonnement diffusé horizontal et du rayonnement global pour un plan incliné. La plus forte croissance du rayonnement total se situe entre Février et Mars et le maximum est obtenu en Juillet pour l'horizontal, avec une légère stabilité du rayonnement global pour un plan incliné entre Mars et Octobre. Les valeurs annuelles du rayonnement solaires diffus représentent 35 à 44% du rayonnement global.

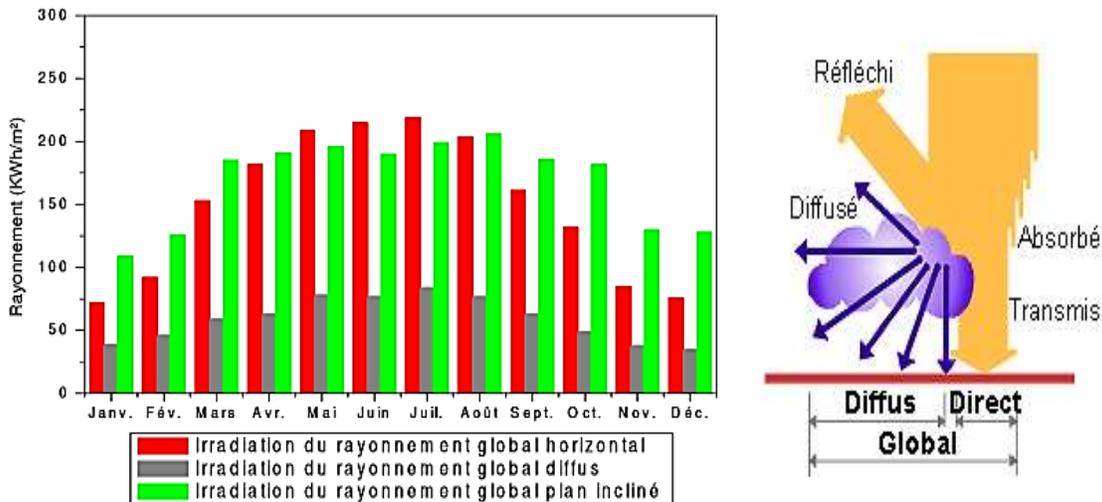


Figure (III.2) : Variation du rayonnement horizontal, global, diffus et plan incliné global à Tlemcen [12].

### III.3 Humidité relative

L'humidité relative est l'un des principaux paramètres influençant le confort du bâtiment. Selon Othman et al (2015) [13], l'humidité est définie comme la teneur en vapeur d'eau de l'air. C'est la pénétration de l'eau à travers les murs et certains éléments du bâtiment à proximité d'une source d'eau. La capacité de l'air à retenir l'humidité augmente avec la température. L'humidité relative a une influence directe sur la capacité de l'occupant à évacuer l'excès de chaleur, mais tous les individus ne peuvent pas définir avec précision si l'air est humide ou sec, sauf si la valeur d'humidité relative est inférieure à 30% ou supérieure à 70%, deux situations où le confort apparaît et se fait réellement sentir.

La ville de Tlemcen est caractérisée par une humidité relative modérée, le maximum d'humidité est observé au cours des mois de Janvier et Décembre, ainsi qu'un minimum durant le mois de juillet [13].

#### **III.4. Vitesse de l'air**

La vitesse de l'air est un paramètre à prendre en considération, car elle influence les échanges de chaleurs par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau. A l'intérieur des bâtiments, on considère généralement que l'impact sur le confort des occupants est négligeable tant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s [14].

#### **III.5. Température de l'air**

La température de l'air ou la température ambiante ( $T_a$ ) est un paramètre important du confort thermique, c'est la température qui circule autour des occupants en déterminant le flux de chaleur entre l'air et l'individu. La température minimale pour le confort thermique dépend des autres paramètres comme la nature de travail effectué et le type de local. La température de confort intérieur ( $T_c$ ) est calculée à partir des températures extérieures moyennes ( $T_{moy}$ ) et reportée sur une base mensuelle comme la moyenne mensuelle du maximum quotidien ( $T_{max}$ ), du minimum quotidien ( $T_{min}$ ) et de la température moyenne de l'air extérieur ( $T_{moy}$ )[15].

### **IV. BESOINS ENERGETIQUES**

#### **IV.1. Nombre de degré jours pour le chauffage et/ou le refroidissement**

La consommation de l'énergie est liée à l'écart de température entre l'ambiance intérieure et extérieure du bâtiment. Or la température varie d'un lieu à un autre. En utilise la notion de 'degré jour ' pour déterminer la quantité de chaleur consommée sur une période donnée et pour effectuer des comparaisons entre des bâtiments situés dans des régions climatiques différents. Le principe consiste à additionner les écarts de température existants entre l'intérieur et l'extérieur, jour après jour.

Dans la période de chauffage le nombre de degré jour est égale au produit du nombre de jours chauffés multiplié par la différence entre la température intérieur moyenne du local considéré et la température extérieure moyenne[16].

$D_j = \text{Nombre de jours chauffés} \times (T_{\text{intérieure moyenne}} - T_{\text{extérieure moyenne}}) \dots\dots\dots(\text{III-2})$

Le degré jour de refroidissement est identique au degré jour de chauffage, sauf qu'il mesure le besoin de climatisation domestique pendant les mois chauds d'été.

Les Degrés Jours Unifiés «  $D_{JU}$  » permettent d'estimer la consommation d'énergie thermique en proportion de la rigueur de l'hiver pour maintenir un bâtiment confortable [17].

La connaissance des températures moyennes horaires et mensuelles est nécessaire pour évaluer le nombre de degré jour unifiés  $D_{JU}$  pour le chauffage et le refroidissement pour le site de Tlemcen (Figure III.3).

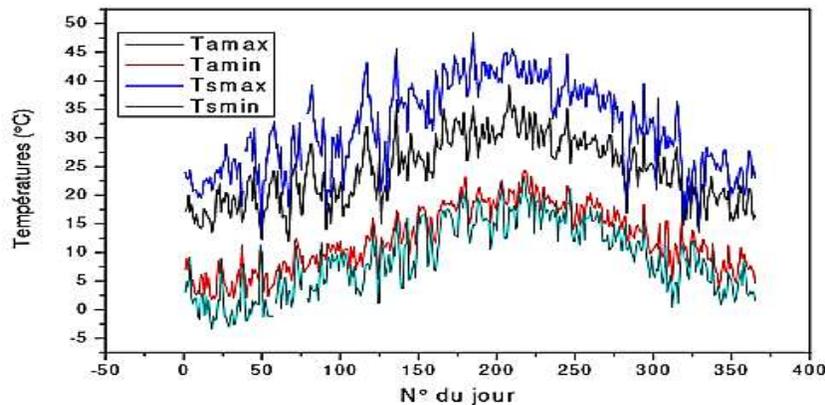


Figure (III.3) : Variation des températures journalières (Max et Min) ambiantes et au sol du site de Tlemcen[18].

A partir des résultats obtenus et présentés sur la figure (III-3) l'écart entre les températures maximales et minimales du site de Tlemcen ne dépasse pas 10°C quelle, que soit la saison.

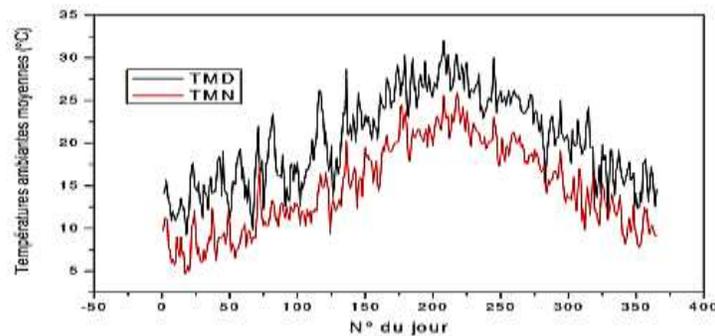


Figure (III.4) : Variation journalière des Températures ambiantes Moyennes Diurnes (TMD) et Nocturnes (TMN) du site de Tlemcen[18].

La figure (III.4) montre la variation des températures ambiantes moyennes journalières et le calcul du nombre de degré jour durant toute l'année pour un bâtiment implanté à Tlemcen.

A partir des données enregistrées présentées dans la figure (III.4), nous pouvons tirer les valeurs du degré jour dans le (Tableau III.3).

<b>Mois</b>	<b>Température de Confort Tc</b>	<b>Températures Moyennes Ambiantes</b>	<b>Dj Pour Le Chauffage (Tc)</b>	<b>Dj Pour La Climatisation (Tc)</b>
<b>Janvier</b>	19,4184	10,43	192,5	
<b>Février</b>	20,1879	12,01	134	
<b>Mars</b>	21,4245	13,9	146	
<b>Avril</b>	22,1679	15,2	125,5	
<b>Mai</b>	23,706	17,89	91	
<b>Juin</b>	25,92	22,11		30
<b>Juillet</b>	27,2646	24,46		8
<b>Aout</b>	27,189	24,19		19
<b>Septembre</b>	26,109	22,38		27
<b>Octobre</b>	23,9841	18,5	93,5	
<b>Novembre</b>	22,064	15,56	117,5	
<b>Décembre</b>	20,5119	12,95	152	
<b>Total</b>			1052	84

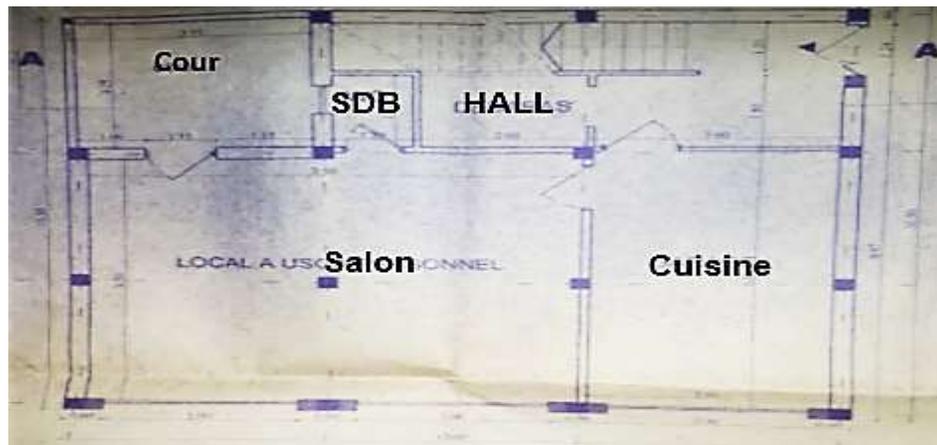
Tableau (III,3) : Calcul du nombre de degrés jours mensuel (DJ) [18],

D'après le tableau (III,3), le site de Tlemcen est caractérisé par une durée de chauffage beaucoup plus longue (d'octobre à mai) dont le nombre de Dj pour la température de confort calculée pour chaque jour est Dj=1052,

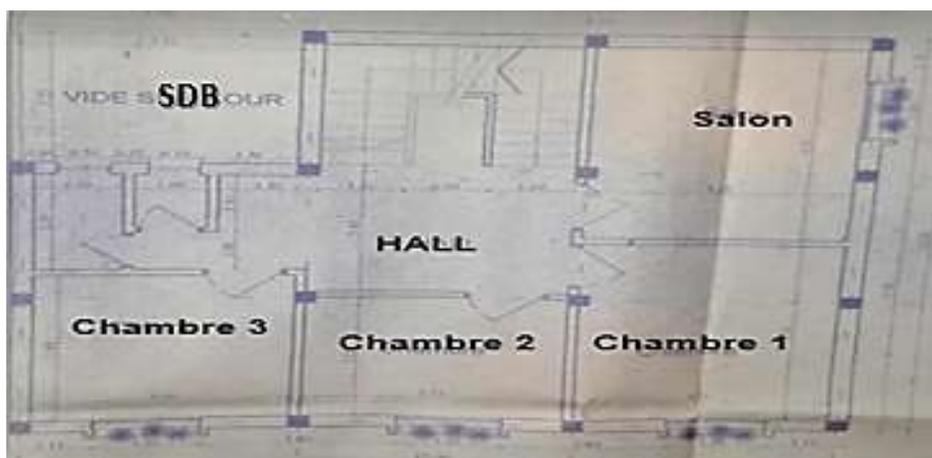
Et une courte durée de refroidissement (de juin à septembre) où le nombre de Dj pour la température de confort calculée pour chaque jour est Dj=84.

## V. Description de l'habitat étudié

Le plan architectural de l'habitat étudié est construit comme suit (Figure III,5) avec une surface habitable de 126 m<sup>2</sup> conçue en Rez-De-Chaussée (RDC) plus un étage, Le RDC comporte un Hall, une cuisine, un salon, une Salle De Bain (SDB), et une petite cour, Le premier étage contient un salon, 3 chambres, un hall, et une SDB, Les murs extérieurs sont en brique et comportent une couche double parois de 30 cm, les murs intérieurs sont en brique et ont une épaisseur de 15 cm le coefficient de transmission thermique des murs ( $U=3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), La dalle en béton fait 20 cm ( $U=4\text{W/m}^2\text{K}$ ), les fenêtres en simple vitrage ( $U=2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) et les portes intérieures sont en bois ( $U=2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), les portes extérieures sont en fer ( $U=5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), Le volume habitable est de  $V_h=839,16\text{m}^3$ ,



Rez-de-Chaussée



1<sup>er</sup> Etage

Figure (III.5) : Plan architectural de l'habitat,

Nous avons répertorié les déperditions de chaque élément de l'habitat, en tenant compte de la superficie de chaque pièce, ainsi que les différents coefficients de transmission thermique U des éléments de construction sur le Tableau (III.4) :

$$P = U S [W/°C], \quad (III-3)$$

U : Coefficient de transmission thermique d'isolant [ $W/m^2K$ ],

S : Surface d'isolant [ $m^2$ ],

Déperditions		Murs	Fenêtres	Portes	Plafond	Total des Déperditions
Coefficient U ( $W/m^2K$ )		3,5	2,5	2,5/5,8	4	
<b>Rez de Chaussée</b>						
Salon	S	95,2- 14,625	6	8,625	48,75	
	U, S	282,0125	15	21,5625	195	513,575
Cuisine	S	58,48- 8,75	3	5,75	24,48	
	U, S	174,055	75	14,375	97,92	361,35
Hall	S	37,4- 5,975	-	5,975	18,6	
	U, S	110	-	24,8	74,4	209,2
SDB	S	10,2- 3,125	0,25	2,875	2,16	
	U, S	24,7625	0,625	7,1875	8,64	41,215
<b>1<sup>er</sup> étage</b>						
Salon	S	50-5,35	2,25	3,1	18,7125	
	U, S	156,275	5,625	7,75	74,85	244,5
Chambre1	S	48,6772- 5,125	2,25	2,875	17,85	
	U, S	152,4327	5,625	7,1875	71,4	236,6452

<b>Chambre2</b>	S	40,04- 5,125	2,25	2,875	12,1875	
	U, S	122,2025	5,625	7,1875	48,75	183,765
<b>Chambre3</b>	S	42,614- 5,125	2,25	2,875	13,86	
	U, S	131,2115	5,625	7,1875	55,44	199,464
<b>Hall</b>	S	27,885- 8,85	-	8,85	12,5	
	U, S	66,6225	-	22,125	50	138,7475
<b>SDB</b>	S	28,314- 5,98	0,98	5	6,125	
	U, S	78,169	2,45	12,5	24,5	117,619

Tableau (III.4) : Totale des déperditions d'énergie dans l'habitat.

La somme totale des déperditions de l'habitat est de :

$P = \Sigma(U.S) = 2246,08 \text{ W/}^\circ\text{C}$ , dont le coefficient G de déperdition volumique est :

$$G = \frac{P}{V_h} = 2,68 \text{ W/m}^3\text{C} \quad (\text{III.4})$$

Bien qu'il soit difficile de tenir compte des exigences thermiques des occupants de la maison, ces dernières, accepteront-ils de ne pas utiliser certaines pièces en hiver pour le chauffage ou en été pour la climatisation compte tenu de tout ça, on peut alors évaluer les besoins comme suit [18],

$$C = 24 G V_h D_j \quad (\text{III.5})$$

Les besoins annuels de chauffage :

Pour la température de confort calculer  $T_c$ , d'octobre à mai :  $D_j = 1052$

$$C = 5678,14 \text{ KWh}$$

Les besoins annuels de climatisation :

Pour la température de confort  $T_c$ , de juin à septembre :  $D_j = 84$

$$C = 453,39 \text{ KWh}$$

## VI. CARTE DES SOLS D'ALGERIE

Le sol est un élément du milieu naturel lié à la fois à la structure, au modelé, à la végétation, au climat et à l'action de l'homme. Il Rend compte de l'évolution passée et présente de ce milieu naturel donc il exprime l'équilibre, La classification des sols de l'Afrique du nord de Del Villar est fondée sur la définition d'un certain nombre de « types », selon la méthode classique [19]. A adaptée aux sols méditerranéens, au lieu de se fonder sur la structure ou le degré de lessivage, cette classification est fondée sur la distinction du métabolisme propre de chaque type de sol, métabolisme variant d'après sa composition et le milieu, Ainsi, trois grands types de sol sont distingués en Afrique du nord :

- Types sodiques (sols salins ou alcalins),
- Types calcaires (les plus répandus),
- Types sial ferriques.

En effet la classification des sols d'Algérie est d'abord fondée sur le facteur climatique qui a joué le rôle essentiel dans la formation du sol (vent, pluie, température).

Les régions telliennes d'Algérie comme (Tlemcen, Oran, Alger...etc.) sont caractérisés par un type de sol humide où l'humidité et les végétaux deviennent les principaux facteurs de la formation des sols zonaux.

J.H. Durand [19] classe ces régions humides en trois grands groupes [19] :

**Groupe calcaire :** comporte tous les sols formés à partir de la roche calcaire, Ces sols sont très répandus en Algérie où ils couvrent de grandes surfaces.

**Groupe non-calcaire :** qui comporte les sols formés sur roche mère non calcaire (le granite de Nedroma par exemple), ou encore des éléments argileux imperméables (sols formés par les schistes, les micaschistes, basaltes, gravier sec et humide, granite basique, ainsi que sur les alluvions argileuses,

**Groupe de terre rouge méditerranéenne :** Il s'agit des sols fortement rubéfiés qu'on rencontre fréquemment en Algérie, Leur aspect est variable suivant les régions, et on peut trouver ces sols en profils normaux sur des terrasses alluviales ou mélangés intimement à des affleurements des roches mères [19].

### VII, Modélisation et Simulation Des Sondes Géothermiques Coaxiale et Simple U :

Cette analyse a été menée à travers des simulations réalisées avec le logiciel EWS, qui permet de faire une comparaison de performance thermiques des échangeurs de chaleur coaxial et simple U à court terme (une année de simulation) et à long terme (30 années de simulation). On considère deux types de sol avec des valeurs de conductivité thermique différentes, Ces échangeurs de chaleurs alimentent une pompe à chaleur qui assure le chauffage, le refroidissement et la production d'eau chaude sanitaire du bâtiment.

Les deux types de sol utilisés dans cette étude sont : Le calcaire et le gravier (Tableau III,5) car ce sont les types de sol les plus répandus dans la région de Tlemcen.

Le type du sol	Propriétés du sol		
	$\lambda$ (W/mK)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	cp (J/KgK)
<b>Le Calcaire</b>	2,75	2400	1350
<b>Le gravier</b>	0,8	2000	800

Tableau (III.5) : Propriétés des types de sol.

Cette simulation a été réalisée à l'aide des entrées suivants :

#### VII.1. Fluide Caloporteur

On choisit l'eau comme fluide caloporteur (Tableau III,6).

Conductivité thermique $\lambda$ (W/m, K)	0,572
Densité du fluide $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1000
Chaleur spécifique du fluide cp (J/kg, K)	4204
Viscosité cinématique du fluide (m <sup>2</sup> /s)	0,0000015
Débit (kg/s)	0,079

Tableau (III.6) : Caractéristiques du Fluide caloporteur.

### VII.2. Besoins énergétiques mensuelles de l'habitat étudié

Les besoins énergétiques sont calculées (Tableau III.7) pour le chauffage et le refroidissement par l'équation (III.3):

Mois	Besoins de Chauffage MWh	Besoins de Refroidissement MWh
Janvier	1,039	0
Février	0,723	0
Mars	0,788	0
Avril	0,677	0
Mai	0,491	0
Juin	0	0,162
Juillet	0	0,043
Aout	0	0,103
Septembre	0	0,146
Octobre	0,505	0
Novembre	0,634	0
Décembre	0,820	0

Tableau (III.7) : Besoins Énergétique de la maison étudiée.

### VII.3. Implantation des sondes sur le terrain

On utilise des sondes géothermiques verticales. Ce sont les sondes les plus couramment utilisées aujourd'hui aussi bien pour l'habitation familiale que pour de plus grands bâtiments mais sont utilisées aussi principalement pour les besoins de chauffage et de refroidissement estival. Le dimensionnement d'une telle installation nécessite une connaissance précise des qualités thermiques du sous-sol, Les Sondes Géothermiques Verticales « SGV » (Figure III.6) parfois aussi appelées collecteurs forés, sont des échangeurs de chaleur à circuit dit lent où circule un fluide caloporteur, Elles sont disposées le plus souvent verticalement mais peuvent être aussi forée obliquement si nécessaire, L'implantation des trous de forage verticales nécessite un espacement d'au moins 5 à 10 m entre eux, sont réalisés à proximité de la maison ou sous celle-ci avant sa construction.

Les sondes géothermiques sont mises en place dans le forage, les tubes de ces sondes sont généralement en polyéthylène, sont testés en pression en surface leurs implantations dans le forage et avant la cimentation pour prévenir toute fuite. Il faut éviter toute cavité formée dans le forage, Après l'installation des capteurs, les forages sont ensuite remplis par un mélange de ciment et de gravier ou de sable ou de bentonite; le remplissage se fait par le bas pour éviter les bulles d'air qui réduiraient les performances des sondes, La conductivité thermique du matériau de remplissage doit être suffisante pour favoriser l'échange thermique entre le sol et le fluide caloporteur.

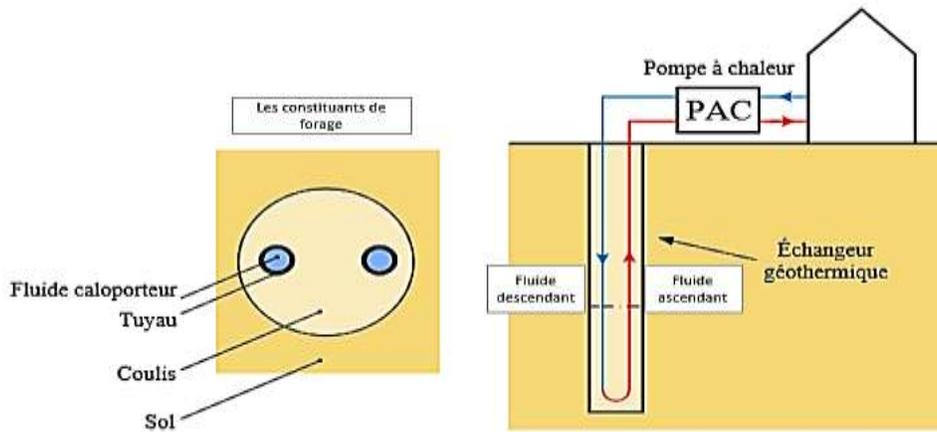


Figure (III.6) : Implantation des sondes géothermiques verticales[20].

#### VII.4. Caractéristique de l'échangeur de chaleur coaxial

Le forage coaxial (Figure III.7) est d'une forme concentrique composé de deux tubes intérieur et extérieur, le tube intérieur contient le fluide ascendant (chaud) et le tube extérieur contient le fluide descendant (froid),

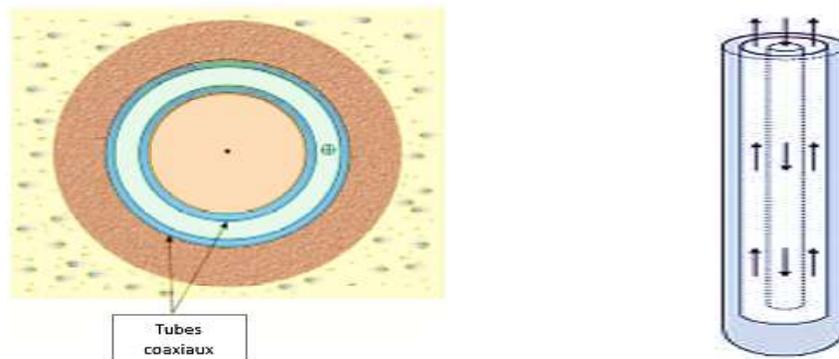


Figure (III.7) : Schématisation de la section transversale du forage coaxial [21].

DESCRIPTION	VALEUR
Diamètre de forage D (m)	0,103
Longueur de la sonde H (m)	20
<b>Tube extérieure (1)</b>	
Diamètre de la sonde $D_1$ (mm)	63
Épaisseur de paroi de la sonde $E_1$ (mm)	2,9
<b>Tube intérieure (2)</b>	
Diamètre de la sonde $D_2$ (mm)	32
Épaisseur de paroi du tube $E_2$ (mm)	3
Conductivité thermique du tube de la sonde $\lambda$ (W/mK)	0,44

Tableau (III.8) : Caractéristiques du forage coaxial.

### VII.5. Caractéristiques de l'échangeur de chaleur simple U

Le forage simple U (Figure III.8) contient un tube de forme U comme suit:

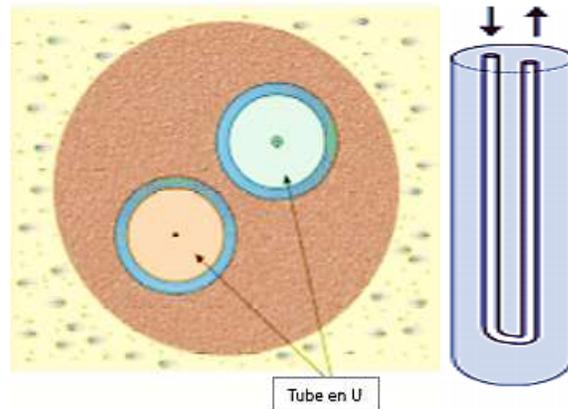


Figure (III.8) : Schématisation de la section transversale du forage simple U[21].

Description	Valeur
Diamètre de forage (m)	0,115
Longueur de la sonde H(m)	20
Diamètre de sonde (mm)	32
Épaisseur de paroi de la sonde (mm)	3
Conductivité thermique du tube de la sonde $\lambda$ (W/m, K)	0,44

Tableau (III.9) : Caractéristiques du forage simple U.

En tenant compte des besoins de chauffage, refroidissement, et la production d'Eau Chaude Sanitaire (ECS). Le Tableau III.10, donne l'énergie échangée avec le sol à partir les besoins énergétiques mensuels du bâtiment.

Mois	L'énergie extraite du sol [KWh]	L'énergie injectée dans le sol [KWh]
Janvier	792	0
Février	574	0
Mars	633	0
Avril	547	0
Mai	407	0
Juin	31	-216
Juillet	33	-57
Aout	33	-119
Septembre	32	-195
Octobre	417	0
Novembre	516	0
Décembre	658	0
Total	4673	-587

Tableau (III.10) : L'énergie mensuelle extraite et injectée dans le sol.

La figure (III.9), présente la charge thermique mensuelle extraite et injectée dans le forage. L'énergie échangée avec le sol est constante pendant la période des 3 mois de l'été (587 KWh) et les 9 mois de l'année l'automne, hiver et printemps) (4673 KWh). Les besoins d'ECS calculés par le logiciel de l'habitat étudié sont (600 KWh). La période de chauffage plus longue que la période de refroidissement.

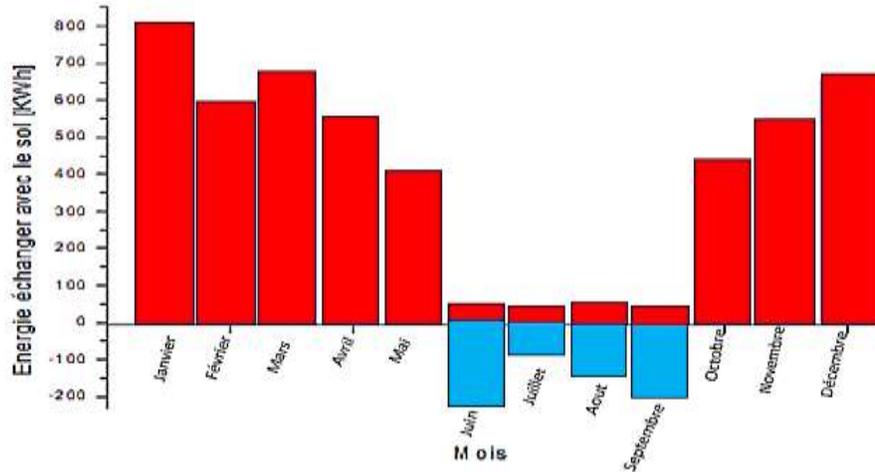


Figure (III.9) : Profil de charge thermique échangée avec le sol,

Parmi les résultats issus du logiciel EWS, les températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur, pendant la durée de simulation. La température minimale d'entrée de la sonde est environ 4 à 5°C et la température maximale de sortie est environ 16°C, la différence de température maximale sur la sonde est de 11°C.

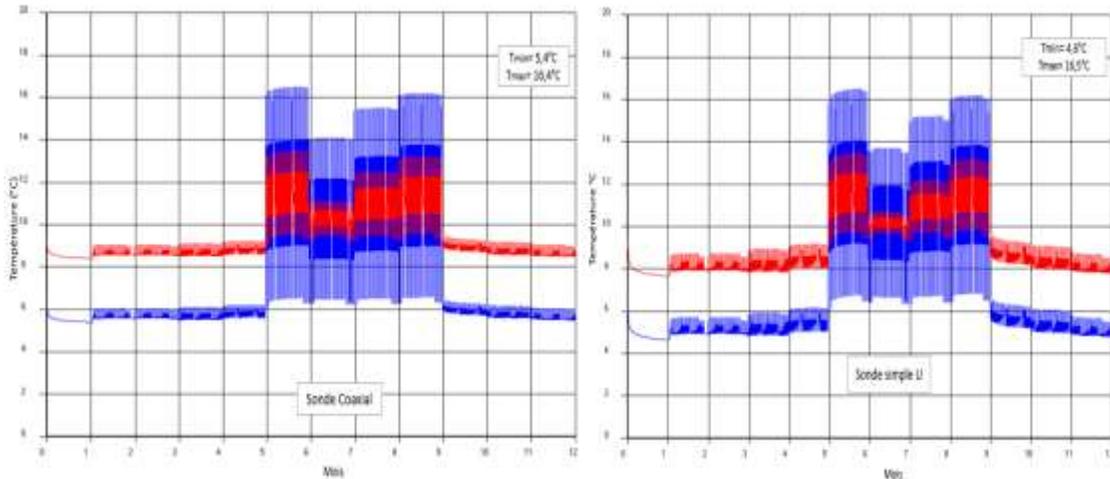


Figure (III.10) : Température d'entrée et de sortie du fluide caloporteur  
Des forages coaxial et simple U.

A partir des résultats suivants, on va constater l'évolution de la température moyenne du fluide caloporteur lors de son parcours dans les sondes, en comparant le comportement thermique des deux sondes géothermiques.

La température moyenne du fluide caloporteur est égale à la température d'entrée plus la température de sortie sur deux.

Le Tableau (III.11), présente la température moyenne du fluide caloporteur des deux forages coaxial et tube simple U au cours de la première et trentième année de simulation avec une valeur de conductivité thermique du calcaire  $\lambda=2,75\text{W/mK}$ .

MOIS	FORAGE COAXIAL		SIMPLE U	
	TEMPERATURE (°C)			
	1 <sup>ère</sup> année	30 <sup>ème</sup> année	1 <sup>ère</sup> année	30 <sup>ème</sup> année
Janvier	7,30	7,20	7,64	7,59
Février	7,20	7,10	7,64	7,59
Mars	7,14	7,04	7,64	7,59
Avril	7,50	7,40	7,71	7,66
Mai	9,71	9,61	9,57	9,52
Juin	11,14	11,04	10,71	10,66
Juillet	10,64	10,54	10,14	10,09
Août	11,29	11,19	10,57	10,52
Septembre	10,71	10,61	10,57	10,52
Octobre	7,42	7,32	7,85	7,80
Novembre	7,25	7,15	7,71	7,66
Décembre	7,14	7,04	7,57	7,52

Tableau (III.11) : Température moyenne mensuelle (à la fin du mois) du fluide caloporteur des forages coaxial et simple U ( $\lambda=2,75\text{W/mK}$  le calcaire).

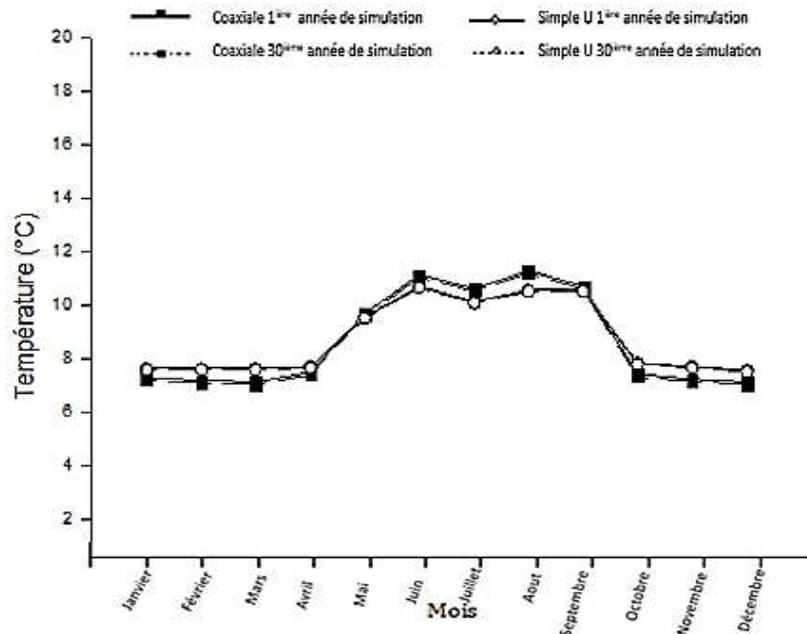


Figure (III.11) : Comparaison entre la température moyenne du fluide caloporteur des forages, coaxial et simple U ( $\lambda=2,75$  W/mK le calcaire).

Le Tableau (III.12), représente la température moyenne du fluide caloporteur des deux forages coaxiale et tube simple U au cours de la première et trentième année de simulation avec une valeur de conductivité thermique du gravier est de  $\lambda=0,8$ W/mK.

Mois	Forage	Coaxial	Simple	U
	Température (°C)			
	1 <sup>ère</sup> année	30 <sup>ème</sup> année	1 <sup>ère</sup> année	30 <sup>ème</sup> année
Janvier	5,64	5,39	6,01	5,71
Février	5,57	5,32	6,01	5,71
Mars	5,71	5,46	6,28	5,98
Avril	6,00	5,75	6,57	6,27
Mai	9,28	9,03	9,00	8,70
Juin	10,8	10,55	10,60	10,30
Juillet	10,57	10,32	10,10	9,80
Août	11,10	10,85	10,50	10,20
Septembre	10,03	9,78	10,41	10,11
Octobre	6,43	6,18	7,00	6,70

<b>Novembre</b>	5,86	5,61	6,43	6,13
<b>Décembre</b>	5,42	5,17	6,00	5,70

Tableau (III.12) : Température moyenne mensuelle (à la fin du mois) du fluide caloporteur des forages coaxial et simple U avec une conductivité thermique du sol  $\lambda=0,8 \text{ W/mK}$  (le gravier).

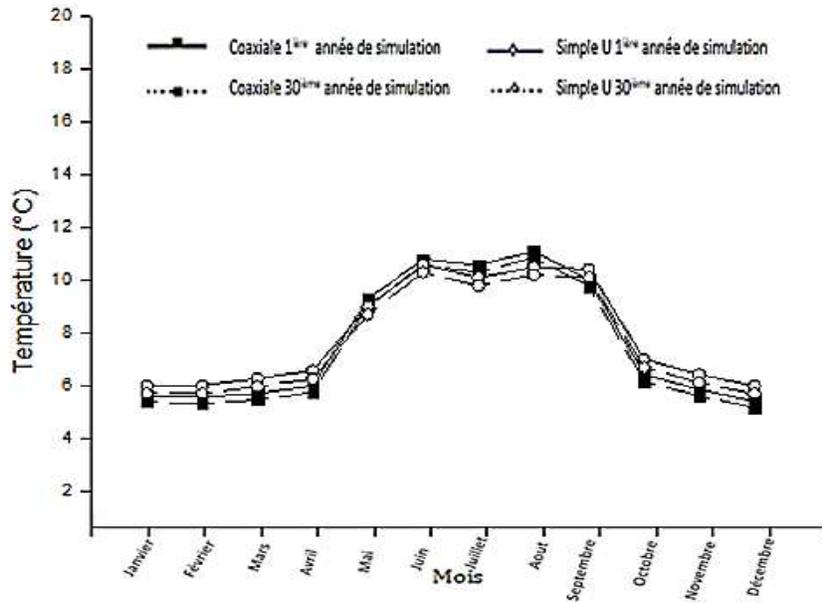


Figure (III.12) : Comparaison entre la température moyenne du fluide caloporteur des forages coaxial et simple U ( $\lambda=0,8 \text{ W/mK}$  le gravier).

Le logiciel EWS calcule la résistance thermique de forage de deux forages, coaxial et simple U comme suite :

Le Forage	Coaxial	Simple U
$R_b$ (mK/W)	0,259	0,211

Tableau (III.13) : Résistance thermique de forage  $R_b$ [mK/W]

**A court terme (une année de simulation)**

En mode de chauffage la température moyenne du fluide caloporteur du forage simple U est plus élevée que celle du forage coaxial dans les deux cas de conductivité thermique du sol ( $\lambda=2,75\text{W/mK}$  (le calcaire)) et  $\lambda=0,8\text{W/mK}$  (le gravier)) c'est dû à la résistance thermique  $R_b$  du forage simple U inférieure au forage coaxial.

En mode de refroidissement on remarque que la température moyenne du fluide du forage coaxial est plus élevée que la température du fluide du forage simple U dans les mois (Juin, Juillet, Août) à cause des différentes influences sur le terrain (les rayonnements solaires, température de l'air) sont plus élevée dans cette période.

En conséquence, l'échangeur de chaleur simple U caractérise une meilleure performance thermique, la température moyenne de fluide caloporteur est plus élevée que celle du forage coaxial en raison de la résistance thermique de forage  $R_b$  qui est plus faible.

### **A long terme (30 années de simulation)**

Après 30 années de simulation on remarque une petite diminution de la température moyenne de fluide caloporteur de  $0,1^\circ\text{C}$  au forage coaxial et de  $0,05^\circ\text{C}$  au forage simple U dans le cas de conductivité thermique du sol  $\lambda=2,75\text{W/mK}$  (le Calcaire) ; et dans le cas de  $\lambda=0,8\text{ W/mK}$  (le gravier) on obtient une diminution de  $0,25^\circ\text{C}$  au forage coaxial et de  $0,3^\circ\text{C}$  au forage simple U, Cela signifie que la température de forage est diminuée à chaque extraction de chaleur, La température de forage est égale à la température moyenne du sol à la profondeur  $H(\text{m})$  moins le taux d'extraction ou l'injection de la chaleur

En conséquence, la température du sol diminue légèrement sur le long terme jusqu'à trouver un palier en dessous duquel la température ne descend plus (30 ans en général).

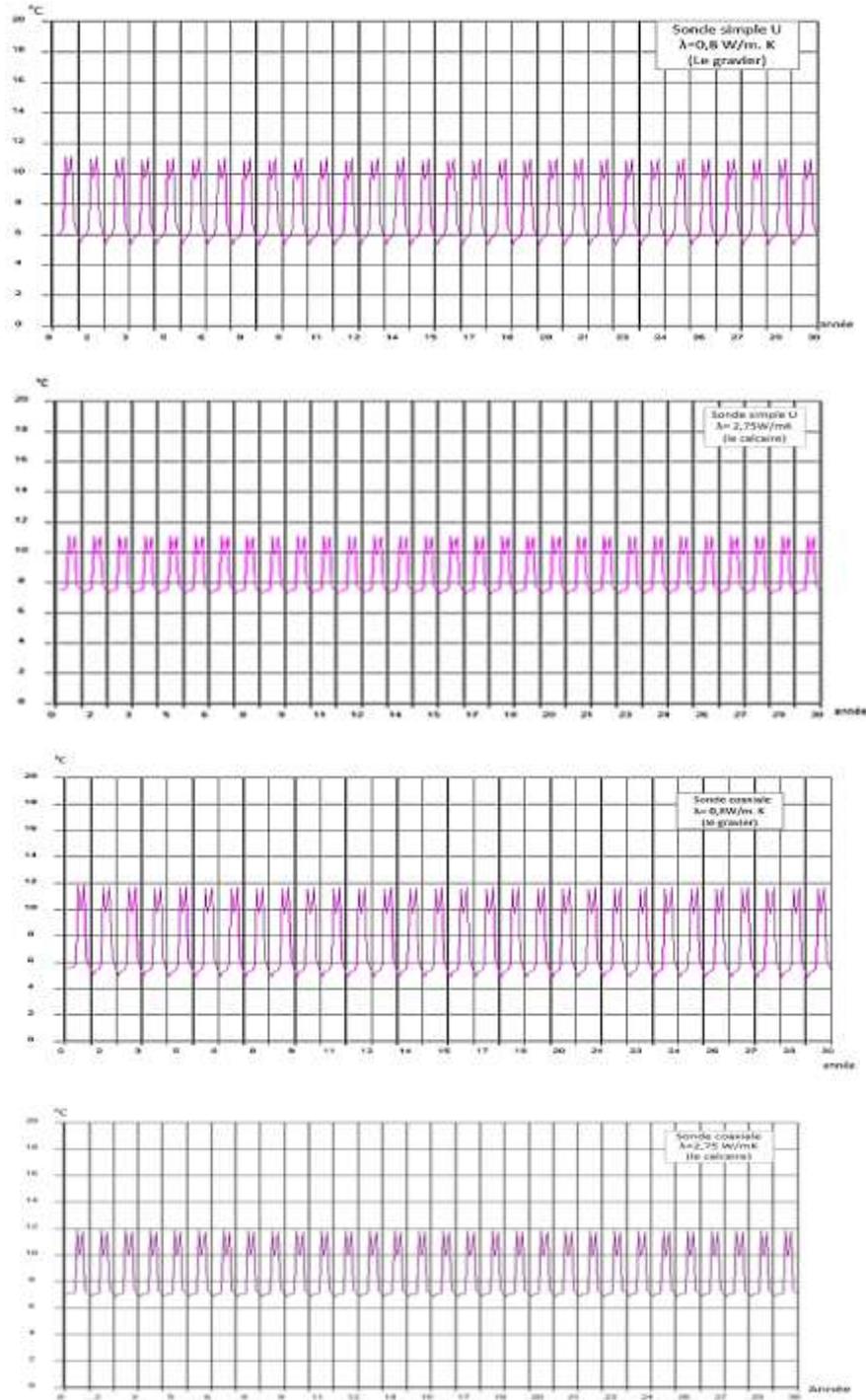


Figure (III.13) : L'évolution de la température du sol des forages coaxial et simple U après 30 ans de l'utilisation pour chauffage et rafraîchissement.

### VII.6. Influence de la conductivité thermique du sol sur le comportement thermique des échangeurs de chaleur coaxial et simple U

Dans cette étude on a effectué une comparaison entre deux types de conductivité thermique du sol  $\lambda=2,75\text{W/mK}$  (le calcaire) et  $\lambda=0,8\text{W/mK}$  (le gravier) sur le comportement thermique des deux échangeurs de chaleurs coaxiale (Figure III.14) et simple U (Figure III.15).

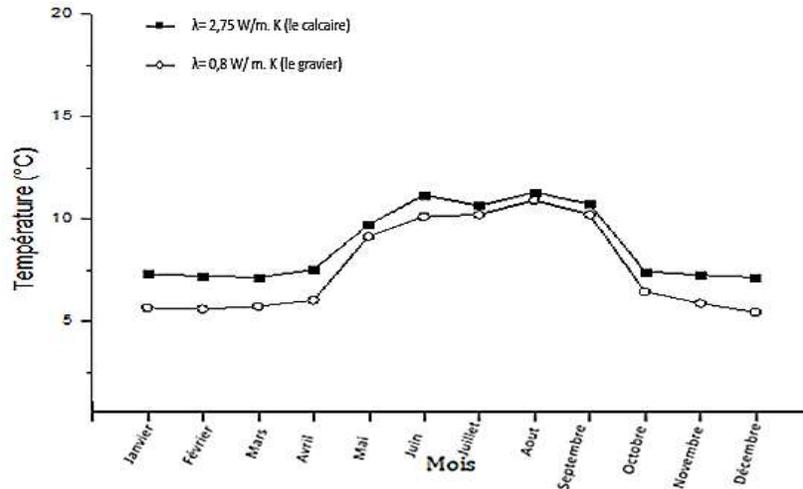


Figure (III.14) : Comparaison de l'influence thermique de deux types de conductivité thermique  $\lambda$  [W/mK] du calcaire et du gravier sur le forage coaxial.

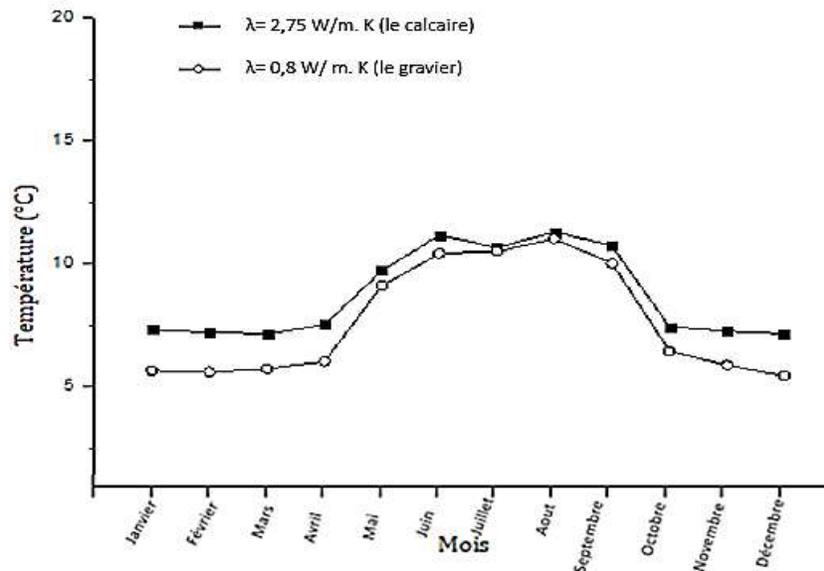


Figure (III.15) : Comparaison de l'influence thermique de deux types de conductivité thermique  $\lambda$  [W/mK] du calcaire et du gravier sur le forage simple U.

On obtient une température moyenne du fluide caloporteur dans le cas de la conductivité thermique de sol (Calcaire)  $\lambda=2,75$  W/mK plus élevée que dans le cas (Gravier)  $\lambda=0,8$ W/m.K quel que soit l'échangeur de chaleur on utilise coaxiale ou simple U.

En conséquence, la conductivité thermique  $\lambda$ [W/mK] du sol a une grande influence sur le comportement thermique des forages, plus la conductivité thermique  $\lambda$ [W/mK] du sol est élevée plus le rendement thermique des forages est mieux.

### VII.7. Influence du matériau de remplissage sur le comportement thermique des échangeurs de chaleurs coaxial et tube en U

L'étape la plus délicate dans les installations géothermiques est le remplissage des forages, A partir de cette étude on a effectuée une comparaison entre deux types du matériau de remplissage avec des conductivités thermiques différentes le premier est un coulis de ciment-gravier ( $\lambda=1,35$  W/mK) et le deuxième est un coulis de ciment-bentonite ( $\lambda=2,95$  W/mK), cette comparaison permet d'étudier le comportement thermique des deux forages coaxial et tube en U. Les résultats (Tableau III.14) suivants :

MOIS	FORAGE	COAXIAL	FORAGE	TUBE EN U
Température (°C)				
Matériaux De remplissage	$\lambda=1,35$ W/mK Ciment-gravier	$\lambda=2,95$ W/mK Ciment-bentonite	$\lambda= 1,35$ W/mK Ciment-gravier	$\lambda=2,95$ W/mK Ciment-bentonite
Janvier	7,28	7,43	7,71	7,86
Février	7,28	7,43	7,71	7,86
Mars	7,28	7,43	7,85	8,00
Avril	7,57	7,71	7,92	8,20
Mai	9,62	10,00	9,51	9,81
Juin	10,71	10,86	10,57	10,73
Juillet	10,29	10,43	10,08	10,21
Août	10,85	11,00	10,42	10,59

Septembre	10,57	10,85	10,28	10,42
Octobre	7,57	7,87	8,00	8,38
Novembre	7,35	7,57	7,78	7,95
Décembre	7,28	8,10	7,71	7,86

Tableau (III.14) : Influence thermique de deux types de matériaux de remplissage sur le comportement thermique des deux forages, coaxial et simple U.

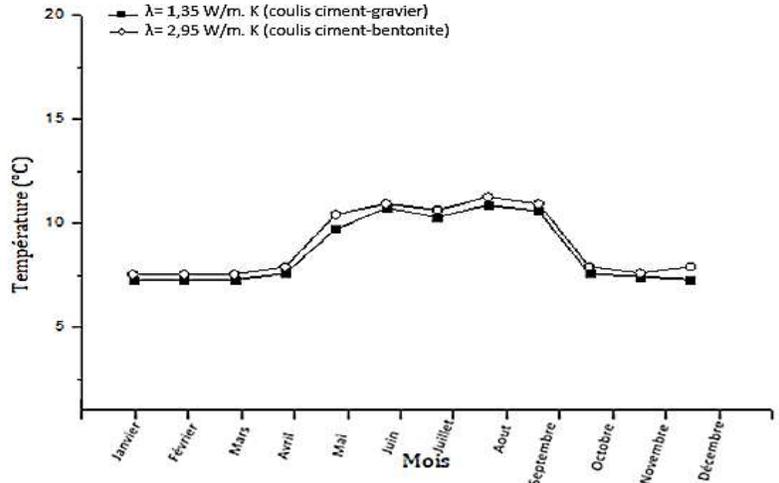


Figure (III.16) : Influence de la conductivité thermique du matériau de remplissage à la température moyenne du fluide caloporteur dans le forage coaxial.

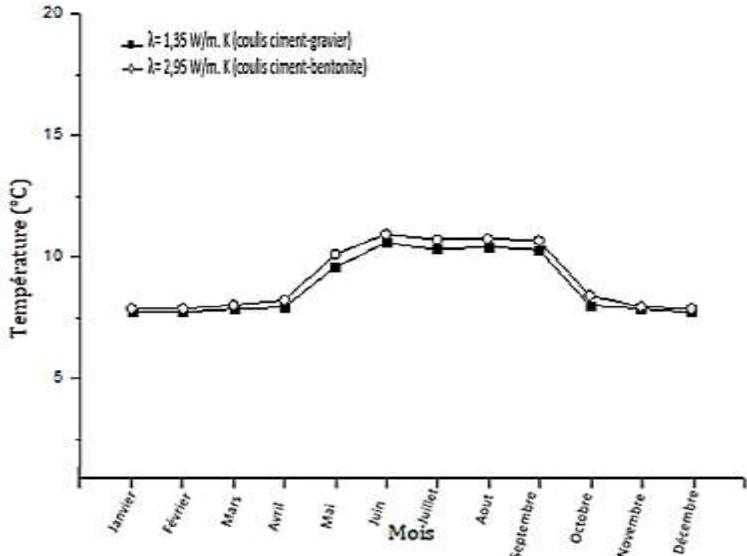


Figure (III.17) : Influence de la conductivité thermique du matériau de remplissage à la température moyenne du fluide caloporteur dans le forage simple U

A partir des figures (III.16) et (III.17) on remarque que la température moyenne du fluide caloporteur dans le cas de matériau de remplissage (Ciment-bentonite  $\lambda=2,95$  W/mK) de forage coaxial est de  $0,15^{\circ}\text{C}$  à  $0,82^{\circ}\text{C}$  que dans le cas de matériau de remplissage (Ciment-gravier  $\lambda=1,35$  W/mK), c'est la même chose pour le forage simple U la température moyenne du fluide caloporteur dans le cas (Ciment-bentonite  $\lambda=2,95$  W/mK) varie d'environ de  $0,13^{\circ}\text{C}$  à  $0,4^{\circ}\text{C}$  que dans le cas (Ciment-gravier  $\lambda=1,35$  W/mK).

En conséquence, le matériau de remplissage de conductivité thermique plus élevée présente généralement un meilleur comportement thermique à raison de la stabilité durable de la structure; plus les sondes sont stables dans le forage plus la résistance de forage est faible et alors on obtient le meilleur comportement thermique. Ce fait une conductivité thermique plus élevée permet d'économiser des mètres de forage.

### **CONCLUSION**

Le comportement thermique des échangeurs de chaleur de forage coaxial et simple U. L'analyse a été menée à travers le logiciel EWS. Ce dernier permet de déterminer la température d'entrée et de sortie et la température moyenne du fluide caloporteur parcouru dans le forage à court terme (une année de simulation) et à long terme (30 années de simulation), en considérant deux types de sol et de matériau de remplissage avec des conductivités thermiques différents.

Dans une première étape nous avons présenté les paramètres influençant le confort thermique des occupants à l'intérieur d'un bâtiment. Le bâtiment étudié est situé dans une région de Tlemcen, et ensuite nous avons calculé les besoins énergétiques pour le chauffage et /ou le refroidissement mensuelle.

Les simulations révèlent que la performance thermique de l'échangeur de chaleur dépend de manière significative de la résistance thermique de forage et du matériau de remplissage et de la conductivité thermique du sol.

Les résultats permettent de conclure que :

- L'échangeur de chaleur simple U donne une meilleure performance thermique que celle de forage coaxial, car la résistance thermique  $R_b$  de

- forage la plus faible, dont plus la résistance thermique de forage  $R_b$  est plus faible est plus le comportement thermique de forage est élevé.
- La conductivité thermique du sol a une grande influence sur le comportement thermique de forage, plus la conductivité thermique du sol est élevée plus le rendement thermique du forage est mieux.
  - La conductivité thermique du matériau de remplissage doit être suffisante pour favoriser l'échange et diminuer les déperditions thermiques.
  - La température de sol est diminuée légèrement sur le long temps à chaque utilisation pour le chauffage et le rafraîchissement jusqu'à trouver un palier en dessous duquel la température ne descend plus.

### **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] E, Kant, « Ambiance et confort thermique », p. 33.
- [2] BERKOUK Djihed " Évaluation du confort thermique et lumineux dans le logement collectif : Étude comparative entre le social et le promotionnel, dans la ville de Biskra", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2017.
- [3] « Bassam - Modélisation dynamique du confort thermique dans l, pdf », Consulté le : 26 Mai 2021: <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2007ISAL0005/these.pdf>
1. [4] « Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public : - PDF Téléchargement Gratuit », <https://docplayer.fr/10837611-Etude-et-evaluation-du-confort-thermique-des-batiments-a-caractere-public.html>
  2. L'énergie géothermie est de type capitalistique. Elle nécessite généralement des investissements élevés mais présente l'avantage de coûts d'exploitation relativement faible et stable dans le temps.
- Compte tenu des caractéristiques des ressources géothermiques en Algérie, son utilisation contribuera grandement à simuler le secteur industriel et à améliorer la qualité de vie sur les plans économiques et environnementales. [fr/10837611-Etude-et-evaluation-du-confort-thermique-des-batiments-a-caractere-public.html](http://theses.insa-lyon.fr/publication/2007ISAL0005/these.pdf) (consulté le 26 mai 2021).
- [5] « D3C\_GM\_LEKHAL\_MohammedCherif.pdf », Consulté le : 26 mai 2021, [En ligne], Disponible sur : <http://rdoc.univ->

sba.dz/bitstream/123456789/2467/1/D3C\_GM\_LEKHAL\_MohammedCherif.pdf

- [6] J. F. Nicol et M. A. Humphreys, « Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings », *Energy Build.*, vol, 34, n° 6, p, 563 572.
- [7] « Wilaya de Tlemcen », *Wikipédia*, avr, 29, 2021, Consulté le : 09 juin 2021, [En ligne], Disponible sur :  
[https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Wilaya\\_de\\_Tlemcen&oldid=182409522](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Wilaya_de_Tlemcen&oldid=182409522)
- [8] V. Bacau et M. Salis, Réduction d'échelle et modélisation climatique avec une application à la gestion des forêts en algérie, 2018, doi : 10,13140/RG,2,2,26614,91205.
- [9] « Météo habituelle à Tlemcen, Algérie - Werther Spark », <https://fr.weatherspark.com/y/40174/M%C3%A9t%C3%A9o-habituelle-%C3%A0-Tlemcen-Alg%C3%A9rie> (consulté le 09 juin 2021).
- [10] « Climat Tlemcen : Pluviométrie et Température moyenne Tlemcen, diagramme ombrothermique pour Tlemcen - Climate-Data.org », <https://fr.climate-data.org/afrique/algérie/tlemcen/tlemcen-990323/> (consulté le 09 juin 2021).
- [11] « Figure 4 Situation géographique de la wilaya de Tlemcen », *Tlemcen* : [https://www.researchgate.net/figure/Situation-geographique-de-la-wilaya-de-Tlemcen\\_fig3\\_326200216](https://www.researchgate.net/figure/Situation-geographique-de-la-wilaya-de-Tlemcen_fig3_326200216) (consulté le 09 juin 2021).
- [12] S. Amara, T. Baghdadi, B. Mordell, et R. Khomola, « Solar System Design for Water Treatment: Antibacterial Heat Exchanger (ABHE) », in *Understanding Complex Systems*, 2017, Doi: 10,1007/978-3-319-55774-8\_6.
- [13] Z. Z. Abidin, N. A. Ahmad, et A. A. Salleh, « Rising damp study in uitm perak's », p. 9.
- [14] « Confort thermique : généralité », *Energie Plus Le Site*, sept, 25, 2007, <https://energieplus-lesite.be/theories/confort11/le-confort-thermique-d1/> (consulté le mai 24, 2021),
- [15] M, F, Kenza, « Cas des logements HPE de l'OPGI de Blida », p, 210.
- [16] « Degrés-jours [Théories - climat] », *Energie Plus Le Site*, nov, 06, 2007, <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/degres-jours-d2/> (consulté le mai 31, 2021).
- [17] « Degré jour unifié », *Wikipédia*, avr, 08, 2021, Consulté le : mai 31, 2021, [En ligne], Disponible sur :  
[https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Degr%C3%A9\\_jour\\_unifi%C3%A9&oldid=181696086](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Degr%C3%A9_jour_unifi%C3%A9&oldid=181696086)

- [18] M, B, Ben Youcef, « Aspects Energétiques, Economiques et Environnementaux d'une Habitation Ecologique », p, 175.
- [19] M, Benchetrit, « Les sols d'Algérie », *Revue, Géographie Alp*, vol, 44, n° 4, p, 749 - 761, 1956, doi : 10,3406/rga,1956, 1790.
- [20] V, Godefroy, « Elaboration et validation d'une suite évolutive de modèles d'échangeurs géothermiques verticaux », p. 161.
- [21] « doi : à l'eau : à l'un un - PDF Free Download », <https://docplayer.org/72556102-Grundwassereinfluss-auf-erdwaermesonden-gelaendeuntersuchungen-und-modellrechnungen.html> (consulté le juin 10, 2021).

## **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion Générale

Le développement des énergies renouvelables est une exigence politique actuelle, il n'est pas possible de s'attendre à une pénurie d'énergie extraite des ressources connues (les hydrocarbures), mais la situation future nécessite une réduction globale de la production des polluants, notamment de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>.

Afin d'assurer une position sur le marché dans le secteur de l'énergie, il ne suffit pas d'être respectueux de l'environnement, La compétitivité économique doit également être garantie. La chaleur de la terre est la seule source d'énergie ininterrompue disponible sans production de dioxyde de carbone. Elle peut être ajustée en fonction des besoins. Disponible toute l'année, le jour comme la nuit, et ne nécessitant aucun stockage. La géothermie présente des perspectives intéressantes pour le monde et pour l'Algérie.

Nous avons concentré notre étude à la réalisation d'une installation géothermique d'un habitat individuel par une pompe à chaleur (GSHP) couplée à un échangeur de chaleur vertical dans lequel circule un fluide caloporteur dans un circuit fermé. L'objectif est la comparaison du comportement thermique de deux types de forage coaxial et simple U par le logiciel EWS,

Tout d'abord, nous avons présenté des généralités sur les énergies renouvelables et la situation énergétique dans l'Algérie basée à l'instant sur les hydrocarbures. Malheureusement, malgré le grand potentiel des énergies

renouvelables est la situation géographique du pays présente on est très en retard dans ce domaine. La deuxième partie une description des technologies d'énergie géothermique y compris, les différents capteurs de chaleur.

Dans la dernière partie, nous avons les paramètres qui influencent le confort thermique des occupants à l'intérieur d'un habitat individuel situé dans la région de Tlemcen pour obtenir les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation de ces occupants. On utilise le logiciel EWS pour l'analyse numérique de la performance des échangeurs de chaleur de forage coaxiale et simple U, avec l'influence des différents paramètres sur le comportement thermique de deux forages.

A partir de ce travail, on conclut que la température de forage est liée à la résistance thermique et de la conductivité thermique de sol et de matériau de remplissage.

Ce travail nécessite encore des recherches comme :

1. L'utilisation de la géothermie pour le chauffage et le refroidissement dans l'Algérie et dans le monde.
2. L'énergie géothermie est de type capitalistique. Elle nécessite généralement des investissements élevés mais présente l'avantage de coûts d'exploitation relativement faible et stable dans le temps.
3. Compte tenu des caractéristiques des ressources géothermiques en Algérie, son utilisation contribuera grandement à simuler le secteur industriel et à améliorer la qualité de vie sur les plans économiques et environnementales.

Mlle DEHBI Rihab

Soutenue le 11 Juillet 2021

Thème : Etude des performances des sondes géothermiques coaxiales et en U par le logiciel EWS.

Nature : Master Physique Energétique et Energies Renouvelables

ملخص:

في هذه المدكرة تمت دراسة السلوك الحراري للمبادلات الطاقوية المحورية و على شكل U أحادي و ذلك بإستخدام برنامج المحاكاة EWS الذي يسمح بحساب متوسط درجة الحرارة السائل في البئر على المدى الطويل و القصير, نظام المبادل الطاقوي موصول بمضخة الحرارة الأرضية (GSHP), في البداية قمنا بمعاينة وحساب الإحتياجات الخاصة لمسكن فردي واقع بمدينة تلمسان بما يتناسب مع مستوى الراحة الحرارية في المسكن وتلبية إحتياجات الطاقة الشهرية للتدفئة و التبريد التي يجب توفيرها للأفراد, يوفر المبادل الحراري شكل U أحادي أداءا حراريا أفضل, وذلك بسبب السعة الحرارية العالية للسائل و المقاومة الحرارية المنخفضة للبئر.

تم إجراء المحاكاة مع الأخذ في الإعتبار نوعين من التربة و مواد التعبئة بقيم توصيل حرارية مختلفة, نتيجة لذلك يظهر النوع الأكثر توصيلا ناتجا حراريا أعلى,

الكلمات الرئيسية: مبادل حراري ارضي, مادة التعبئة, مضخة حرارية ارضية (GSHP), برنامج EWS.

## RESUME

Dans ce mémoire, le comportement thermique des échangeurs de chaleur de forage coaxial et simple U à été étudié à l'aide de simulation numérique par le logiciel EWS. Ce dernier permet de calculer la température moyenne du fluide caloporteur à la fois à long et à court termes. Notre système d'échangeur de chaleur à été combiné par une pompe à chaleur géothermique (GSHP), Tous d'abord nous avons développé les besoins énergétiques d'un habitat individuel situé à Tlemcen. Dans le but du confort thermique dans le bâtiment et répondre aux besoins énergétiques pour le chauffage et/ ou le refroidissement mensuel à satisfaire, EWS semble un moyen efficace.

La configuration du forage simple U offre une meilleure performance thermique en raison de la capacité thermique plus élevée de la chaleur du fluide caloporteur et la résistance thermique inférieure du forage

L'analyse a été menée en considérant deux types de sol (Calcaire et Gravier) et de matériau de remplissage différents (Ciment bentonite et ciment gravier) avec des valeurs de conductivité thermique différents, En conséquence, le type de sol et de matériau de remplissage le plus conducteur met en évidence le rendement plus élevé de chaleur.

**Mots clés :** Echangeur de chaleur au sol, matériau de remplissage, pompe à chaleur géothermique (GSHP), Logiciel EWS.

## ABSTRACT

In this work, the thermal behavior of coaxial and single U drilling heat exchangers has been studied using numerical simulation by the EWS software. This one calculate the average temperature of the coolant both in the long and in the short term, our heat exchanger system has been combined with a geothermal heat pump (GSHP). First, we have developed the energy needs of an individual house located in Tlemcen in proportion to the level of thermal comfort in the building and to meet the energy needs for monthly heating and / or cooling.

The single U borehole configuration offers better thermal performance due to the higher capacity of the heat of the coolant and the lower thermal resistance of the borehole, The analysis was carried out considering two types of different soil and filling material with different thermal conductivity values, As results, the more conductive type of soil and infill material exhibits the higher heat output.

**Keywords:** ground heat exchanger, filling material, geothermal heat pump (GSHP), EWS software,