



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

People's Democratic republic of Algeria

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministry of Higher Education and Scientific Research

جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم

University Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem

كلية العلوم و التكنولوجيا

Faculty of Sciences and Technology

قسم الهندسة المدنية والمعمارية

Civil engineering & architecture department



N° d'ordre : M/GC/2021

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Thème

**Simulation numérique du chauffage par géothermie
via le logiciel COMSOL Multiphysiques**

Présenté par :

- MAHI Djihane

- KADRI Nada

Soutenu le 01 /07 / 2021 devant le jury composé de :

Président : Mr REZIGUA Ahmed

Examineur: Mr BESSAI Touhami

Encadrant : Dr MALIKI Mustapha

Année Universitaire : 2020 / 2021

Remerciements

Tout d'abord je remercie dieu le tout-puissant et le parfait, aussi son prophète Muhammad, la meilleure créature que la terre a porté, la lumière qui a guidé l'humanité vers la voie sûre, et tous ceux qui croient en la lumière qu'il a apporté.

Je voudrais remercier mes parents qui m'ont soutenu, spécialement ma mère pour m'avoir prodigué les bonnes manières et la bonne éducation. Mon père, mon héros et mon modèle.

Mes plus vifs remerciements vont pour les membres de notre honorable jury de soutenance pour avoir accepté l'évaluation de ce modeste travail.

Je voudrais aussi remercier tous les enseignants qui nous ont aidé à nous améliorer, tous ceux qui ont contribué à cet humble travail, spécialement M. Maliki Mustapha qui nous a aidé plus que nous ne l'aurions jamais voulu et a fait pour nous plus qu'on ne pouvait s'y attendre.

Aussi pour ce pays qui nous a assuré une éducation gratuite; les gens qui le protègent et qui font en sorte que cela continue.

Résumé

Dans cette étude on s'intéresse au chauffage domestique d'une maison individuelle par la géothermie, une technique qui est jusqu'à présent non exploitée dans notre pays. Cette technique a pour support technique un échangeur eau/sol. La température du sol influe principalement sur les performances d'un tel échangeur du fait que le sol, à une certaine profondeur devient le facteur primordial pour les échanges thermiques entre l'eau qui circule à l'intérieur de l'échangeur et le milieu qui l'entoure.

Afin de mener à bien notre travail, nous utiliserons le logiciel CFD COMSOL-Multiphysics. V5.5.2. Ce logiciel est utilisé pour la modélisation et la simulation de phénomènes physiques tels que le transfert de chaleur dans les milieux solides, poreux mais aussi liquides.

Summary

In this study we are interested in the domestic heating of a single-family house by geothermal energy, a technique that has not yet been exploited in our country. This technique has for technical support a water / soil exchanger. The ground temperature mainly influences the performance of such an exchanger due to the fact that the ground, at a certain depth becomes the essential factor for the thermal exchanges between the water which circulates inside the exchanger and the medium which surround it.

In order to carry out this study, we will use the COMSOL-Multiphysics CFD software. V5.5.2. This software is used for the modeling and simulation of physical phenomena such as heat transfer in solid, porous but also liquid media.

ملخص

في هذه الدراسة نحن مهتمون في التدفئة المحلية لمنزل منفصل عن طريق الطاقة الحرارية الأرضية، وهي تقنية غير مستغلة حتى الآن في بلدنا.

تؤثر درجة حرارة التربة بشكل رئيسي على أداء مثل هذا المبادل لأن التربة، على عمق معين، تصبح العامل الرئيسي للتبادل الحراري بين المياه التي تدور داخل المبادلات والبيئة المحيطة بها.

يستخدم هذا البرنامج لنمذجة COMSOL Multiphysics V5.5.2-من أجل تنفيذ عملنا، وسوف نستخدم برنامج كومسول ومحاكاة الظواهر الفيزيائية مثل نقل الحرارة في الوسائط الصلبة المسامية و السائلة أيضا.

Table des matières

Chapitre I : Introduction générale	1
1. Contexte général du mémoire	1
1.1.1. Economie d'énergie : Enjeux et problématique	1
1.1.1.1. La consommation d'énergie en Algérie :	2
1.2.1. La consommation finale en Algérie par secteur	3
1.2. Structure du mémoire :	5
CHAPITRE II : LES ENERGIES RENOUVELABLES : SOLUTION INCONTOURNABLE	6
1-Introduction :	6
2-Energies Renouvelables :	7
2.1. Energie solaire :	9
3- Les petites centrales hydrauliques (PCH) :	14
4- Les énergies renouvelables en pourcentage :	14
5- Le potentiel des Energies Renouvelables en Algérie :	16
5-1 Potentiel éolien :	17
5.2- Le potentiel géothermique :	18
5 .3- Potentiel de la biomasse :	19
5.4- Potentiel hydroélectrique :	19
5-5- le potentiel solaire :	20
6- Le secteur de l'électricité :	22
6.2 Parc existant :	25
6.3- L'électricité photovoltaïque :	25
7. Le bâtiment et les énergies renouvelables :	26
8- Conclusion :	29
CHAPITRE III : La Géothermie	30
1-1-L'Energie géothermique	30
1.2- Classification de la géothermie	30
1.3. Exemples d'applications domestique de la géothermie.....	30
2-La production d'électricité géothermique :	31
3- La disponibilité des ressources géothermiques	31
3.1-Le doublet géothermique.....	32

3.4-Les canalisations	33
4-1-1 La géothermie très basse énergie	34
4.1.2-La géothermie basse énergie	34
4.1.3-La géothermie moyenne énergie :	35
4.1.4La géothermie haute énergie :	35
4.1.5 La géothermie profonde (hot dry rock)	35
5.1. Avantages de l'énergie géothermique	36
5.2 Les inconvénients de l'énergie géothermique	36
6-La géothermie en Algérie	37
7.1 Les gisements géothermiques des zones volcaniques récentes.	38
7.2 Les gisements des zones de plate-forme continentales stables	38
7.3 Les gisements géothermiques des zones continentales actives.	38
8 . Pompe à Chaleur	38
8.1.1 Principe de la pompe à chaleur géothermale	38
8.1.2. Le principe de fonction de pompe a chaleur :	39
8.1.3 Principe thermodynamique.....	40
9.1 Echangeur Vertical	40
9.2 Echangeur Horizontal	41
9.3 Echangeur Serpentinaux	41
9.4 Echangeur Spiral.....	42
10. Nature du sol et son taux d'humidité	43
11-Les forages	44
11.1 -Principe de fonctionnement.....	44
11.2-Comment fonctionne la pompe à chaleur :.....	45
12. Types de pompe à chaleur :	46
13. Propriétés du sol	46
14-Pompe à chaleur géothermique	47
14.1-Composants	47
15 -Les économies réalisées et l'écologie :	47
Conclusion	47

CHAPITRE 4 : Simulation numérique du mécanisme de chauffage domestique par géothermie via le logiciel COMSOL multiphysics	49
1-Présentation du logiciel de simulation Comsol-Multiphysics.....	49
1-1- Définition	49
1-2 -Avantages de conception avec Comsol-Multiphysics	49
1-3 L’interface utilisateur de Comsol-Multiphysics.....	49
1-3-1-L’interface de COMSOL, peut être séparée en quatre parties :.....	49
2-- Modélisation et simulation par Comsol-Multiphysics	51
2-1- Création du modèle de simulation	51
2-2- Définition des paramètres globaux	51
2.3- Création de la géométrie du problème	52
2.3.1- Les propriétés du matériau de la géométrie étudiée.....	53
3-Transfert de chaleur dans les solides.....	55
4- Température à l'entrée et à la sortie de l'eau :	56
5-Maillage.....	57
6-Définition du modèle.....	59
7-Résultats et discussion.....	60
Effet des conditions climatique sur la température de surface du sol selon les différentes profondeurs :	60
Effet de profondeur d’enfouissement du tube sur la distribution de la température	61
Effet des conditions climatique sur la température de surface du sol selon les différent humidité de sole.....	65
Effet des conditions climatique sur la température de surface du sol selon les différent diamètre :	68
Effet des conditions climatique sur la température de surface du sol selon les différentes valeurs de la demande journalière d’énergie :	71
III.6 Conclusion	73
CONCLUSION GENERALE	2

Liste des figures

Figure 1. Dépense énergétique dans un foyer type.....	2
Figure 2. Consommation énergétique finale en Algérie par secteur en 2005 (APRUE, 2007).....	3
Figure 3. Consommation énergétique finale en Algérie par secteur en 2010.....	3
Figure 4. les parcours de conversion pour les énergies renouvelables.	6
Figure 5. Les différentes filières Des énergies renouvelables. Source: Guide des ER, 2007.....	8
Figure 6. Vue terre-soleil source : CDER.....	9
Figure 7. Vue terre-soleil source : CDER	11
Figure 8. Fonctionnement d'une éolienne. Guide des Energies Renouvelables, 2007.....	12
Figure 9. Centrale hydraulique, Source : Guide des Energies Renouvelables, 2007.....	14
Figure 10. Structure de la production électrique d'origine renouvelable dans le monde (2008).	15
Figure 11. Part des énergies fossiles et renouvelables dans la production d'électricité dans les pays arabes	16
Figure 12. Carte du relief de l'Algérie, source : INCT	18
Figure 13. Carte géothermique de l'Algérie. Source : INCT	19
Figure 14. Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de juillet.	21
Figure 15. Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de décembre	22
Figure 16. Contribution dans la génération de l'électricité	23
Figure 17. Structure du parc de production 2007, source : CREG.	25
Figure 18. carte des zones d'application du photovoltaïque.....	26
Figure 25. La tour vivante à Rennes. Source : SOA-Architectes.....	27
Figure 26. La tour Dragonfly-NY. Source : V. Callebaut.....	28
Figure 27. Applications domestiques de la géothermie	31
Figure 28. Différentes configurations de doublets [23].....	33
Figure 29. Canalisations d'eau chaude de chauffage de chauffage urbaine en Islande.....	33
Figure 30. Géothermie à très basse énergie [10].....	34
Figure 31. Géothermie à basse énergie	34
Figure 32. Géothermie à haute énergie	35
Figure 33. Schéma descriptif d'un système géothermique profond [25]	36
Figure 34. Principe l'exploitation énergie géothermique	39
Figure 35. Principe d'une pompe à chaleur appliquée à la géothermique [26]	40
Figure 36 :Schéma de principe d'une machine thermodynamique	40
Figure 37. Echangeur vertical [28]	41

Figure 38. Echangeur horizontal.	41
Figure 39. Echangeur Serpentins.....	42
Figure 40. Echangeur spiral.	43
Figure 41. Emplacement du puits [28]	44
Figure 42. Principe de la géothermique	45
Figure 43. Températures moyennes mensuelles de l'air ambiant, du sol, et des eaux souterraines du Canada [30]	46
Figure 44. L'interface du logiciel de simulation de comsol-multiphysics.	50
Figure 45. Les étapes de création d'un modèle de simulation	51
Figure 46. Les paramètres ajoutent au modèle.	52
Figure 47. Construction de la géométrie 2D.	53
Figure 48. Construction de la géométrie 3D.	53
Figure 49. Insertion de propriétés des matériaux.....	54
Figure 50. Matériaux utilisés en géométrie (sol et eau).	54
Figure 51. Sélection du module transfert de chaleur dans les solides.....	55
Figure 52. Conditions aux limites dans les frontières de la géométrie de l'échangeur.	56
Figure 53. Transfert de chaleur dans les tubes	56
Figure 54. Température à l'entrée et à la sortie de l'eau.....	57
Figure 55. Le maillage de la structure.	57
Figure 56. Exemple de batterie de récupération de chaleur dans un jardin, reliée à une habitation via une pompe à chaleur.....	59
Figure 57. Modèle pour les collecteurs de chaleur.....	59
Figure 58. Evolution de la température de surface dans la période annuelle.....	60
Figure 59. Profil de distribution de température à diérentes profondeurs.....	61
Figure 60. Variation de la température de sol selon profondeur de sol.....	61
Figure 61. Evolution de la température d'eau dans l'échangeur en fonction du temps selon la différente profondeur.....	62
Figure 62. Variation du flux de chaleur produite par l'échangeur en fonction du temps. (Période de deux jours en hiver).....	63
Figure 63. Variation du l'état de chauffeur de produite par l'échangeur en fonction du temps	64
Figure 64. Profil de distribution de température de sol selon les différent cas d'humidité.....	65
Figure 65. Variation du flux de chaleur produite par l'échangeur en fonction du temps.	66
Figure 66. Evolution de la température d'eau dans l'échangeur en fonction du temps selon la différente valeur d'humidité	67
Figure 68. Profil de distribution de température de sol selon les différents diamètres de tube	68

Figure 69. Variation du flux de chaleur produite par l'échangeur en fonction du temps. (Période de deux jours en hiver).....	69
Figure 70. Evolution de la température d'eau dans l'échangeur en fonction du temps selon la différente valeur d'humidité	70
Figure 72. Profil de distribution de température de sol selon les différentes valeurs de la demande d'énergie.....	71
Figure 73. Variation du flux de chaleur produite par l'échangeur en fonction du temps.	72

Liste des tableaux

Tableau 1: le potentiel solaire en Algérie.....	20
Tableau 2: Evolution de la population, puissance installée et production d'énergie en Algérie	24
Tableau 3: : Paramètres du modèle de simulation.....	52
Tableau 4: Paramètres de matériau	54
Tableau 5: Caractéristiques du maillage	58

Chapitre I : Introduction générale

1. Contexte général du mémoire

1.1.1. Economie d'énergie : Enjeux et problématique

Le monde entier est confronté à une augmentation de la consommation énergétique d'une façon accrue depuis déjà plusieurs décennies. Cette augmentation remet fondamentalement en cause le modèle économique qui est tributaire pour son développement d'une quantité colossale d'énergie.

Cette énergie reste dans l'écrasante majorité, d'origine fossile donc non renouvelable à court et moyen terme et qui est la première source des émissions de gaz à effet de serre dans un monde qui souffre déjà des effets de l'activité humaine sur son environnement. Cette augmentation met en péril le mode de gestion de ses ressources aussi bien pour les pays importateurs qui du fait de la raréfaction des réserves d'énergie, se trouvent confrontés à la question de la sécurité d'approvisionnement et au prix juste de l'énergie ; alors que les pays exportateurs comme l'Algérie qui a besoin de liquidité pour se développer voit une part importante de ses ressources financières consacrées à assurer, à coût de subventions, une grande consommation énergétique domestique. Tous les pays ne sont pas égaux devant cette situation, c'est ainsi que le choix de maître en lumière l'évolution des bilans énergétiques de quatre pays. Les États-Unis qui ont le modèle de la consommation énergétique le plus extrême, le Canada qui est connu pour être l'un des pays leader en matière d'efficacité énergétique enfin la France et l'Algérie dont les modèles énergétiques sont assez semblables. Cette évolution montre que le secteur du bâtiment, le résidentiel en particulier est le premier consommateur d'énergie ce qui en fait la première cible.

En Algérie, le besoin de construire vite, pas cher et dans les brefs délais a poussé les décideurs à mettre l'accent sur des aspects quantitatifs et de solidité structurelle aux dépens du confort d'usage. En quatre décennies d'indépendance, le paysage urbain et architectural des agglomérations a connu un changement brutal. L'habitat produit n'a cessé de poser la problématique de la non prise en compte des facteurs physiques et climatiques dans sa conception, avec par conséquence une consommation excessive d'énergie.

En Algérie, un grand nombre de logements ne semblent pas répondre aux exigences du confort thermique et d'économie d'énergie. Cela s'explique par l'absence d'une

réglementation spécifique d'une part, par le manque de savoir-faire et une méconnaissance du sujet par les maîtres d'ouvrage. L'amélioration des techniques au niveau des matériaux de construction et d'isolation permet aujourd'hui de réaliser des bâtiments qui rassemblent à la fois les qualités esthétiques et thermiques, tout en offrant un cadre de vie plus confortable en étant consommateur de très peu d'énergie. Une méthode de calcul thermique a été développée afin de réduire au minimum le coût d'énergie employée pour chauffer les bâtiments nouveaux ou existants

1.1.1.1. La consommation d'énergie en Algérie :

La consommation globale d'énergie en Algérie, a été probablement multipliée par quatre entre les années 1980 et 2000. L'électricité, le gaz naturel (en conduites ou en bouteilles), fuel, charbon, bois et même les piles électriques sont les vecteurs d'énergie du secteur domestique. Les différents types d'énergie nous servent globalement à quatre différents usages :

- a) Le chauffage et climatisation qui représente la plus forte dépense environ 70% de l'énergie domestique
- b) L'éclairage, l'audiovisuel représentent près de 14% de l'énergie
- c) L'eau chaude sanitaire nécessaire, représente près de 11%
- d) Appareils domestiques représente près de 5%.

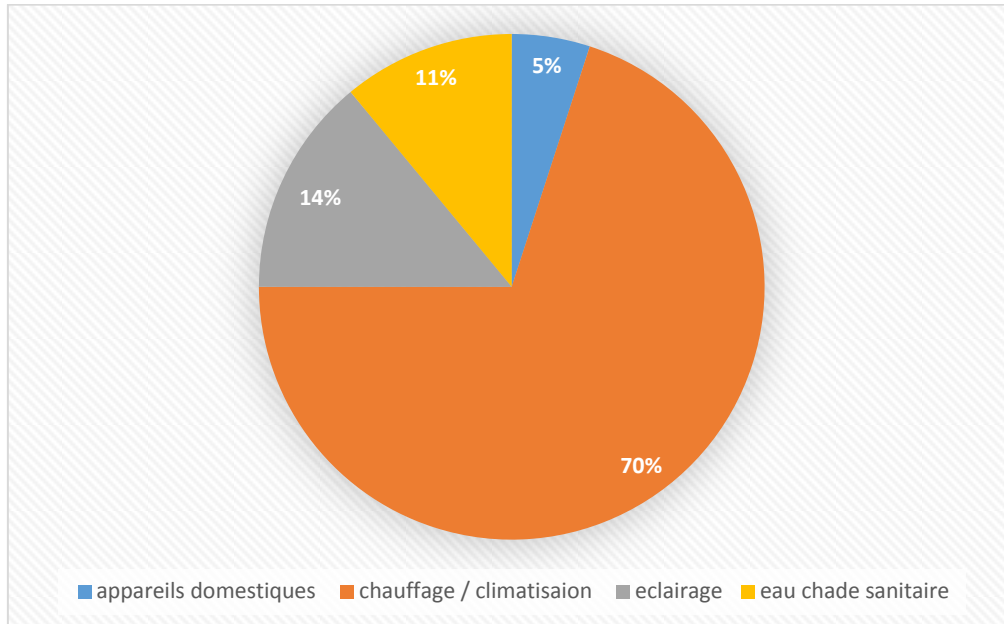


Figure 1. Dépense énergétique dans un foyer type

1.2.1. La consommation finale en Algérie par secteur

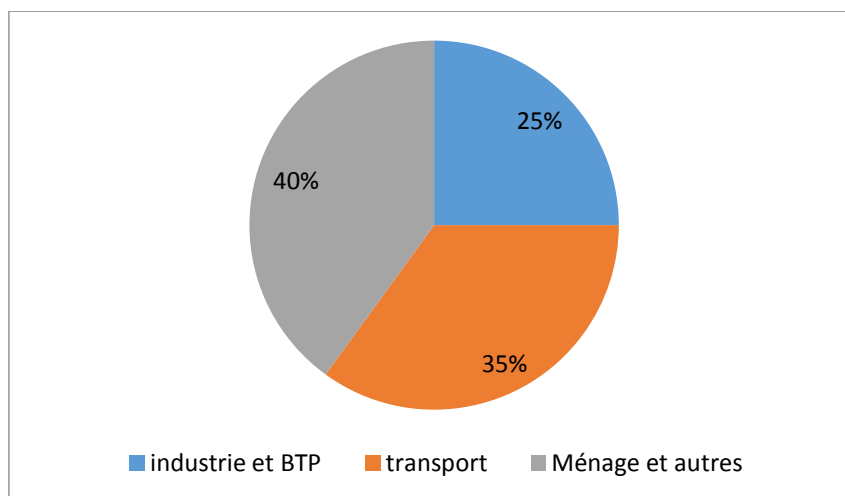


Figure 2. Consommation énergétique finale en Algérie par secteur en 2005 (APRUE, 2007)

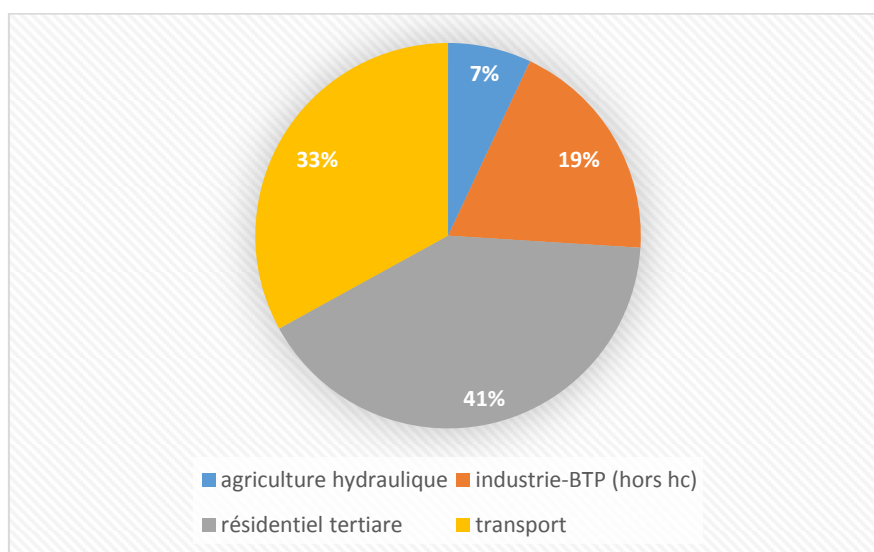


Figure 3. Consommation énergétique finale en Algérie par secteur en 2010

En 2005, Le secteur des ménages et autres, est le secteur qui inclut le secteur résidentiel-tertiaire avec le secteur de l'agriculture, est le secteur le plus demandeur d'énergie avec 40%, l'industrie a une part de 25% et le transport 35%.

En 2010, le secteur résidentiel-tertiaire est celui qui demande le plus d'énergie avec pas moins de 41%, suivi du secteur du transport avec 33%, vient ensuite loin le secteur de l'industrie et de l'agriculture avec respectivement 19% et 7%. Ces statistiques indiquent qu'il est urgent de

rééquilibrer la consommation en passant par une politique de réduction de la consommation et/ou un réajustement à travers l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment. Comparé à l'année 2005, en 2010 le secteur résidentiel-tertiaire reste encore le plus énergivore, d'autant plus que la consommation du secteur de l'agriculture est comptabilisée séparément du secteur résidentiel-tertiaire.

Pour répondre à ces défis énergétiques, plusieurs techniques de chauffage utilisant les énergies alternatives peuvent être mises en œuvre. La géothermie est l'une des énergies renouvelables qui désigne l'énergie calorifique stockée dans le sous-sol dans la mesure où l'énergie primaire est principalement consommée sous forme de chaleur et provenant du sous-sol. Cette énergie géothermique peut être exploitée à l'aide de différents outils pour le chauffage des serres agricoles et le confort thermique utilisant les échangeurs eau-sol

Un échangeur de chaleur eau-sol est un système géothermique qui utilise l'inertie thermique du sol pour chauffer ou refroidir une partie de l'eau de renouvellement d'un habitat. Le principe du système consiste à injecter dans un habitat, un flux d'eau provenant de l'extérieur que l'on force au préalable à circuler dans une canalisation enterrée à une profondeur dans le sol.

Dans cette étude on s'intéresse au chauffage des liquides par la géothermie, une technique qui est jusqu'à présent non exploitée dans notre pays. Cette technique a pour support technique un échangeur eau/sol. La température du sol influe principalement sur les performances d'un tel échangeur du fait que le sol, à une certaine profondeur devient le facteur primordial pour les échanges thermiques entre l'eau qui circule à l'intérieur de l'échangeur et le milieu qui l'entoure. On a mené en premier lieu, une étude théorique pour l'établissement d'un modèle qui traduit le mieux l'évolution de la température du sol, depuis la surface jusqu'à une profondeur optimale. Cette profondeur qui dépend des contextes géographiques et climatique servira de base pour le dimensionnement d'un tel système pour qu'il puisse être exploité. En deuxième étape, nous exposons les résultats issus d'une étude numérique que nous avons menée

Dans cette étude nous utiliserons le logiciel CFD COMSOL-Multiphysics. Ce logiciel est utilisé pour la modélisation et la simulation de phénomènes physiques décrits par des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) résolues par éléments finis. En outre d'avantage de permettre un couplage et une résolution simultanée des équations provenant de domaines physiques très différents.

Un avantage très important de ce logiciel c'est que l'utilisateur peut se concentrer sur le modèle et n'a pas besoin de consacrer du temps à résoudre les équations, construire les lignes de programmation, ou visualiser les résultats.

1.2. Structure du mémoire :

Le présent travail est subdivisé quatre chapitres :

Une introduction qui situe le contexte énergétique de notre travail nous avons présenté une recherche bibliographique détaillée sur la énergétique existant au niveau national (en Algérie).

Le deuxième chapitre présente les différentes filières de l'énergie renouvelable. D'autre part, nous avons présenté une petite définition sur l'énergie géothermique et ses types.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté des généralités sur l'échangeur de chaleur eau-sol, certains types d'échangeurs, leur principe de fonctionnement et leurs propriétés.

Dans le quatrième chapitre nous avons exposé avec le Logiciel de simulation Comsol-Multiphysics pour étudier les effets de certains paramètres sur l'écart de la température à la sortie du fluide au sein de l'échangeur. A la fin de ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation, ces résultats sont représentés sous forme des courbes, sont analysés et discutés.

Enfin nous terminerons notre travail par une conclusion générale qui contient une synthèse des principaux résultats obtenus.

CHAPITRE II : Les énergies renouvelables : solution incontournable

1-Introduction :

Les réserves de la planète en minerais et en combustibles d'origine fossile sont limitées, ainsi, l'exploitation du charbon, du pétrole, du gaz et de l'uranium ne sont pas viables à long terme. Heureusement, les énergies renouvelables provenant des flux de régénération de la nature sont inépuisables et n'ont pas à long terme d'effet négatif sur l'environnement. Aussi, ces sources naturelles pour devenir raient dans le futur la base de l'alimentation en énergie, et probablement le seul moyen de produire de l'électricité. Les prochaines années s'annoncent prometteuses pour les énergies propres. La lutte contre le changement climatique, le développement de la production d'électricité décentralisée et le progrès technique devraient donner un formidable coup de fouet à ces jeunes filières.

La figure 4 fournit une vue d'ensemble des principales ressources énergétiques [1] sur terre qui peuvent être exploitées pour créer de manière viable de l'électricité

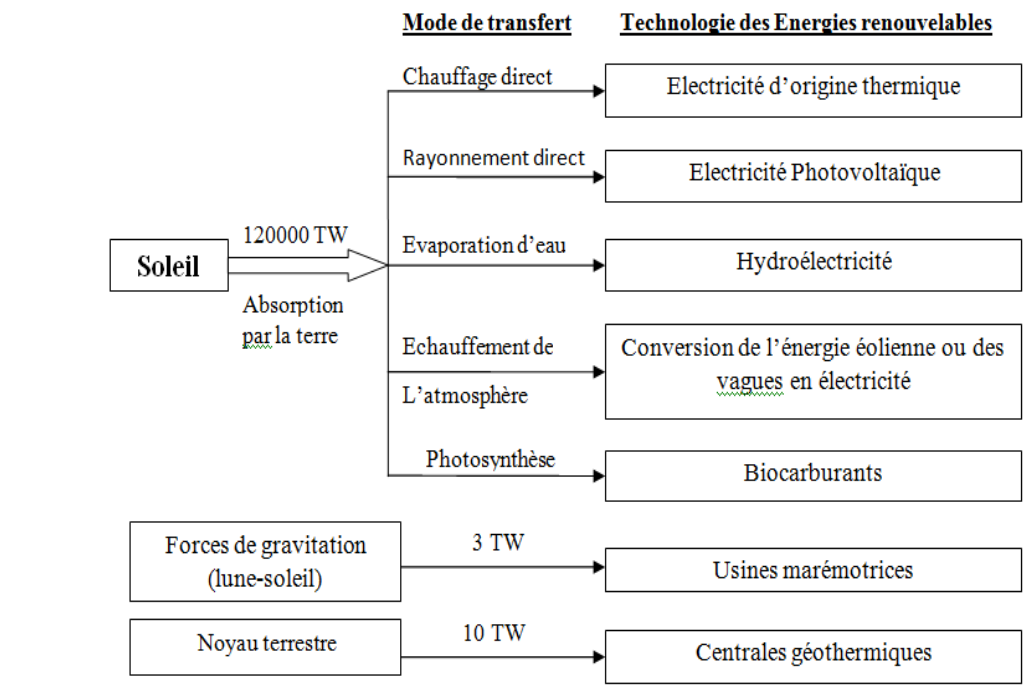


Figure 4. les parcours de conversion pour les énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables, solaire, hydroélectricité... sont toutes issues de l'énergie solaire. Seule la géothermie et les marées échappent à cette règle. Hormis l'énergie marémotrice provenant des forces d'attractions combinées du Soleil et de la Lune, toutes les énergies renouvelables et non renouvelables provenant (figure 4) :

- soit du soleil, (due à la fusion nucléaire de l'hydrogène),
- soit de la Terre, (due à la désintégration naturelle des roches de la croûte terrestre).

2-Energies Renouvelables :

Au vue de la loi Algérienne, les énergies renouvelables [2] qualifiées en tant que tel sont :

Les formes d'énergies électriques, mécaniques, thermiques ou gazeuses sont obtenues à partir de la transformation du rayonnement solaire, de l'énergie du vent, de la géothermie, des déchets organiques, de l'énergie hydraulique et des techniques d'utilisation de la biomasse (voir figure 5). Toutefois, de nombreux experts estiment que la part des énergies renouvelables, même si elle augmente dans les années qui viennent, restera globalement faible. D'une part, parce que les ressources d'énergies fossiles sont encore considérables [3] : 40 ans de réserves prouvées de pétrole, 62 ans pour le gaz, 400 ans pour le charbon. D'autre part, parce que les énergies renouvelables resteront probablement toujours plus chères que les énergies classiques

Cette source solaire fournit des rayonnements en moyenne, interceptés par la surface de la terre, équivalent à 8000 fois plus grand que la consommation d'énergie primaire. Avec la population mondiale actuelle, ce taux monte à une moyenne incroyable de 20 MW par personne (20 millions de W). Donc, le flux d'énergie peut être obtenu directement en utilisant une technologie thermique ou photovoltaïque, ou indirectement, grâce au vent, aux vagues, aux barrages sur rivière et aux biocarburants. La plupart des énergies renouvelables sont facilement convertibles en électricité. Mais les énergies solaire, géothermique ou provenant de la biomasse peuvent aussi servir à fournir de la chaleur. Elles peuvent assurer tous les services prévus par les sources conventionnelles : le chauffage, la réfrigération, l'électricité, et quoiqu'avec difficulté et surcoût pour le transport. Pour une source naturelle, c'est un avantage supplémentaire de pouvoir aussi fournir de l'énergie à des zones éloignées sans avoir besoin d'un réseau de transport coûteux. Il est important de noter qu'il n'est pas toujours nécessaire de convertir une énergie renouvelable en électricité. L'eau chaude solaire ou l'éolienne actionnant une pompe à eau sont des exemples de systèmes

Fonctionner sans aucun circuit électrique. Cependant, pour satisfaire de plus en plus les besoins des consommateurs, les énergies renouvelables seront surtout utilisées sous forme électrique.

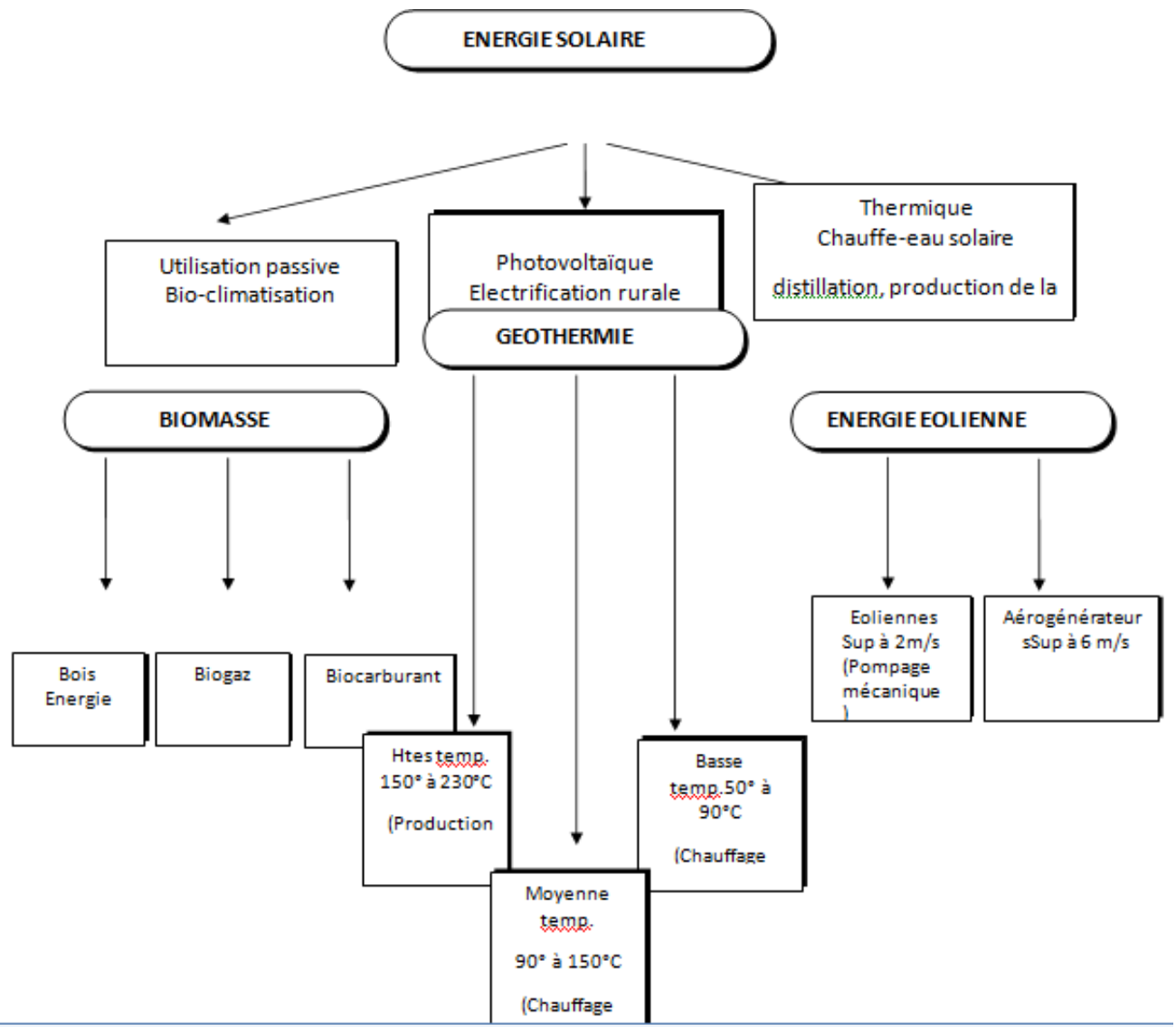


Figure 5. Les différentes filières Des énergies renouvelables. Source: Guide des ER, 2007

Aucune source d'énergie n'a un comportement neutre[4] vis-à-vis de la nature et tout est affaire de compromis. L'objectif qui se dégage peu à peu est celui d'un développement durable ce qui signifie qu'il doit se poursuivre dans le temps sans épuiser les ressources rares, qu'il doit être viable économiquement et qu'il permette un développement harmonieux de l'économie mondiale, notamment pour les pays les plus pauvres, « un développement qui satisfait les besoins présents sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs » [5]. Un aperçu sur les différents types d'énergie renouvelable d'une façon générale est nécessaire:

2.1. Energie solaire :



Figure 6. Vue terre-soleil source : CDER

Produire de l'électricité solaire n'est plus, depuis longtemps, une utopie. Des toits solaires ayant une puissance de quelques kilowatts jusqu'aux centrales de quelques mégawatts, tous ces installations contribuent à un approvisionnement en énergie respectueux de l'environnement et grâce à leur souplesse, recèlent d'énormes potentiels pour le secteur de l'énergie. Aussi avec les centrales héliothermiques, il est possible d'utiliser l'énergie du soleil à l'échelle industrielle pour la production d'électricité (grâce à la transformation du rayonnement solaire en chaleur).

L'énergie solaire est inépuisable, gratuite et non polluante et même si l'énergie solaire reçue par la terre est d'intensité variable, intermittente et peu dense, son utilisation offre de nombreuses possibilités. Parmi ses nombreuses applications, on distingue le solaire thermique qui transforme le rayonnement solaire en chaleur et le solaire photovoltaïque qui convertit la lumière en électricité.

2.1.1. La biomasse :

Grâce à la photosynthèse, les plantes utilisent l'énergie solaire pour capturer le gaz carbonique et le stocker sous forme d'hydrates de carbone, tout en assurant leur croissance. Les premiers hommes ignoraient bien sûr ce processus physico-chimique, mais ils ont vite compris l'intérêt de la « biomasse » pour se chauffer. Employé pour désigner toute la matière vivante, ce terme de biomasse s'applique depuis peu à l'ensemble des végétaux employés comme sources d'énergie. Le bois de feu est bien sûr la plus ancienne de ces sources. Aujourd'hui on peut ajouter la biomasse dite « humide » ; déchets organiques agricoles, déchets verts, boues des stations d'épuration, ordures ménagères qui constituent, à une moindre échelle, autant de sources d'énergie, mais pas forcément très écologiques.

A- Bois énergie :

Le bois est sans doute la source d'énergie la plus intéressante dans la problématique des énergies renouvelables. Tout le monde a en tête les dégâts provoqués par la déforestation dans les régions tropicales. Le bois constitue donc une source d'énergie renouvelable et relativement propre. Sans entrer dans un débat de spécialistes, un petit rappel s'impose ; en brûlant (ou en pourrissant sur le sol), un arbre rejette dans l'atmosphère le gaz carbonique qu'il avait absorbé en grandissant, ni plus ni moins. Dans un pays qui pratique la sylviculture et replante au minimum autant d'arbres qu'il en coupe, le bilan écologique est donc neutre.

B- Le biocarburant :

L'autre atout de la biomasse est la possibilité de fabriquer des biocarburants. Il en existe deux types : les éthanol et les biodiesels. Les éthanol, destinés aux moteurs à essence, sont issus de différentes plantes comme le blé, le maïs, la betterave et la canne à sucre. Le procédé consiste à extraire le sucre de la plante pour obtenir de l'éthanol après fermentation.

Quant aux biodiesels, ils sont extraits des oléagineux (colza, tournesol, soja etc.) Les esters d'huile obtenus peuvent alors être mélangés au gazole. En règle générale, ces biocarburants sont mélangés aux carburants classiques, essence et gazole. Ils entraînent alors une petite diminution des rejets de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone, gaz responsable de l'effet de serre. Mais ces biocarburants ont un énorme inconvénient ; ils occupent des surfaces agricoles au détriment des cultures vivrières.



Figure 7. Vue terre-soleil source : CDER

C- Le biogaz

Le biogaz est un mélange composé essentiellement de méthane (CH_4) et de gaz carbonique (CO_2). Suivant sa provenance [6], il contient aussi des quantités variables d'eau, d'azote, d'hydrogène sulfuré (H_2S), d'oxygène, d'aromatiques, de composés organo-halogénés (chlore et fluor) et des métaux lourds, ces trois dernières familles chimiques étant présentes à l'état de traces. Le biogaz est produit par un processus de fermentation anaérobie des matières organiques animales ou végétales, qui se déroule en trois étapes (hydrolyse, acidogènes et méthanogènes) sous l'action de certaines bactéries. Il se déroule spontanément dans les Entres d'enfouissement des déchets municipaux, mais on peut le provoquer artificiellement dans des enceintes appelées "digesteurs" où l'on introduit à la fois les déchets organiques solides ou liquides et les cultures bactériennes. Cette technique de méthanisation volontaire peut s'appliquer :

- aux ordures ménagères brutes ou à leur fraction fermentescible,
- aux boues de stations d'épuration des eaux usées urbaines ou industrielles,
- aux déchets organiques industriels, (cuirs et peaux, chimie, parachimie,...),
- ainsi qu'aux déchets de l'agriculture et de l'élevage (fientes, lisier, fumier,...).

Les voies de valorisation du Biogaz sont : chaleur seule, électricité seule, cogénération, carburant automobile, injection dans le réseau de gaz naturel.

2.1.2. L'énergie éolienne :

Une hélice entraînée en rotation par la force du vent permet la production d'énergie mécanique ou électrique en tout lieu suffisamment venté. Les applications de l'énergie

Éolienne sont variées mais la plus importante consiste à fournir de l'électricité. Ce sont des parcs d'aérogénérateurs ou «fermes» éoliennes. Ils mettent en œuvre des machines de moyenne et grande puissance (200 à 2 000 kW). Des systèmes autonomes, de 500 W à quelques dizaines de kW, sont intéressants pour électrifier des sites isolés du réseau électrique (îles, villages...), et récemment dans des buildings ultra modernes, citant ici les Twin-Towers du Bahreïn.

A- La production d'énergie mécanique grâce au vent :

Les éoliennes mécaniques servent le plus souvent au pompage de l'eau. L'hélice entraîne un piston, qui remonte l'eau du sous-sol. Cette technique est bien adaptée pour satisfaire les besoins en eau (agriculture, alimentation, hygiène) de villages isolés.

B- La production d'électricité par aérogénérateurs

La figure ci-dessous présente les éléments principaux qui composent la machine. L'énergie du vent captée sur les pales entraîne le rotor, couplé à la génératrice, qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Celle-ci est ensuite distribuée aux normes sur le réseau, via un transformateur.

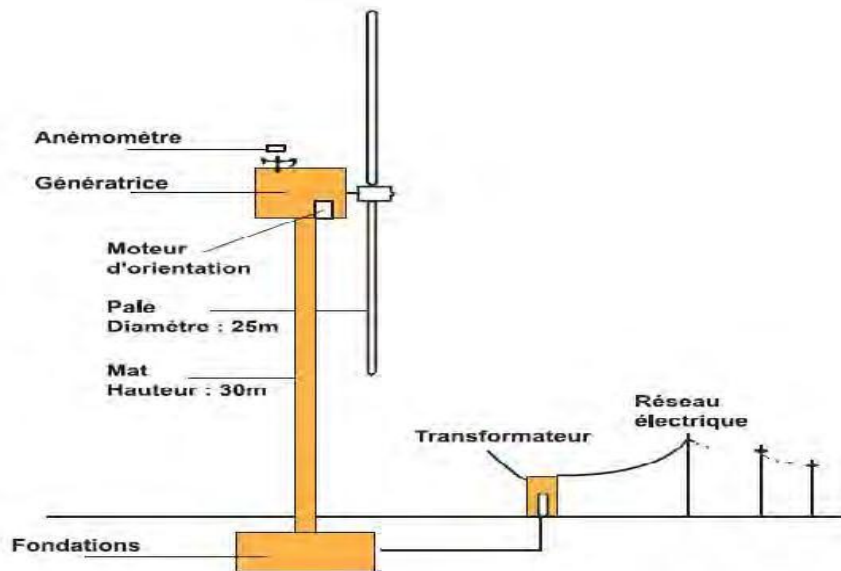


Figure 8. Fonctionnement d'une éolienne. Guide des Energies Renouvelables, 2007

2.1.3. La géothermie :

Le principe de la géothermie consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou d'électricité. Partout, la température croît depuis la surface vers l'intérieur de la Terre. Selon les régions l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15 °C ou même 30 °C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étagent de 1000°C à 4300°C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques qui constituent le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères (nappe souterraine renfermant de l'eau ou de la vapeur d'eau). On distingue quatre types de géothermie ; la haute, la moyenne, la basse et la très basse énergie.

A- La géothermie de haute énergie et de moyenne énergie

La géothermie de haute énergie (> 180 °C) et de moyenne énergie (température comprise entre 100 °C et 180°C) valorisent les ressources géothermales sous forme d'électricité.

B- La géothermie basse énergie

La géothermie basse énergie (températures comprises entre 30 °C et 100 °C) permet de couvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels, thermalisme....Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni même de la disponibilité d'un substrat, comme c'est le cas de la biomasse. C'est donc une énergie fiable et stable dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans ce sens qu'un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas, très élevé.

C- La géothermie très basse énergie : les pompes à chaleur

Le principe des pompes à chaleur (PAC) qui utilisent la chaleur contenue dans le sol pour alimenter un plancher chauffant est connu depuis une vingtaine d'années, elle a subi de notables évolutions techniques qui lui permettent aujourd'hui de rivaliser avec les moyens de chauffage « Traditionnels ». Cependant une part non négligeable de l'énergie fournie par une PAC est d'origine électrique. La technique d'utilisation des PAC est basée sur des capteurs enterrés constitués d'un réseau de tubes dans lequel circule un fluide caloporteur : fluide frigorigène de type HCFC dérivé du fréon, ou de l'eau glycol.

3- Les petites centrales hydrauliques (PCH) :

Depuis des siècles, l'énergie hydraulique est captée par les hommes : c'est ainsi qu'en 1688, la machine de MARLY, ensemble de 14 roues à aubes et tuyauteries a permis de refouler l'eau de la Seine à 162m de haut pour les besoins des étangs et fontaines de Versailles.

Les petites centrales hydrauliques sont présentes partout dans le monde mais leur dénombrement s'avère difficile. On estime que la capacité mondiale installée s'élève à 37000 MW⁷. En «haute chute», l'eau d'une source ou d'un ruisseau est captée par une prise d'eau sommaire, elle est ensuite dirigée à travers une conduite vers une turbine située plus bas.

L'écoulement de l'eau fait tourner la turbine qui entraîne un générateur électrique et enfin l'électricité produite peut soit être utilisée directement, soit stockée dans des accumulateurs.

Enfin, l'eau est restituée à la rivière. En «basse chute», on ne passe plus par une conduite, l'eau est dérivée dans un canal sur lequel est aménagé la PCH.

En ce qui concerne le fonctionnement d'une centrale, la quantité d'énergie hydraulique produite dépend de deux facteurs :

- Le débit de la rivière et la hauteur de la chute.
- Une faible masse d'eau tombant de haut produira donc la même quantité d'électricité que beaucoup d'eau dévalant un faible dénivelé.

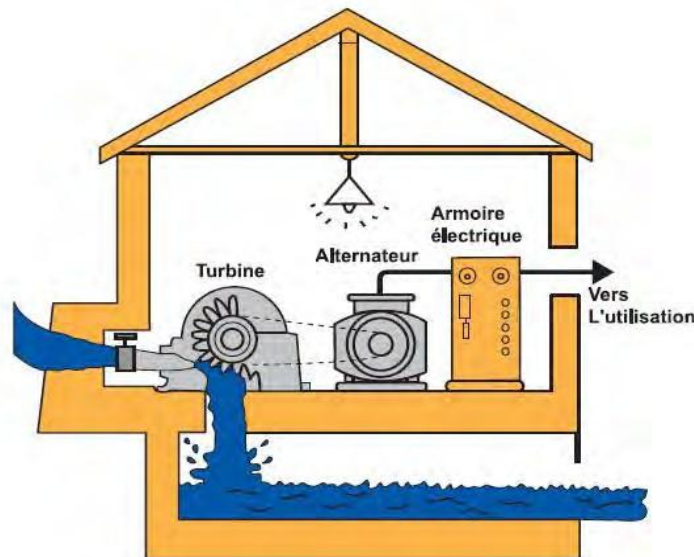


Figure 9. Centrale hydraulique, Source : Guide des Energies Renouvelables, 2007.

4- Les énergies renouvelables en pourcentage :

Globalement, la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité reste encore faible. 20 % de l'électricité produite dans le monde est d'origine renouvelable. L'essentiel étant toujours issu des combustibles fossiles, tels que le pétrole ou le charbon

(62,7 %) et par l'énergie nucléaire (17,1 %). L'électricité renouvelable provient de sources distinctes. L'hydroélectricité est la principale d'entre elles avec 86,3% du total renouvelable. La biomasse est la seconde source avec 5,9%. Suivent l'éolien (5,7%), la géothermie (1,7%), le solaire (0,3%).[8]

Toutefois, ces grandes masses sont extrêmement variables d'un pays à l'autre. Tout est, en effet, fonction des gisements d'énergies renouvelables. Ainsi, 99,2 % de l'électricité de Norvège (pays pétrolier) est générée par les barrages. À l'inverse, les Pays-Bas, pays très sensible aux questions environnementales, utilisent très marginalement les énergies renouvelables pour produire leur électricité : moins de 5 %.

La production d'électricité d'origine renouvelable a atteint 3763 TWh en 2008 (18,7% de la production totale). Cette part reste supérieure à la production d'origine nucléaire mais largement inférieure à l'électricité produite à partir des combustibles fossiles.

- **La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde**

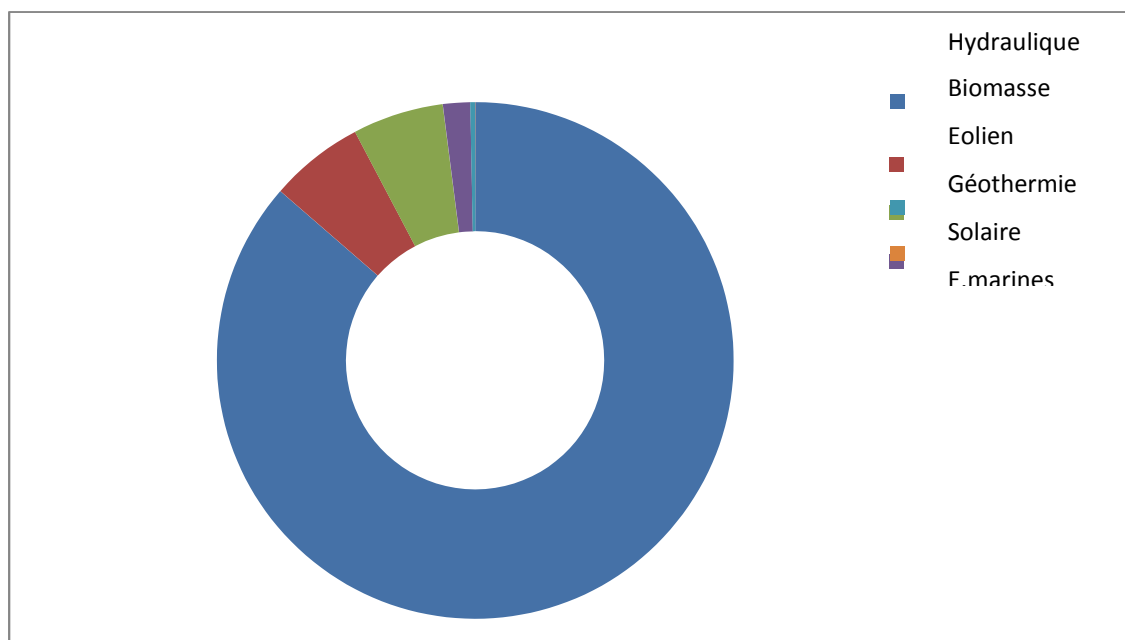


Figure 10. Structure de la production électrique d'origine renouvelable dans le monde (2008).

Pour produire rapidement plus tout en polluant moins, il est donc indispensable d'avoir massivement recours aux énergies renouvelables : Les seules à n'émettre aucun GES [9]. De nombreux pays riches développent de très importants parcs propres, constitués principalement d'éoliennes.

5- Le potentiel des Energies Renouvelables en Algérie :

L'objectif de la stratégie de développement des énergies renouvelables en Algérie est d'arriver à atteindre, à l'horizon 2017 (le niveau de 5% [10] dans le bilan électrique national). L'introduction des énergies renouvelables aura pour conséquence:

- une plus grande exploitation du potentiel disponible,
- une meilleure contribution à la réduction de CO₂,
- une réduction de la part des énergies fossiles dans le bilan énergétique national,
- un développement de l'industrie nationale,
- la création d'emplois.

Dans les pays d'Afrique du Nord (fig.11), la production d'électricité est principalement basée sur les combustibles fossiles. L'Algérie présente la plus faible part d'énergies renouvelable (hydraulique) dans la structure de sa production électrique, plus de 99% de la production totale d'électricité provient des combustibles fossiles. Le peu qui reste (0,7%) provient des énergies renouvelables qui se résument pratiquement à une production hydroélectrique.

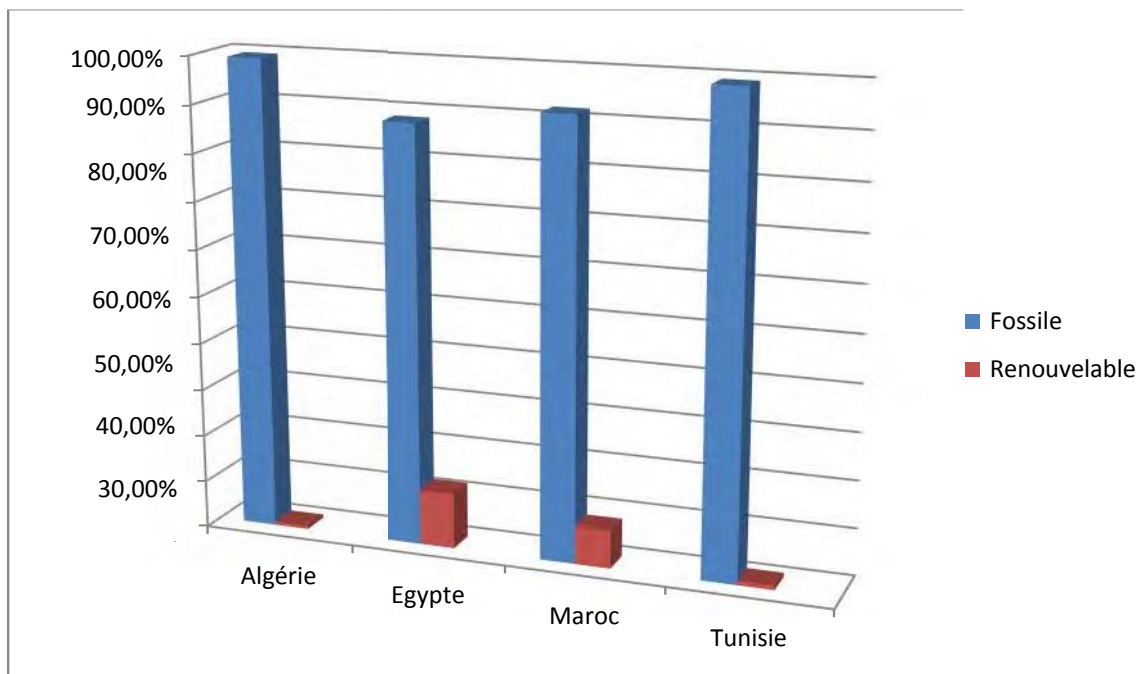


Figure 11. Part des énergies fossiles et renouvelables dans la production d'électricité dans les pays arabes

En raison des importantes sources d'énergie fossiles dont le pays dispose et de l'absence de politiques environnementales, le développement des énergies renouvelables a connu beaucoup de retard. Selon le Ministère de l'Energie et des Mines, la capacité nationale d'électricité dépasse les 8400 MW avec 2,4 MW crête seulement pour des énergies renouvelables (Année 2007) [11]. Aujourd'hui, compte tenu des enjeux que représentent ces sources d'énergies durables, leur promotion constitue un des grands axes de la politique énergétique et environnementale du pays. D'autre part, l'Algérie possède des atouts majeurs: un potentiel considérable des énergies renouvelables et une politique énergétique favorisant une contribution plus conséquente des énergies renouvelables dans le bilan national. Plusieurs projets ont été réalisés (électrification de plusieurs villages, production d'eau chaude Sanitaire,...etc.). Quant à l'utilisation du solaire thermique pour la production d'électricité, un Projet d'une centrale hybride solaire-gaz (150 MW) située à Hassi R'mel est en cours de Réalisation. Pour la filière éolienne, le peu de projets réalisés concernent l'installation de pompes éoliennes. En plus, Un projet d'une ferme éolienne de 10 MW à Adrar est en cours d'étude. La stratégie de développement des énergies renouvelables en Algérie vise à porter la part des énergies renouvelables, à l'horizon 2015, à environ 5% de la production nationale d'électricité.

5-1 Potentiel éolien :

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est dû principalement à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. La carte représentée ci-dessous montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud ouest, avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au Sud.

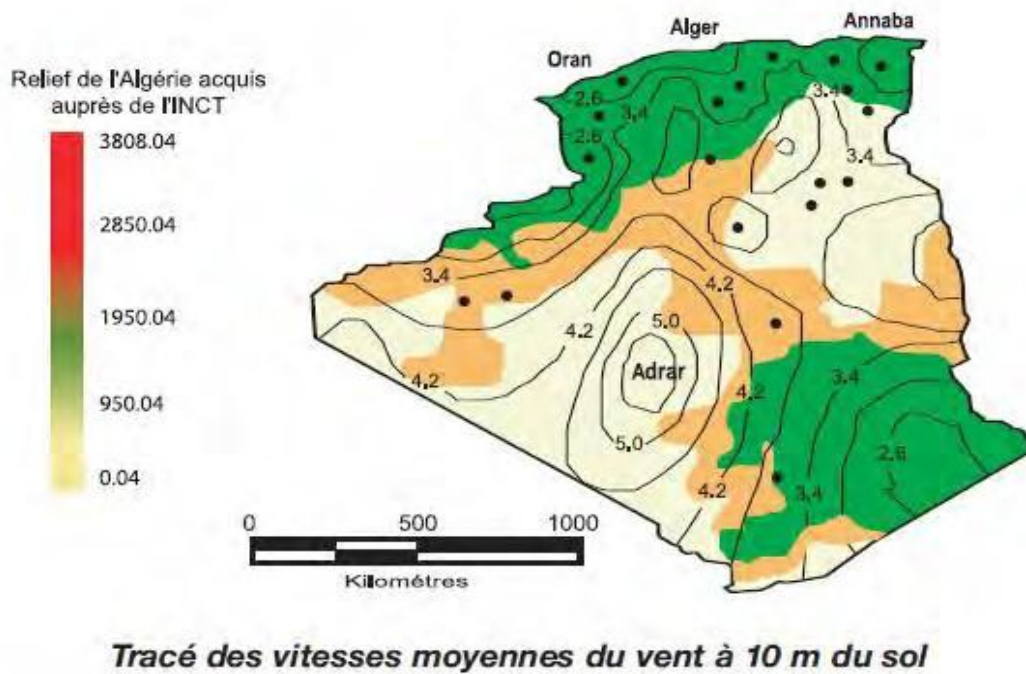


Figure 12. Carte du relief de l'Algérie, source : INCT

5.2- Le potentiel géothermique :

Les calcaires jurassiques du Nord algérien [12] qui constituent d'importants réservoirs géothermiques, donnant naissance à plus de 200 sources thermales localisées principalement dans les régions du Nord-est et Nord-Ouest du pays. Ces sources se trouvent à des températures souvent supérieures à 40°C, la plus chaude étant celle de Hammam Meskhoutine (96°C). Ces émergences naturelles qui sont généralement les fuites de réservoirs existants, débitent à elles seules plus de 2 m³/s d'eau chaude. Ceci ne représente qu'une infime partie des possibilités de production des réservoirs.

Plus au Sud, la formation du continental intercalaire, constitue un vaste réservoir géothermique qui s'étend sur plusieurs milliers de Km². ce réservoir, appelé communément « nappe albiennne » est exploité à travers des forages à plus de 4 m³/s. l'eau de cette nappe se trouve à une température moyenne de 57 °C. Si on associe le débit d'exploitation de la nappe albiennne au débit total des sources thermales, cela représenterait, en termes de puissance, plus de 700 MW.

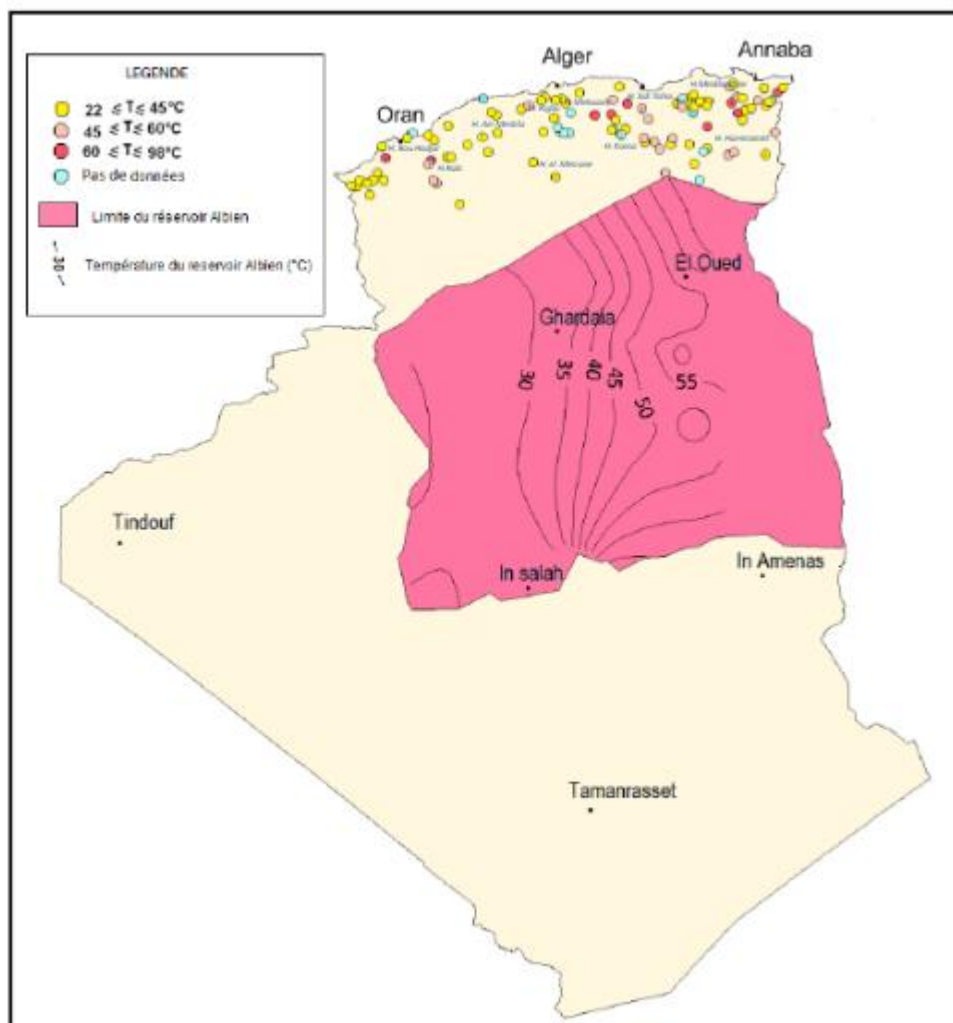


Figure 13. Carte géothermique de l'Algérie. Source : INCT

5.3- Potentiel de la biomasse :

Potentiel de la forêt :

Géographiquement parlant, l'Algérie se subdivise en deux parties :

- les régions selvatiques qui occupent 25.000.000 hectares environ, soit un peu plus de 10% de la superficie totale du pays.
- les régions sahariennes arides couvrant presque 90% du territoire.

Dans le nord de l'Algérie, qui représente 10% de la surface du pays, soit 2 500 000 hectares, la forêt couvre 1 800 000 hectares et les formations forestières dégradées en maquis 1 900 000 hectares. Le pin maritime et l'eucalyptus sont des plantes particulièrement intéressantes pour l'usage énergétique : actuellement elles n'occupent que 5% de la forêt algérienne.

5.4- Potentiel hydroélectrique :

La part de capacité hydraulique dans le parc de production électrique total est de 5% ; soit 286 MW. Cette faible puissance est due au nombre insuffisant des sites hydrauliques et à la non-exploitation des sites hydrauliques existants.

Dans les pays d'Afrique du Nord, la production d'électricité est principalement basée sur les combustibles fossiles. L'Algérie présente la plus faible part d'énergies renouvelables (hydraulique) dans la structure de sa production électrique, plus de 99% de la production totale d'électricité provient des combustibles fossiles. Le peu qui reste (0,7%) provient des énergies renouvelables qui se résument pratiquement à une production hydroélectrique.

5-5- le potentiel solaire :

L'Algérie dispose d'un des plus grands gisements solaires au monde, la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays.

Les diverses études entreprises jusqu'à présent sur le potentiel énergétique solaire en Algérie font apparaître un potentiel considérable pour l'utilisation et l'exploitation de cette forme d'énergie. En effet, l'Algérie avec plus de deux millions de km² de superficie, reçoit l'équivalent de 300 milliards de Tep par an en énergie solaire.

L'Algérie a intégré dans sa politique énergétique le développement de ce créneau par : l'adoption d'un cadre juridique favorable à l'expansion de cette énergie, la planification d'importants projets d'hybridation de centrales diesel, le lancement de deux grands programmes d'électrification et la projection d'une usine de fabrication de modules photovoltaïques en est la parfaite illustration.

Tableau 1. Potentiel solaire en Algérie.

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie en %	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement enHeure/an	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue en KWh/m ² /an	1700	1900	2650

Cette richesse d'énergies renouvelables, donne à notre pays une longévité de consommation énergétique propre, dont le solaire prend la part du lion, les figures 2.8 et 2.9, illustrent cette

quantité énergétique au mois de juillet, contre le cas le plus défavorable, celle d'octobre.

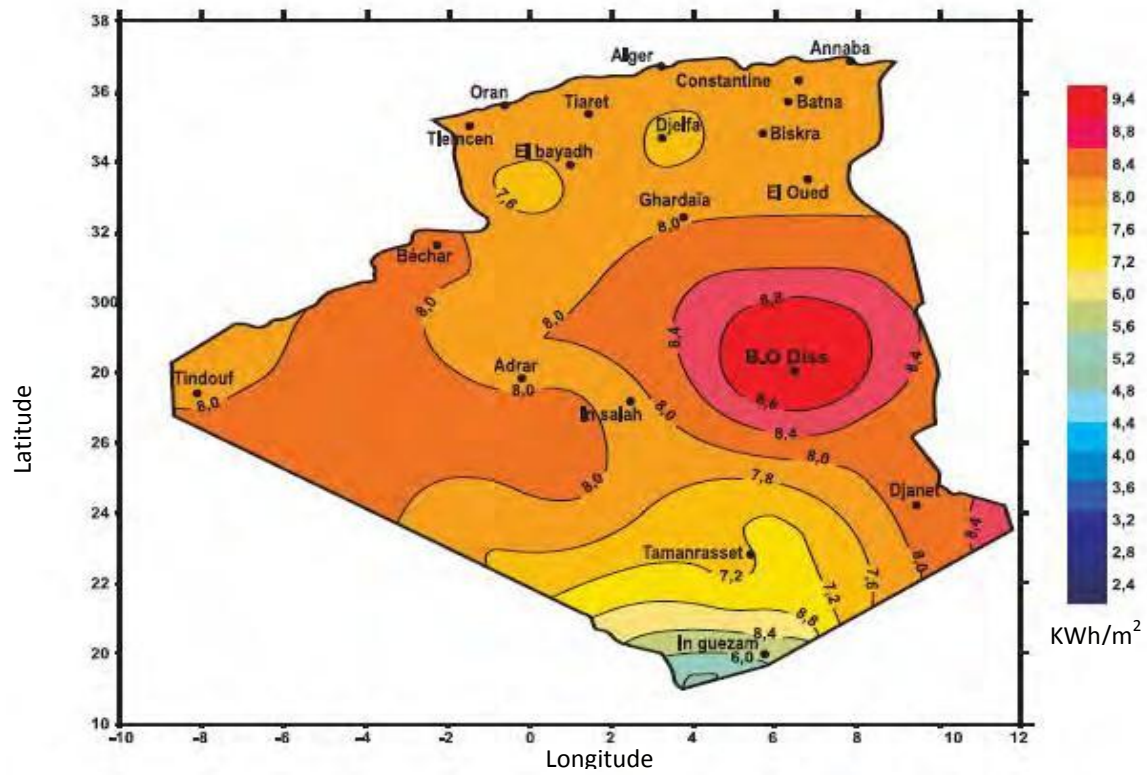


Figure 14. Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de juillet.

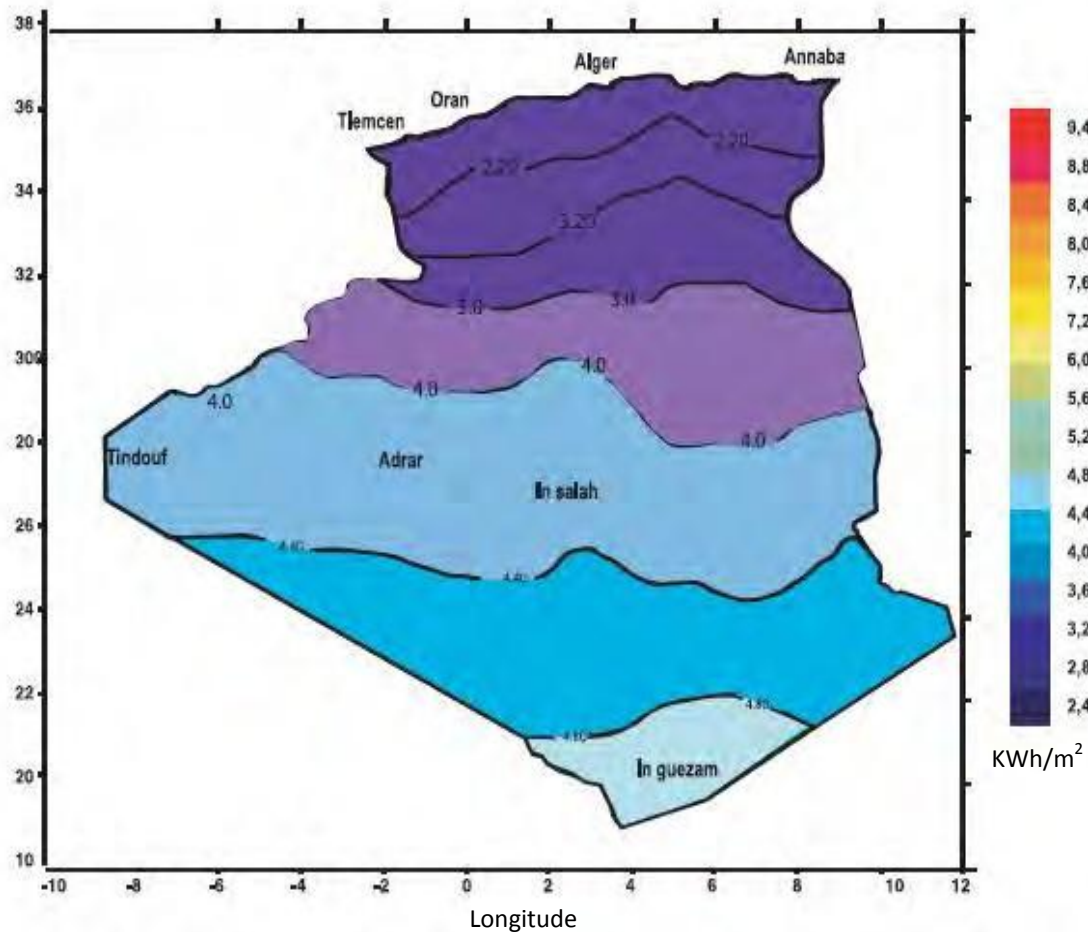


Figure 15. Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de décembre

6- Le secteur de l'électricité :

La figure 16 montre en pourcentage les combustibles utilisés pour obtenir de l'électricité. Les combustibles (carbonés) d'origine fossile représentent environ 64%, avec le charbon comme combustible le plus important, contribuant à 40% de la génération de l'électricité. Et il intervient pour les trois quarts dans les émissions de CO₂. Aujourd'hui les centrales hydroélectriques de forte puissance comptent pour la majeure partie des énergies renouvelables.

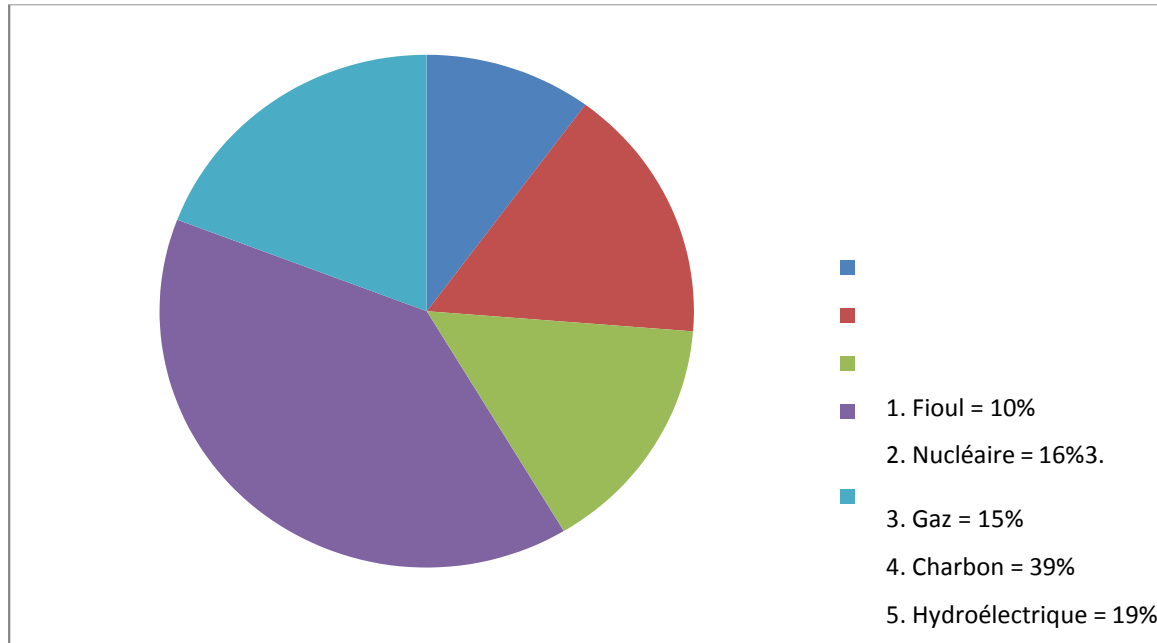


Figure 16. Contribution dans la génération de l'électricité

- Un peu moins de la moitié de l'électricité produite est consommée dans le logement, environ un tiers dans l'industrie, un peu moins d'un dixième dans la production et le reste dans la transmission et la distribution[13]. La production annuelle mondiale d'électricité atteint les 18 000 TWh (18 000 milliards de kWh) représentant une moyenne de consommation de 2 000 GW (2 milliards de kW). Cette énergie électrique est obtenue selon les modes de production très divers, mais dans la plupart des cas, à partir de combustibles d'origine fossile. Le secteur de l'énergie électrique est la source où la croissance des émissions de gaz à effets de serre est la plus rapide, et on estime que ces émissions vont quadrupler entre aujourd'hui et 2050[14].

6.1 L'énergie Electrique en Algérie :

Le système électrique algérien, comporte outre le système interconnecté, des réseaux autonomes alimentés par des turbines à gaz (Adrar, Illizi, In Salah) ou par des groupes diesel[15] desservant les villes du Sud, à travers des réseaux de distribution. Donc, il est divisé en deux parties : une partie relative au réseau interconnecté national et une autre partie traitant de la production autonome du sud.

- **La colonisation :**

A cette époque, seulement 450 centres et 1000 fermes de colons, pour 1600 km de MT et 1250 km de BT ont été raccordés au réseau d'électricité. En 1962, la production nationale

d'électricité était de 1134 GWh pour une puissance totale installée équivalente à 568MW[16]. Depuis, ce secteur a connu à partir des années 70, avec le lancement des différents programmes de développement, une croissance appréciable (Tableau1.1, ci-dessous). La croissance démographique, avec un taux de 3,2 % par an durant la période 1970-1990, a été le facteur déterminant pour l'accélération de l'électrification du pays. Le taux national d'électrification est passé de 53 % en 1975 à 80 % en 1985, actuellement ce taux est de l'ordre de 95 %.

Le raccordement des différents centres (urbains et ruraux) a permis l'accès à plus de cinq millions de foyers à l'électricité et plus de un million de foyers au gaz naturel. Le raccordement également en haute et basse tension pour l'électricité et haute et basse pression en gaz a permis le développement des activités industrielles et artisanales dans toutes les régions du pays[17]. Cette croissance, soutenue depuis l'indépendance, s'est accompagnée d'une évolution remarquable de la consommation énergétique nationale passant de 5 MTEP[18] en 1970 à 36 MTEP en l'an 2005. Par habitant, celle-ci se traduit par une augmentation de 0,3 TEP/hab. à un peu plus de 1 TEP/hab. actuellement.

Tableau 2. Evolution de la population, puissance installée et production d'énergie en Algérie

Année	1962	1970	1980	1990	2000	2005
Population (millions)	-	13,095	18,370	25,510	30,386	32,906
Puissance Installée(MW)	568	650	1837	4567	5922	6770
Production(GWh)	1134	1691	6220	15448	25008	33611

Les perspectives d'évolution, dans le contexte d'une relance économique, particulièrement dans le secteur des ménages et autres aussi que la réalisation d'un million de logements, indiquent que la demande d'énergie pourrait doubler d'ici 2020 (60 à 70 MTEP).

6.2 Parc existant :

La puissance totale installée sur le réseau interconnecté national existante à fin 2007[19] était de 6876 MW, dont 2435 MW en turbines à vapeur (TV), 3386 MW en turbines à gaz (TG), 825 MW en cycle combiné (CC) et 230 MW en hydraulique (TH). La répartition par filière est donnée sur la figure 1.5.

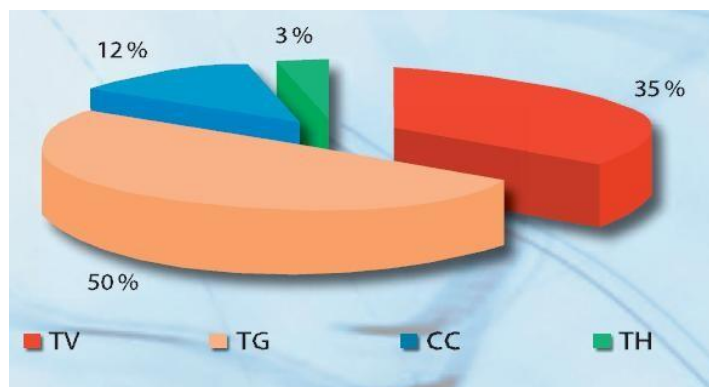


Figure 17. Structure du parc de production 2007, source : CREG.

A partir de la figure précédente, on peut confirmer que la totalité de la production électrique algérienne est issue d'une énergie primaire fossile : le gaz, contre le charbon ailleurs. La politique énergétique nationale, de développement du parc proposé a été déterminée sur la base d'une stratégie privilégiant l'utilisation du gaz naturel comme combustible principal, en cohérence avec les orientations de la politique énergétique nationale qui prévoit l'introduction des énergies solaire et éolienne en plus de la cogénération et du nucléaire.

6.3- L'électricité photovoltaïque :

A la question, l'électricité solaire représentera-t-elle un jour une part significative de la production d'électricité dans le monde ? La réponse est sûrement oui. D'ailleurs, dans une étude publiée en juin 2009, on affirme que le photovoltaïque, en fonction de différents scénarios pourrait satisfaire entre 4% et 12% de la demande d'électricité en Europe d'ici 2020[20] à partir d'une multitude diffuse de producteurs/consommateurs privés reliés par les réseaux existants, plutôt qu'à partir de centrales solaires de grandes tailles.

L'Algérie aussi affiche son ambition, d'arriver à hauteur de 5% d'utilisation des énergies renouvelables, dont la grande partie sera destinée à l'électricité photovoltaïque d'ici 2017.

L'électricité en Algérie peut être produite à partir du photovoltaïque à travers les applications suivantes :

- les systèmes connectés au réseau,



Figure 19. La tour vivante à Rennes. Source : SOA-Architectes

Avec plus de 4.500 m² de cellules photovoltaïques intégrées aux façades orientées vers le soleil et en toiture produisent de l'électricité à partir de l'énergie solaire à raison de 700 000 à 1 million de kWh/ an. Complétées par la production électrique des éoliennes, la Tour Vivante est énergétiquement autonome.

Deux grandes éoliennes situées au sommet de la tour, orientées vers les vents dominants produisent de l'électricité facilitée par la hauteur de la tour. L'énergie électrique produite est de l'ordre de 200 à 600 kWh/an. Ces éoliennes servent également de station de pompage afin d'assurer la circulation et le recyclage des eaux de pluie récupérées en toiture et sur l'aménagement urbain du complexe.

Ce deuxième projet ressemble à un voilier gigantesque, posé sur l'East River, ce bâtiment aux courbes futuristes s'élève à 600 mètres d'altitude dans le ciel de Manhattan. Ses façades translucides, finement nervurées, révèlent des étages de potagers et de rizières, de vergers, de prairies, de jardins suspendus. Ce n'est plus New York, c'est Babylone. Baptisé Dragonfly (« libellule ») par son concepteur, l'architecte franco- belge Vincent Callebaut, ce projet, dévoilé début mai. Utilisant au maximum l'énergie solaire.



Figure 20. La tour Dragonfly-NY. Source : V. Callebaut.

Ces tours agricoles doivent être, dans l'esprit du chercheur, des mini-écosystèmes autosuffisants, autonomes en énergie grâce à l'arsenal solaire et éolien, capables de recycler pluies et eaux usées, de transformer déchets et déjections en fertilisants naturels, d'organiser une rotation des cultures pour permettre à la terre de se régénérer sans engrais chimiques, de se passer de pesticides et d'insecticides.

8- Conclusion :

Un total de 48 pays à des politiques nationales concernant les énergies renouvelables, dont 25 pays de la communauté européenne, c'est dans ce contexte que l'Algérie qui jouit d'un potentiel énorme à regagner cette politique.

Le développement du photovoltaïque en Algérie a connu ces dernières années un nouvel essor dû à l'importance accordée par les pouvoirs publics aux énergies renouvelables.

L'adoption d'un cadre juridique favorable, la création d'une multitude d'organismes œuvrant dans ce secteur et le lancement d'importants projets témoignent de cette volonté. Il n'en demeure pas qu'il reste beaucoup à faire dans ce domaine et pour lequel une synergie entre les différents intervenants est plus que nécessaire.

L'expansion du photovoltaïque dans notre pays passera impérativement par le développement des applications connectées au réseau tel qu'il se fait ailleurs à travers le monde.

Le potentiel solaire dont dispose l'Algérie, l'ouverture du marché de l'électricité et le cadre juridique favorable en font que le marché photovoltaïque Algérien s'annonce parmi les plus importants de la région.

Les rejets industriels sous leurs différentes formes, constituent aujourd'hui une préoccupation aussi bien au niveau national qu'international en raison des impacts négatifs que ces derniers entraînent sur l'environnement. Cependant, la production d'électricité est une source appréciable d'émission de gaz à effet de serre en raison des consommations volumineuses de combustibles fossiles.

Le développement et l'intégration de systèmes de production d'électricité à partir de l'énergie photovoltaïque contribueront à la réduction de ces émissions atmosphériques. Ainsi, une contribution des systèmes connectés au réseau à hauteur de 2% dans le bilan énergétique, l'hybridation des centrales diesel pour prendre en charge 20% de la puissance maximale appelée et l'électrification de 20000 foyers permettront d'éviter l'émission de 1,2 million de tonnes de CO₂ et 5 mille tonnes de NO_x en 2017 [23].

CHAPITRE III : La Géothermie

1-1-L'Énergie géothermique

L'énergie géothermique est l'énergie provenant de la chaleur accumulée dans les profondeurs de la Terre. Il faut savoir que les profondeurs de la Terre comportent un immense réservoir de chaleur qui permet de maintenir l'intérieur de la planète à une température élevée. Cette chaleur produite à l'intérieur de la terre arrive à s'échapper à la surface par l'activité volcanique, les sources d'eau chaude et les geysers.

1.2- Classification de la géothermie

En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C).

Cette source d'énergie est considérée comme inépuisable, (avec certaines limites), car elle dépend : pour la géothermie profonde, des sources de chaleur internes de la terre, dont la durée de vie se chiffre en milliards d'années ; pour la géothermie de surface, des apports solaires.

1.3. Exemples d'applications domestique de la géothermie

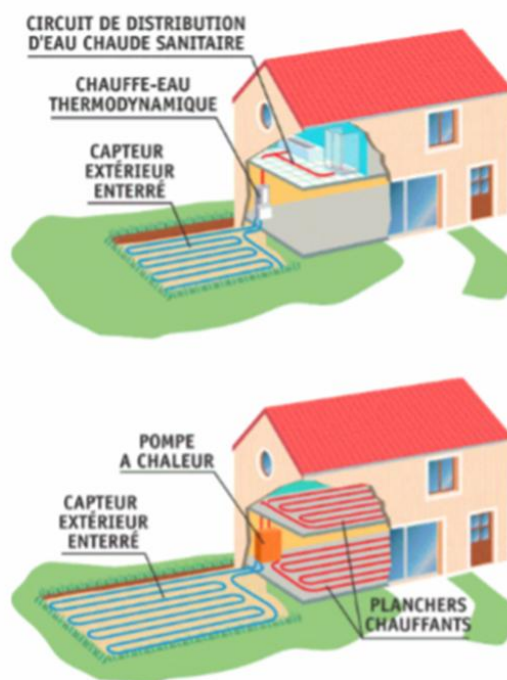


Figure 21. Applications domestiques de la géothermie

Comme il est bien indiqué à la figure 3, on peut utiliser l'énergie thermique issue de la géothermie dans plusieurs applications telles que la production d'eau chaude sanitaire (figure du haut), et le plancher chauffant.

2-La production d'électricité géothermique :

La production d'électricité géothermique consiste à convertir la chaleur des nappes aquifères haute température (de 150 à 350°C) à l'aide de turboalternateurs. Si la température de la nappe est comprise entre 100 et 150°C, il est également possible de produire de l'électricité, mais en utilisant la technologie du cycle binaire. Dans ce cas, un échangeur transmet la chaleur de la nappe à un fluide (isobutane, isopentane, ammoniac) qui a la propriété de se vaporiser à une température inférieure à celle de l'eau.

3- La disponibilité des ressources géothermiques

Cette chaleur est variable selon les zones. À la surface du globe, le flux géothermique moyen est faible (il s'agit de l'énergie disponible pour une superficie et une période données). Ce flux s'élève à 0,06 watt par mètre carré et par an, soit 3 500 fois moins que le flux d'énergie solaire reçu en une année par la même surface de sol ! C'est pourquoi on cherche à exploiter en priorité les ressources calorifiques de certaines zones susceptibles de fournir des quantités d'énergie importantes. Ces « réservoirs géothermiques » sont disponibles dans tous les

bassins sédimentaires de la planète mais la géothermie haute énergie se situe surtout à proximité de volcans. Dans ces zones, le flux géothermique peut atteindre 1 watt/m²/an.

Les réservoirs géothermiques ont tendance à s'épuiser au fur et à mesure de leur exploitation, certains plus rapidement que d'autres. Leurs capacités de renouvellement reposent sur :

- Des sources de chaleur internes à la croûte terrestre (radioactivité essentiellement et chaleur résiduelle) ;
- des apports d'énergie venus de l'extérieur du réservoir (chaleur solaire) pour les usages de très basse température au moyen de pompes à chaleur (PAC). Assurer ces conditions de réchauffement se révèle d'autant plus crucial pour les PAC géothermales que le sous-sol est également refroidi par des facteurs extérieurs : en hiver, par exemple, on y récolte moins de chaleur la circulation des eaux souterraines qui leur permet de se réchauffer au contact de sources de chaleur éloignées du réservoir, avant de réintégrer celui-ci. Ainsi, pour pouvoir exploiter un réservoir de manière durable, on doit veiller à la reconstitution progressive de ses ressources calorifiques. Cela passe par le plafonnement des quantités de chaleur prélevées et la limitation dans le temps de l'exploitation du site.

En outre, la disponibilité de l'énergie géothermique est limitée géographiquement. Le transport de la chaleur sur de longues distances génère en effet d'importantes pertes thermiques. Il en résulte une difficulté à faire correspondre lieux de production et lieux de consommation pour couvrir les besoins en énergie.

3.1-Le doublet géothermique

Afin d'éviter un déséquilibre dans la nappe d'origine, et d'assurer une meilleure gestion de la ressource, la technique de forage dite du doublet géothermique (un puits de production et un puits d'injection) est généralement utilisée. Cette technique permet de restituer l'intégralité des volumes d'eau extraits au milieu d'origine. Pour des raisons techniques, les deux forages du doublet doivent se trouver proches l'un de l'autre à une certaine distance. Dans certains cas, des puits déviés sont utilisés (Figure 29). Le circuit ainsi formé, véhicule l'eau thermale extraite de la nappe profonde jusqu'à la centrale géothermique grâce au forage de production. Après son utilisation, l'eau thermale est à nouveau réacheminée vers la nappe d'origine grâce au forage d'injection.

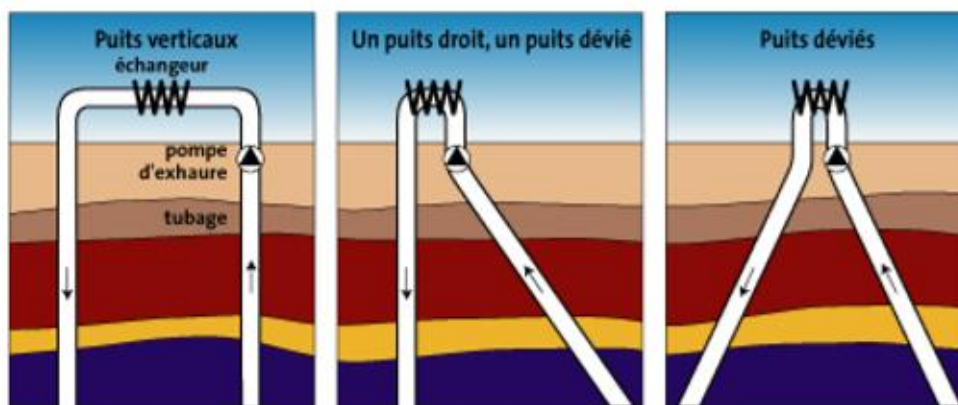


Figure 22. Différentes configurations de doublets [23]

3.4-Les canalisations

Des canalisations de transport d'eau chaude issue des systèmes géothermiques permettent la distribution de la chaleur aux utilisateurs et le raccordement au réseau de chaleur (Figure 30). Le fluide dont la température est inférieure à 110 °C est distribué dans le réseau à des pressions de 5 à 15 bars. Le réseau de chaleur comprend généralement deux tuyauteries, l'une pour distribuer la chaleur et l'autre pour le retour du fluide refroidi vers la station. Celles-ci sont déposées à même le sol, ou bien enterrées. Afin de minimiser l'impact des agressions extérieures (soleil, pluie, vent, etc.) sur la tuyauterie, et ainsi réduire les pertes de chaleur et améliorer la performance du système, des tubes avec isolation sont recommandés.



Figure 23. Canalisation d'eau chaude de chauffage de chauffage urbaine en Islande

4.1-Les types de géothermie

La géothermie est la science qui s'intéresse à l'exploitation de la chaleur naturelle de la terre emmagasinée dans la croûte terrestre. L'énergie géothermique est utilisée dans la production d'électricité et de chaleur. Elle est classée en quatre principaux types en fonction de la température de la source thermique.

4-1-1 La géothermie très basse énergie

Concerne l'exploitation de la chaleur du sous-sol ou des aquifères superficiels de 0 à 600 m de profondeur, dont la température est inférieure à 30 °C. Elle est principalement utilisée pour le chauffage/climatisation et l'alimentation en eau chaude sanitaire. La technique se base sur l'ajout d'une pompe à chaleur associée à des capteurs ou forages. Elle peut être utilisée en partout dans le monde notamment en Algérie.

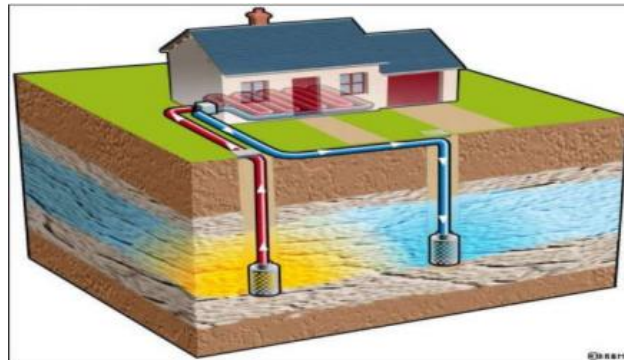


Figure 24. Géothermie à très basse énergie [10].

4.1.2-La géothermie basse énergie

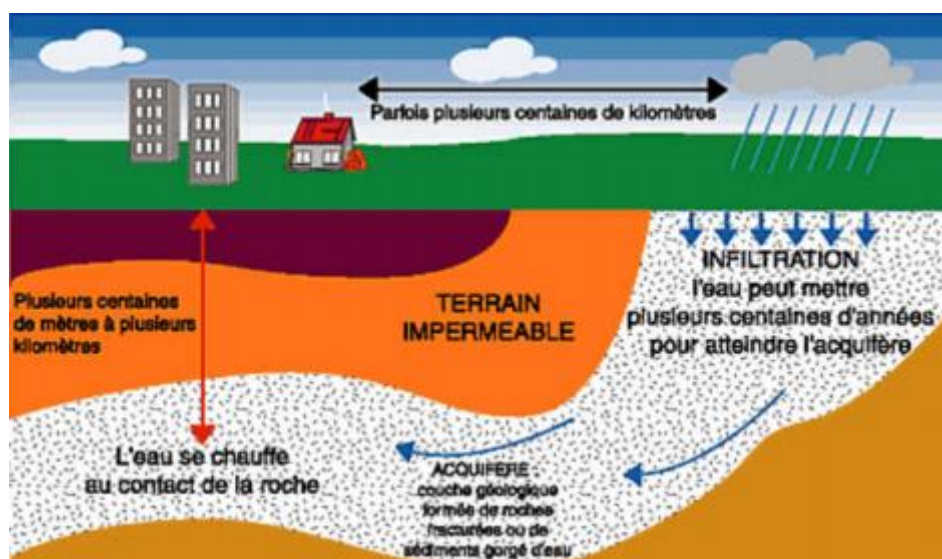


Figure 25. Géothermie à basse énergie

Concerne l'exploitation des gisements situés dans des bassins sédimentaires entre 1500 et 2500 mètres de profondeur, dont la température varie entre 30 et 90 °C. Elle est utilisée dans le chauffage d'habitations et certaines applications industrielles. Elle peut être utilisée au Sahara septentrional algérien (Ouargla, Ghardaïa, Biskra).

4.1.3-La géothermie moyenne énergie :

Concerne l'exploitation des gisements profonds situés dans des régions continentales stables entre 2000 et 4000 mètres ou actives à 1000 mètres, dont la température varie entre 90 et 150 °C. Elle est utilisée dans des applications directes (le chauffage de locaux, le séchage de produits alimentaires, pisciculture, etc.), ou pour la production d'électricité par les systèmes à cycle binaire. Elle peut être utilisée dans les zones thermales du nord de l'Algérie (Mascara, Ain Defla, Khenchela).

4.1.4La géothermie haute énergie :

Concerne l'exploitation des gisements profonds situés entre 1500 et 3000 mètres de profondeur, dont la température est supérieure à 150 °C. Elle est rencontrée dans les régions géologiquement actives (zones volcaniques ou sismiques). Le fluide géothermique (vapeur sèche ou humide) est pompé du réservoir géothermique profond vers la surface pour être exploité dans la production d'électricité. Ce type de géothermie n'existe pas en Algérie.

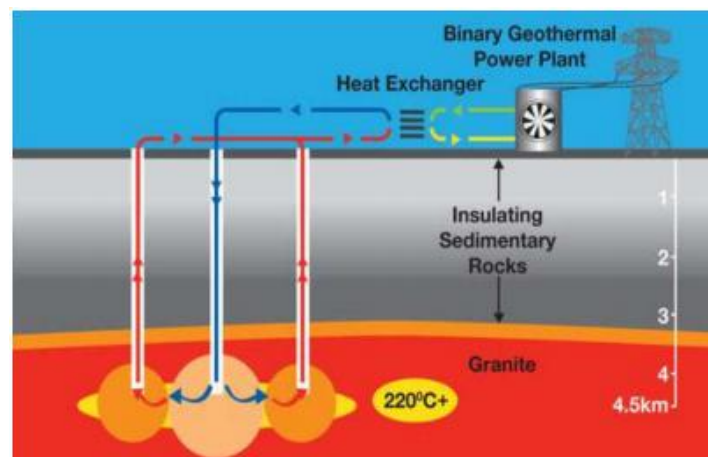


Figure 26. Géothermie à haute énergie

4.1.5 La géothermie profonde (hot dry rock)

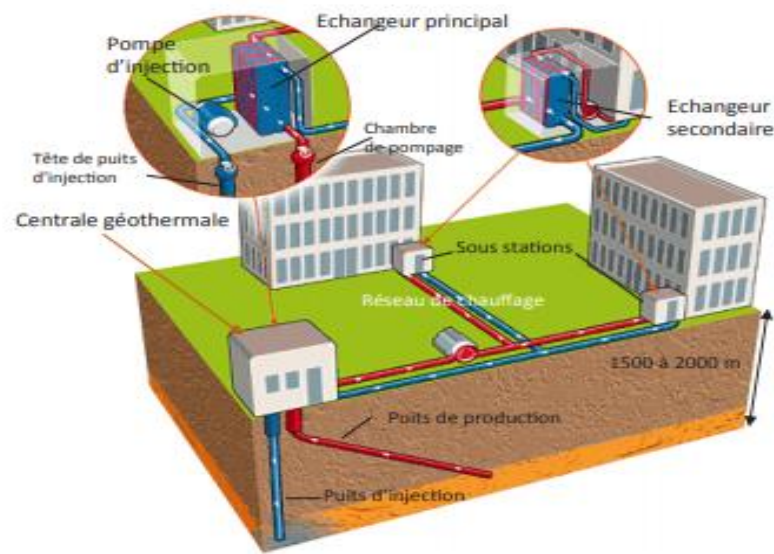


Figure 27. Schéma descriptif d'un système géothermique profond [25]

Aussi dite géothermie artificielle. La technique se rapporte à la production artificielle de l'énergie géothermique à partir des roches sèches profondes (ex-granites). Le principe consiste à injecter de l'eau froide sous forte pression dans un forage d'injection. En profondeur, l'eau qui va élargir les fissures dans le massif rocheux par inaltération, va aussi se réchauffer au contact de la roche. L'eau réchauffée est, par la suite, remontée en surface par un puits de production pour être envoyée dans une centrale de production d'électricité. Ce type de géothermie est toujours à l'état expérimental et n'existe pas en Algérie.

5. Avantages et inconvénients de la géothermie

5.1. Avantages de l'énergie géothermique

- La géothermie de profondeur ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).
- Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement
- Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne).

5.2 Les inconvénients de l'énergie géothermique

- Les sites de forages sont limités en fonction du type de roche (roche chaude facile à percer).
- Risque de rejets gazeux nocifs ou toxiques.

- Risque de réchauffement du site de forage.
- Certaines pratiques de forages augmentent les risques sismiques.
- Certaines technologies utilisent des produits chimiques à fort impact environnemental.
- Coûts d'investissement et de maintenance très élevés .
- Risque de glissement de terrain .

6-La géothermie en Algérie

L'Algérie, est considérée parmi les pays riches en eaux thermo-minérales. Et dispose des nappes et de sources d'eau chaude dont les températures s'échelonnent entre 20°C et 98°C. Au Nord il existe environ 200 sources thermales, dont la température varie de 22°C à 90°C, et au bassin sédimentaire du bas Sahara compte d'énormes réserves d'eau chaudes varie de 50°C à 56°C. Il convient de signaler l'existence de source à hautes températures pouvant atteindre 118 °C à Ain Ouelmen et 119 °C à Biskra .On voit donc que le potentiel géothermique existant dans notre pays est très fort, on se propose donc de l'exploiter et de le valoriser. Au sud algérien, il existe plusieurs sources à des profondeurs variant de 80 mètres dans la région' El Media.

7.Types de gisements géothermiques

En matière de gisement géothermique, on distingue quatre types de géothermie : la haute, la moyenne, la basse et la très basse énergie. Les sites géothermiques à haute et moyenne température permettent la production d'électricité moyennant de turbines. Tandis que la production de chaleur est obtenue à partir des sites géothermiques de basse (utilisation des nappes d'eau chaude du sous-sol profond) et très basse température (utilisation de pompe à chaleur).

La géothermie est certainement la filière qui présente le plus large spectre d'activités : production de chaleur, production d'électricité, production de chaleur sur réseau, production de chaleur individuelle. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni même de la disponibilité d'un substrat, comme c'est le cas de la biomasse. C'est donc une énergie fiable et stable dans le temps. Bien que l'énergie prélevée soit gratuite, le coût des systèmes géothermiques reste relativement élevé (du fait du système de captage généralement).

En Europe, la géothermie est la troisième source d'énergie renouvelable derrière l'hydraulique et la biomasse. Elle est davantage utilisée pour produire de la chaleur que de l'électricité ; dans notre cas à la production de l'énergie électrique.

A travers le monde, il existe trois catégories de gisements géothermiques :

7.1 Les gisements géothermiques des zones volcaniques récentes : Ce type de gisement se caractérise par l'existence en profondeur d'une chambre magmatique très chaude (1300°C) qui représente la source de chaleur naturelle. Cette chambre magmatique cède sa chaleur aux couches géologiques superficielles. Dans ce cas, les eaux sont très chaudes; elles sont plus adaptées à la production d'électricité. Parmi les pays concernés par ce type de gisements, on peut nommer la Nouvelle-Zélande et l'Islande.

7.2 Les gisements des zones de plate-forme continentales stables : Recouvertes de terrains sédimentaires. Dans ce type de gisement il n'existe pas de source de chaleur particulière en profondeur, mais la chaleur est uniquement due au gradient géothermique. Dans ce cas les réserves sont généralement très profondes et leur exploitation nécessite la réalisation de forages. Ce type de gisements est rencontré en France (les bassins parisien et aquitain) et en Algérie (le bassin du Sahara septentrional).

7.3 Les gisements géothermiques des zones continentales actives : Dans ce troisième cas, les eaux résultent de la circulation d'eau thermale à travers les failles et les discontinuités géologiques et arrivent en surface sous forme de sources.

On retrouve ce type de gisement en Algérie, à travers les diverses sources thermales qui jaillissent au Nord. Exemple : Hammam Bou Hadjar.

Suivant leurs thermalismes, ces gisements géothermiques sont classés en deux types de champs géothermiques :

7.1.1 Les champs hyperthermiques : Concernent la première catégorie de gisements correspondants aux gisements géothermiques des zones volcaniques récentes.

7.1.2 Les champs semi-thermiques : Concernent la deuxième et la troisième catégorie de gisements correspondant aux gisements des zones de plate-forme continentales stables, recouvertes de terrains sédimentaires et aux gisements géothermiques des zones continentales actives.

8 . Pompe à Chaleur

8.1.1 Principe de la pompe à chaleur géothermale

L'énergie géothermique est réapprovisionnée en permanence par la proximité du magma sous la croûte terrestre et la radioactivité des roches, voir figure 34.

L'énergie géométrique s'obtient le plus au moyen de pompes à chaleur, voir figure 35, principe qui est également utilisé pour les forages profonds dans le cadre de travaux de grande envergure ne concernant pas les particuliers.

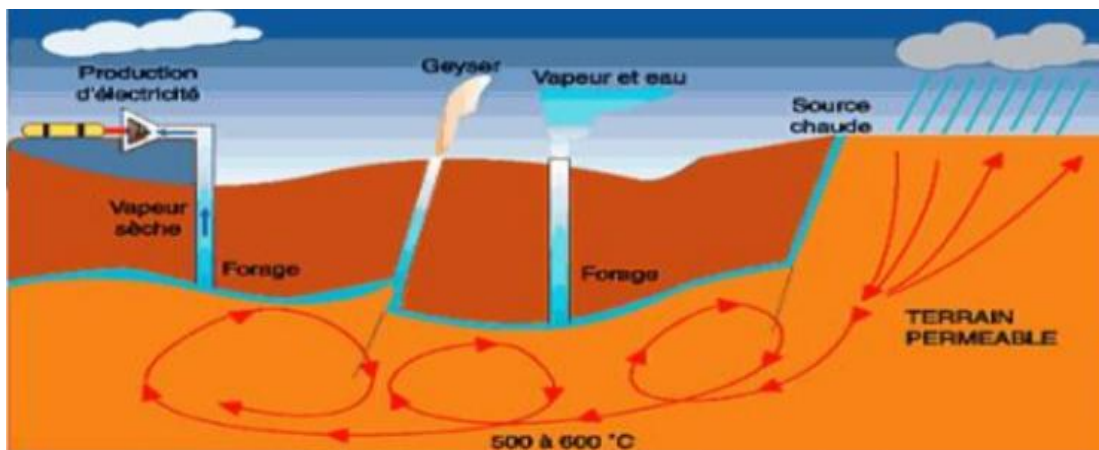


Figure 28. Principe l'exploitation énergie géothermique

8.1.2. Le principe de fonction de pompe a chaleur :

De gauche à droite sur le schéma :

- La chaleur prélevée dans le milieu naturel est captée par le fluide caloporteur au niveau de l'évaporateur.
- Le fluide change d'état et se transforme en vapeur.
- Le compresseur comprime cette vapeur, augmentant ainsi sa température.
- Au niveau du condenseur, la vapeur, en se condensant, transmet sa chaleur au milieu chauffer. La température du fluide s'abaisse alors dans le détendeur, le rendant prêt pour un nouveau cycle.

Le principe est similaire à celui du réfrigérateur : la chaleur est extraite du compartiment interne du réfrigérateur, d'où l'apparition de froid. La chaleur produite est évacuée par la grille derrière l'appareil et chauffe... la cuisine [26]

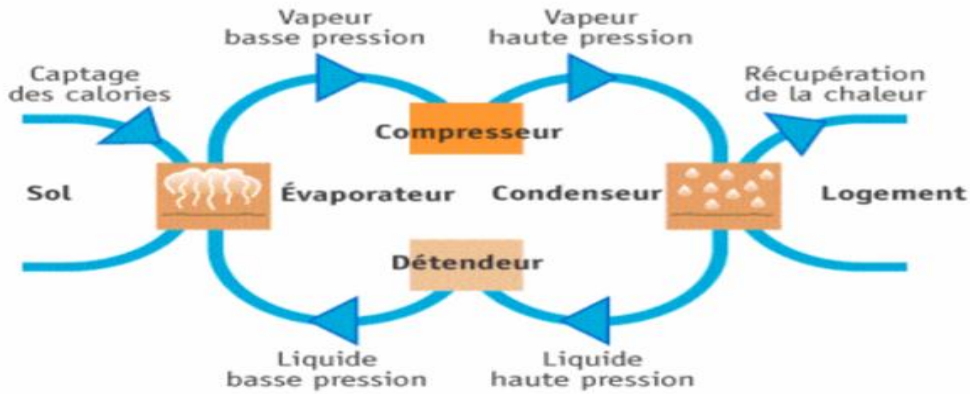


Figure 29. Principe d'une pompe à chaleur appliquée à la géothermie [26]

8.1.3 Principe thermodynamique

Le principe de la pompe à chaleur (PAC) est connu depuis longtemps, sil'on prend pour origine l'énoncé des principes de la thermodynamique par Carnot(1824), qui a établi l'équivalence du travail et de la chaleur. Une pompe à chaleur est un système thermodynamique qui fonctionne entredeux sources : une source froide et une source chaude. Le principe consiste à transférer des calories de la source froide vers la source chaude, donc à un niveau de température supérieur. Ce transfert se fait via un fluide caloporteur (fluide frigorigène) et ne peut se réaliser que s'il y a apport d'énergie sous forme de travail(dans le cas de PAC à compression). [27]

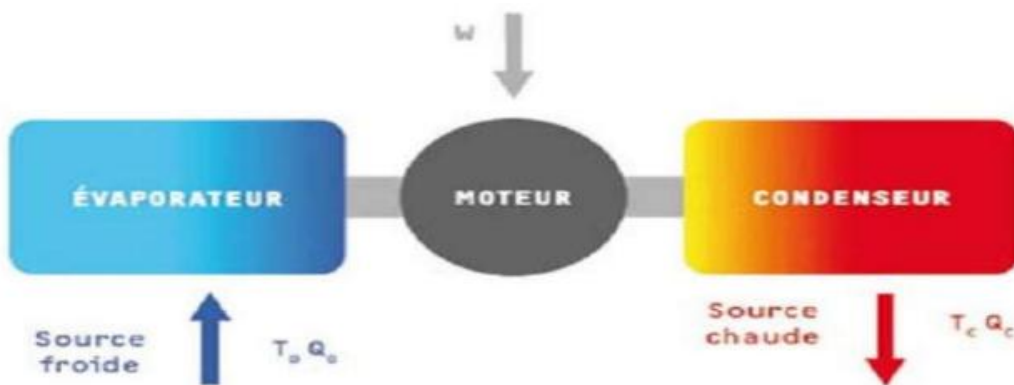


Figure 30 :Schéma de principe d'une machine thermodynamique

9- La forme d'échangeur de chaleur

9.1 Echangeur Vertical

Les sondes verticales sont installées dans un forage et scellées par du ciment. La profondeur peut atteindre plusieurs centaines de mètres, là où la température du sol est stable tout au long

de l'année. On y fait circuler en circuit fermé de l'eau glycosée. L'emprise au sol est minimale par rapport aux capteurs horizontaux. [28]

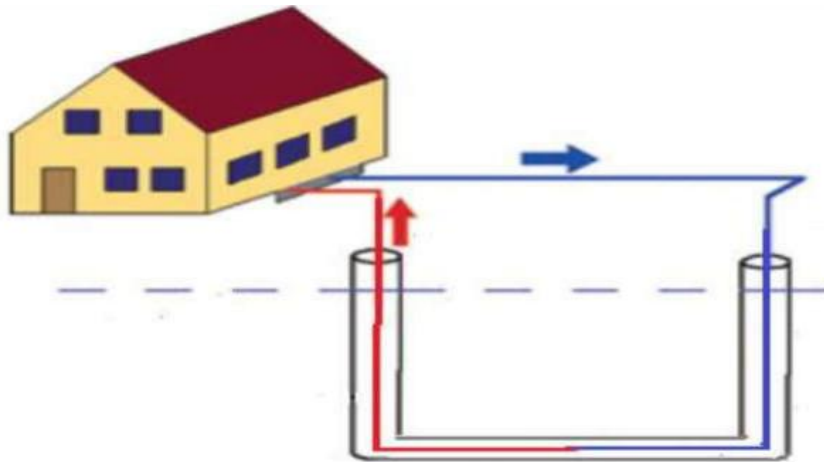


Figure 31. Echangeur vertical [28] .

9.2 Echangeur Horizontal

Il n'existe actuellement pas de réglementation ou de normes concernant la mise en œuvre des capteurs horizontaux utilisés dans des installations géothermiques. Seules des recommandations et des conseils pratiques sont accessibles.

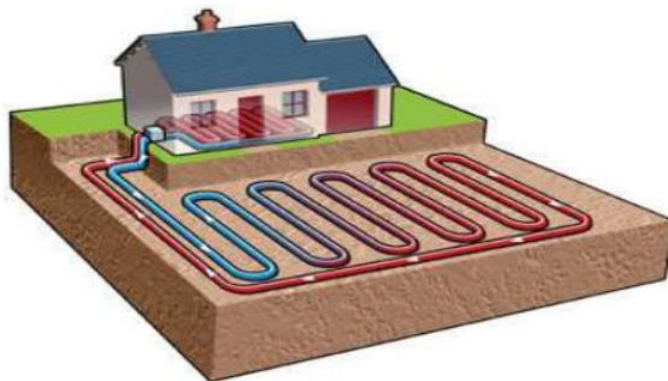


Figure 32. Echangeur horizontal.

9.3 Echangeur Serpentins

Les nappes de tubes (serpentins) sont enterrées sur un plan horizontal jusqu'à une profondeur maximale de 3 m dans le sol et en soutirent ou ajoutent de la chaleur. Comme les nappes de tubes ne sont normalement disposées qu'à une profondeur de 0,5 à 3 m, le climat joue un rôle pour ce genre d'exploitation de la chaleur. Dans ce cas précis, le sol sert d'accumulateur

d'énergie solaire, l'énergie géothermique proprement dite ne revêt alors qu'un rôle secondaire. Selon l'altitude topographique, les nappes de tubes permettent de retirer 20 à 30 W.m⁻² d'énergie thermique.



Figure 33. Echangeur Serpentins.

9.4 Echangeur Spiral

L'échangeur de chaleur à spirale est constitué de 2 canaux concentriques formés par deux plaques de métal enroulées de manière hélicoïdale. La distance entre les deux canaux est obtenue à l'aide de taquets soudés sur les plaques et tient compte des débits, de la taille des particules pour les fluides chargés et des pertes de charge. Ces taquets ont également pour effet de favoriser un écoulement turbulent dans chaque canal et d'améliorer ainsi le coefficient d'échange. L'échangeur peut être utilisé pour des transferts monophasiques (essentiellement liquide/liquide) ou avec changement de phase dans l'écoulement. Pour des applications monophasiques les fluides circulent généralement à contre-courant. Utilisé en mode bi phasique (condenseur ou évaporateur), la vapeur (ou le fluide à évaporer) s'écoule dans un canal complètement ouvert et le fluide réfrigérant dans un canal en spirale fermée. Ce type de système est utilisé dans des applications de chauffage/refroidissement. La conception de ces échangeurs leur donne la particularité intéressante d'être « autonettoyant ». En effet contrairement à des échangeurs qui distribuent le fluide dans des multiples canaux, la totalité du fluide s'écoule ici dans le canal de l'échangeur spiralé, sans zone morte.

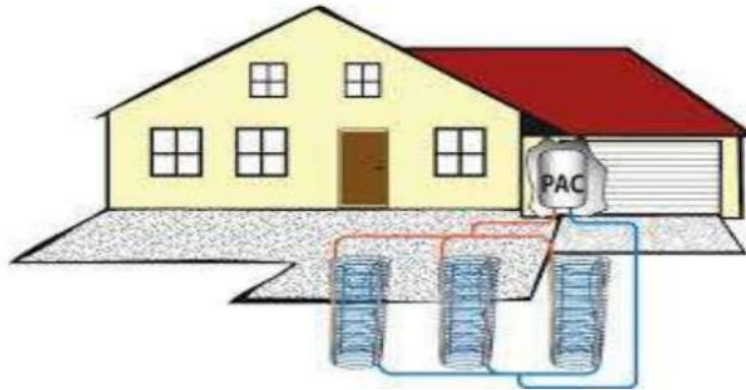


Figure 34. Echangeur spiral.

10. Nature du sol et son taux d'humidité

La capacité calorifique et la conductivité du sol ont une influence importante sur l'efficacité du système. Elles dépendent de la composition du sol mais aussi de son taux d'humidité et des migrations d'eau en son sein. La capacité thermique du sol correspond à la moyenne des capacités calorifiques de ses différents constituants : Minéraux, matières organiques, air et eau. L'eau possède une capacité et une conductivité thermiques supérieures à celles des autres constituants du sol. Ainsi, un sol humide emmagasine mieux la chaleur qu'un sol sec et la transmet plus facilement à l'air dans les canalisations de l'échangeur. Cet effet est mis à profit pour augmenter temporairement la performance des échangeurs thermiques air-sol en humidifiant le sol par arrosage.

II.6 Emplacement du puits canadien

Trois manières d'installation de l'échangeur air-sol sont possibles :

- Sous le bâtiment
- Dans les fouilles du bâtiment
- Dans le terrain

Techniquement, ces variantes sont équivalentes, la différence se situe au niveau des coûts de terrassement, la deuxième variante étant la plus intéressante financièrement ,aucun terrassement supplémentaire n'étant à réaliser. Lors de la mise en place des tuyaux, il faut éviter au maximum les coudes et angles créant des pertes de charge. de plus un écart entre les tuyaux parallèles d'au moins 0,8m doit être conservé. (29)

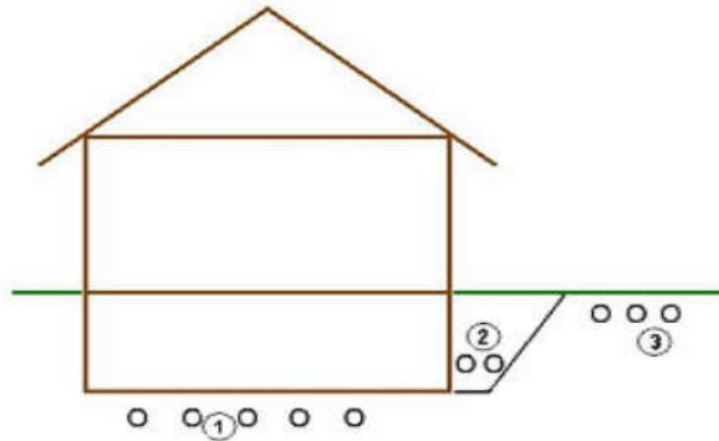


Figure 35. Emplacement du puits [28]

11-Les forages

L'exploitation de la géothermie nécessite l'existence en profondeur de la terre de deux paramètres importants la chaleur et l'eau. En effet c'est l'eau qui permet de véhiculer cette chaleur profonde en surface.

L'eau contenue dans les réservoirs géothermiques est remontée à la surface grâce à un forage; le plus fréquent est le forage Rotary .

Si la pression dans le gisement est insuffisante pour que le forage soit artésien, la production peut s'établir par l'intermédiaire d'une pompe. Une fois l'eau géothermale utilisée, elle est soit rejetée dans l'environnement si l'eau n'est pas salée. Dans le cas contraire, elle est réinjectée dans la nappe d'origine à l'aide de puits de réinjection. Le forage rotary nécessite l'emploi d'un fluide de forage préparé sur le chantier. Dans le cas de la circulation directe, le fluide est injecté en continu sous pression dans les tiges creuses de la ligne de sonde, il sort par les événements de l'outil et remonte à la surface dans l'espace annulaire (entre les tiges et les parois du trou).

11.1 -Principe de fonctionnement

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). Tout bêtement la chaleur du sol chauffe de l'eau que l'on envoie dans les maisons, ou la chaleur du sous-sol transforme de l'eau en vapeur qui fait tourner une turbine (Fig I.5)

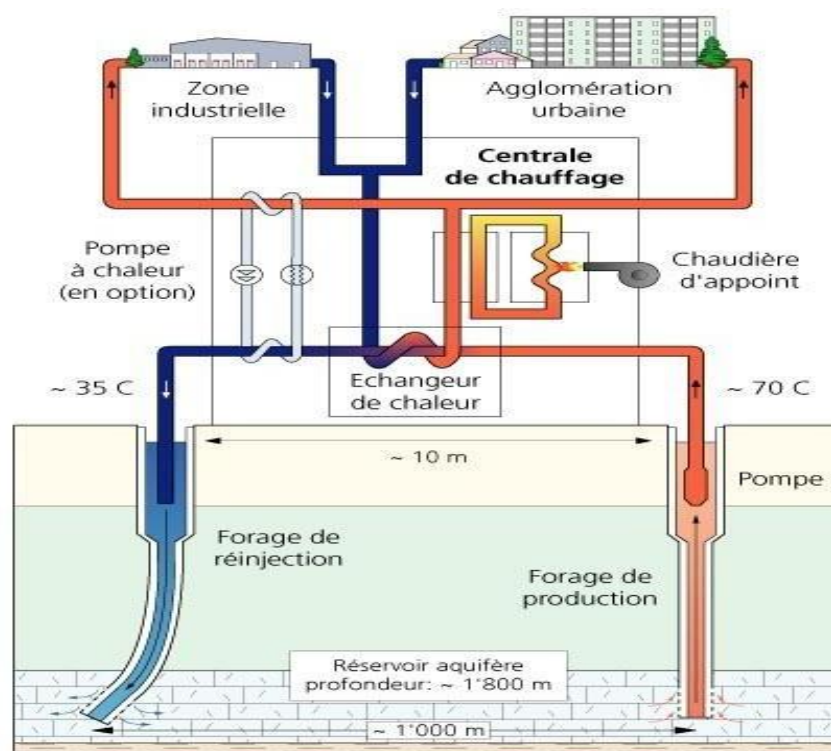


Figure 36. Principe de la géothermie

11.2-Comment fonctionne la pompe à chaleur :

La transmission de la chaleur naturelle au réseau de distribution de votre logement est un cycle en 3 grandes étapes.

1. **L'ÉVAPORATION** – Un liquide froid (fluide frigorigène (407c, 410A) (-5° -10° -0°) au contact de la terre, de l'eau, de l'air, se réchauffe et absorbe ainsi des calories. Il devient alors vapeur froide (5°).
2. **LA COMPRESSION** – La vapeur froide est comprimée par le compresseur qui la transforme en vapeur chaude (75°).
3. **LA CONDENSATION** – La vapeur chaude va se condenser sur l'eau de votre plancher chauffant ou de vos radiateurs qui est plus froide. Cette vapeur chaude redevient alors liquide et peut de nouveau récupérer de la chaleur naturelle de l'eau ou du sol.

12. Types de pompe à chaleur :

•**Pompe à chaleur Air/Air** : Cette pompe à chaleur capte la chaleur produite naturellement dans l'air extérieur de votre habitation. Elle propulse ensuite cette chaleur dans toutes vos pièces.

•**Pompe à chaleur Air/Eau** : Il s'agit de la pompe à chaleur la plus répandue en France. Elle utilise les calories présentes dans l'air pour ensuite chauffer l'eau de votre chaudière, votre ballon, vos radiateurs ou bien encore votre piscine.

•**Pompe à chaleur Eau/Eau** : Cette pompe à chaleur prélève les calories présentes dans une nappe phréatique, pour ensuite chauffer votre logement (fonctionnement identique à celui de la pompe à chaleur Air/Eau).

13. Propriétés du sol

Depuis plusieurs années, on a pensé à coupler les pompes à chaleur avec le sol. La température du sol, à quelques mètres de profondeur, est plus proche des températures que l'on souhaite avoir à l'intérieur des bâtiments. Comme on peut le voir illustré sur la figure 43, qui représente les températures moyennes mensuelles de l'air ambiant, du sol, et des eaux souterraines au Canada [30]

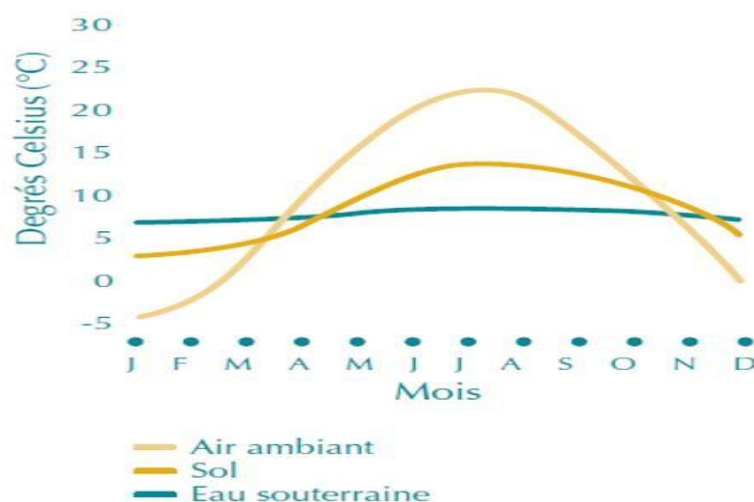


Figure 37. Températures moyennes mensuelles de l'air ambiant, du sol, et des eaux souterraines du Canada [30]

Une autre propriété du sol est la stabilité de la température à longue durée. Plus on va en profondeur, plus la température est stable et indépendante du temps. On peut dire qu'on a un environnement isolé quelques mètres en dessous de nos pieds. Cela est dû à la résistivité

thermique du sol.

14-Pompe à chaleur géothermique

14.1-Composants

La pompe à chaleur géothermique est considérée comme le système le plus efficace pour la climatisation des bâtiments .Ce système se compose de trois parties indispensables : le circuit souterrain (échangeur de chaleur), la pompe à chaleur, et le circuit de distribution:

- L'échangeur de chaleur (réseau de tuyauterie) enterré dans le sol représente la source de chaleur (ou de froid) du système. Un fluide caloporteur (eau ou eau + antigel) circule à travers la tuyauterie dans le but de prendre (ou céder) de la chaleur au sol. (Échange thermique eau/sol)
- La pompe à chaleur joue son rôle habituel : le transfert de l'énergie d'une source à un récepteur. Selon l'utilisation, l'échangeur de chaleur souterrain et le bâtiment changent de rôle. S'il y a besoin de chaud dans le bâtiment, le transfert de chaleur se fera depuis le sol vers le bâtiment (cas d'hiver). Et si le bâtiment connaît un besoin de rafraîchissement, la pompe à chaleur assurera le transfert des calories depuis le bâtiment vers le sol (cas d'été). (Échange eau/réfrigérant)
- Le circuit de distribution est responsable de transporter la chaleur ou le froid produit au niveau de la pompe à chaleur vers les locaux concernés.

Un autre composant à ne pas oublier dans le cas d'un système à boucle fermée est la (ou les) pompe de circulation. Cette pompe est installée entre la pompe à chaleur et l'échangeur de chaleur souterrain [3]. La puissance maximale de celle-ci est estimée à 16W/ kW de charge globale de pointe [3]. Sans oublier qu'elles sont utilisées aussi dans le réseau de distribution, entre la pompe à chaleur et les émetteurs de chaleur.

15 -Les économies réalisées et l'écologie :

Une pompe à chaleur consomme 30% d'énergie électrique pour couvrir la totalité de vos besoins en chauffage. En période hivernale, vous pouvez réaliser jusqu'à 75% d'économie d'énergie en comparaison avec un chauffage classique.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une définition de l'énergie géothermique, son effet et son utilisation par un dispositif appelé échangeur eau-sol. Ces types d'échangeurs de chaleur eau-sol mentionnés dans ce chapitre sont classés par forme, tels que l'échangeur de chaleur

vertical, l'échangeur de chaleur horizontal, l'échangeur à serpentin, l'échangeur de chaleur en spirale. Ainsi que la façon dont ces espèces travaillent et leurs utilisations.

Chapitre 4 : Simulation numérique du mécanisme de chauffage domestique par géothermie via le logiciel COMSOL multiphysics

1-Présentation du logiciel de simulation Comsol-Multiphysics

1-1- Définition

COMSOL-Multiphysics est un logiciel de simulation par éléments finis (FEM) permettant de résoudre tout type de problème pouvant être décrit par des équations aux dérivées partielles. Dans ce logiciel, les équations différentielles sont exprimées dans des petits volumes permettant leur expression sous forme de différences simples et transformant le problème continu en un problème comportant un nombre fini d'équations et d'inconnues pouvant se résoudre avec des techniques d'algèbre linéaire.

1-2 -Avantages de conception avec Comsol-Multiphysics

Le principal but de la création de COMSOL-Multiphysics est d'avoir un logiciel où les scientifiques et les ingénieurs peuvent formuler, à l'aide de l'interface utilisateur, n'importe quel système d'équations aux dérivées partielles (EDP) sur la base des lois de la physique et surtout de se baser sur les zones les plus communes dans la physique et en engineerings. Cette interface est basée sur un interpréteur d'équation qui formule une discrétisation par éléments finis, par le système entièrement couplé. Des interfaces de modélisation prédéfinis pour les différents domaines de la physique appliquée, y compris des couplages multi physiques.

Grâce à la technologie sous-jacente, les propriétés, les sources, les puits et les conditions aux limites peuvent être des fonctions des variables modélisées et leurs dérivées partielles.

1-3 L'interface utilisateur de Comsol-Multiphysics

1-3-1-L'interface de COMSOL, peut être séparée en quatre parties :

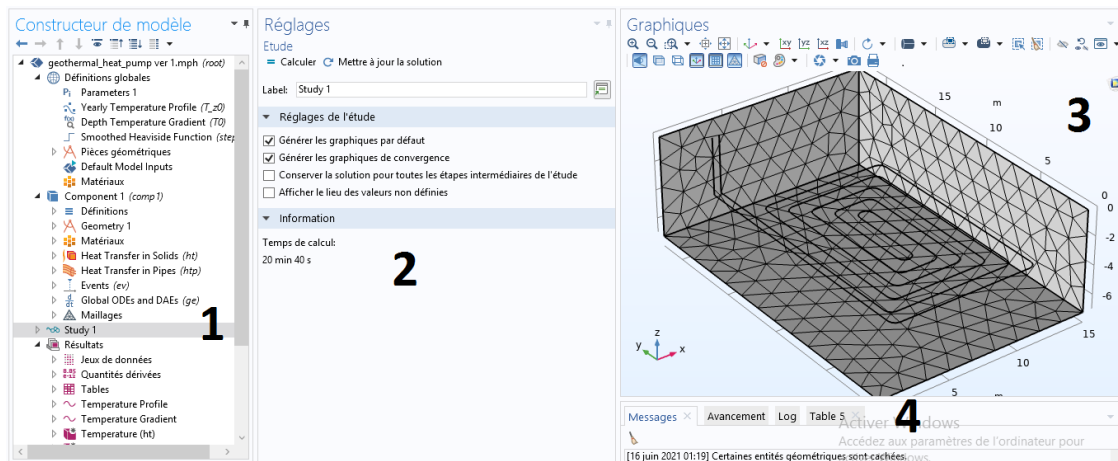


Figure 38. L'interface du logiciel de simulation de comsol-multiphysics.

À gauche, on trouve le Model Builder ① dans lequel est défini le problème à étudier. Dans le détail, le menu Global Définitions regroupe notamment les variables et paramètres du problème. Dans le menu Component 1 sont définis le système de coordonnées (Définitions) par défaut le système cartésien, la géométrie (Géométrie), les matériaux (Materials), la ou les physique(s) appliquées aux problèmes et le maillage (Mesh). Le menu suivant Study 1 permet de définir les paramètres de résolutions, (stationnaire ou dépendant du temps), ainsi que les options du solveur. Finalement, le menu Résultats regroupe l'ensemble des options de post traitement des données.

La colonne directement à droite ② (Setting) permet d'entrer les données relatives aux options sélectionnées dans le Model Builder. Par exemple, les dimensions de l'objet créé dans Géométrie. C'est aussi dans cette fenêtre que les valeurs initiales et les conditions frontières de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis.

En haut à droite, l'interface d'affichage graphique Graphics ③ permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. Au haut de cette fenêtre se trouvent les options permettant de changer le grossissement de l'affichage, l'orientation d'un objet tridimensionnel, cacher certains éléments, etc.

Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi au haut de cette fenêtre.


Finalement, directement au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, une fenêtre ④ permet de visualiser les éventuels messages d'erreurs, la progression des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée.

2-- Modélisation et simulation par Comsol-Multiphysics


2-1- Création du modèle de simulation

① Ouvrez une nouvelle simulation COMSOL, sélectionnez Model Wizard. Cette option permet de définir pas à pas les modalités du problème.

② Choisissez ensuite un modèle spatial en 3D.

③ Vous devez par la suite choisir le modèle physique approprié. Sélectionnez le modèle Heat Transfer in Solids (ht) et Heat Transfer in Pipes (htp) dans la catégorie Chemical Species Transport. Cliquez sur Add puis sur .

④ Après avoir sélectionné le modèle, vous devez sélectionner le type d'étude désiré. Sous PresetStudies, choisissez le cas d'étude en régime permanent (Stationary),

puis cliquez sur .

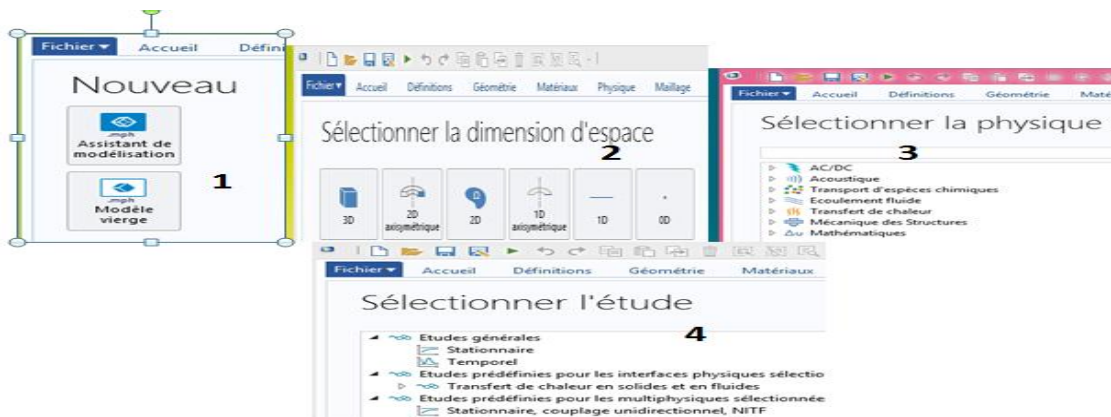


Figure 39. Les étapes de création d'un modèle de simulation

2-2- Définition des paramètres globaux

Dans le Model Builder, faites apparaître le menu contextuel (clic droit de la souris) de Global Definitions et cliquez sur Paramètres (voir Fig.46). Lorsque vous définissez une nouvelle variable, il est possible et fortement conseillé de lui associer une unité. Les unités doivent être mises entre crochets.

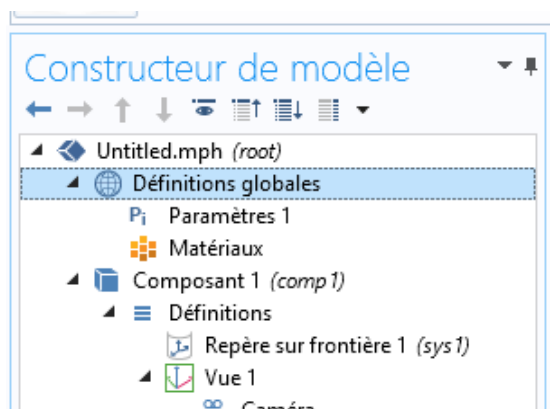


Figure 40. Les paramètres ajoutés au modèle.

Tableau 3. Paramètres du modèle de simulation

Name	Expression	Value	Description
pattern	3	3	Paramètre pour sélectionner le motif
d_pipe	36[mm]	0.036 m	Diamètre du tube dans le sol
flowrate_pipe	1[l/s]	0.001 m ³ /s	Débit à l'intérieur des tuyaux
heat_demand	30[kW*h]	1.08E8 J	Demande de chaleur quotidienne
Power	4[kW]	4000 W	Puissance de pompe à chaleur
Dt	30[s]	30 s	Zone de transition d'état de chauffage lissée
Depth	4[m]	4 m	Profondeur de l'échangeur de chaleur
Tz_depth	0.5[K/m]	0.5 K/m	Gradient de température
Month	1	1	Index du mois
humidity	1	1	Humidité du sol
k_soil	0.18[W/(m*K)] + (1.5 - 0.18)*humidity	1.5 W/(m·K)	Sol thermique du sol thermique

2.3- Création de la géométrie du problème

La conception de la géométrie de cette simulation est suivie par les étapes suivantes :

1. *Première étape* : on clique par le bouton droit de la souris sur Géométrie dans Model Builder et points.
2. *Seconde étape* : on ajoute les coordonnées des points (x, y), puis attache entre les points pour obtenir la forme géométrique (Fig.7).
3. *Troisième étape* : convertir la forme géométrique de 2D à 3D (Fig.8).
- 4.

En fin de compte, nous cliquons sur Construire tout.

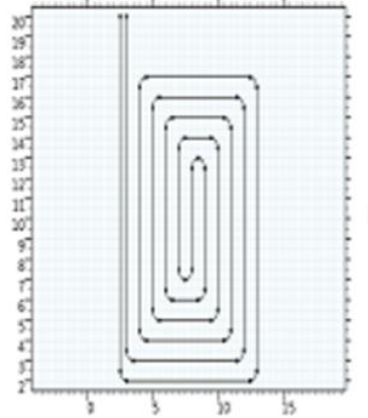


Figure 41. Construction de la géométrie 2D.

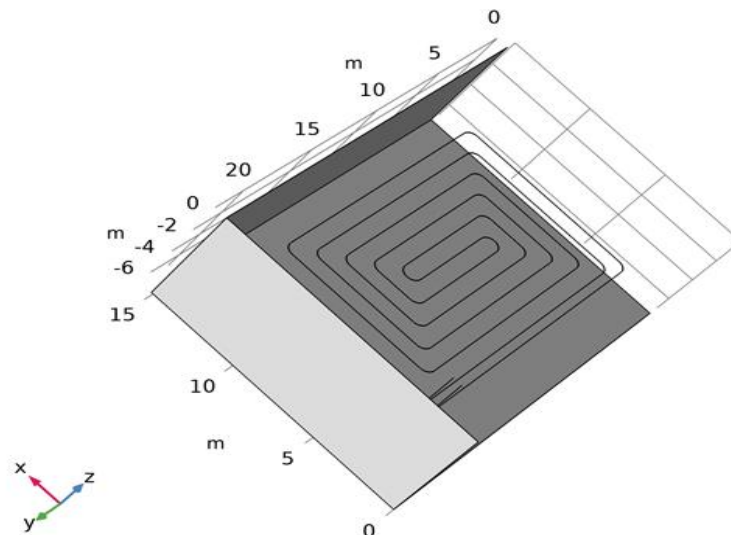


Figure 42. Construction de la géométrie 3D.

2.3.1- Les propriétés du matériau de la géométrie étudiée

L'insertion des matériaux aux formes géométriques précédentes, est faite par les étapes suivantes :

- ① On clique sur le bouton droit de la souris sur le sous-menu Ajouter du matériel existée dans le Model Builder.
- ② On trouve une nouvelle fenêtre à droite de la liste Ajouter du matériel sous l'onglet (gaz et liquides).
- ③ On choisit dans la liste de matériaux (gaz et liquides) sous l'onglet Intégré.

④ Puis l'ajouter au formulaire en cliquant par le bouton de la souris sur les matériaux sélectionnés.

Ces matériaux sont attachés avec le génie virtuel. On peut voir les domaines attachés des matériaux en bleu lorsque la sélection

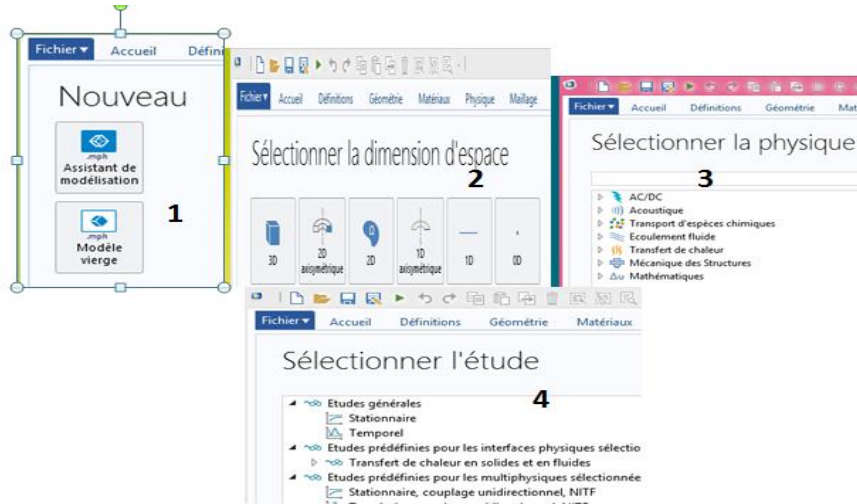


Figure 43. Insertion de propriétés des matériaux.

Les matériaux utilisés dans la forme géométrique dans le sol et l'eau à l'intérieur du tube :

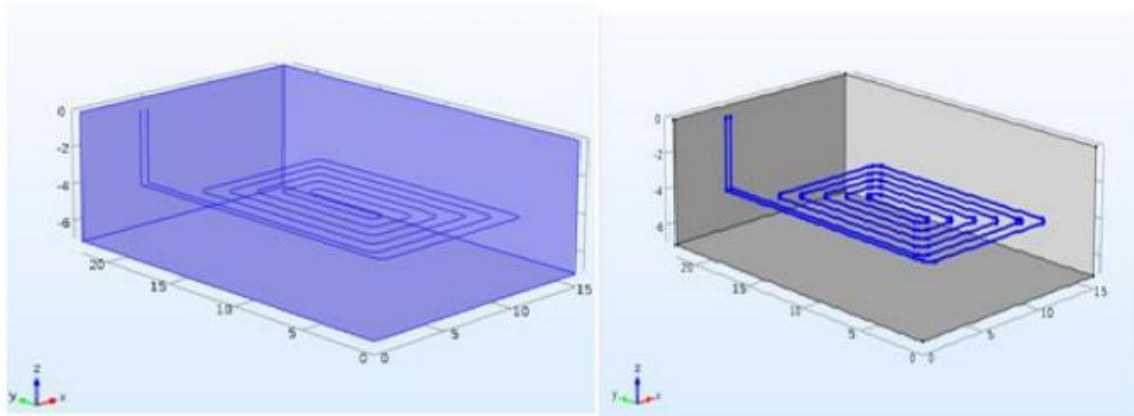


Figure 44. Matériaux utilisés en géométrie (sol et eau).

Tableau 4. Paramètres de matériau

Name	Valeur	Unité
Viscosité dynamique de l'eau	$\eta(T[1/K])[\text{Pa}\cdot\text{s}]$	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
Ratio de chaleurs spécifiques de l'eau	1.0	1
Capacité thermique à pression constante de l'eau	$C_p(T[1/K])[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
Densité de l'eau	$\rho(T[1/K])[\text{kg}/\text{m}^3]$	kg/m^3
Conductivité thermique de l'eau	$k(T[1/K])[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
Conductivité thermique du sol	1.5	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
Densité du sol	1742	kg/m^3
Capacité thermique à pression constante du sol	1175	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

3-Transfert de chaleur dans les solides

On ajoute les conditions de frontière telles que les suivantes :

On sélectionne le module du composant transfert de chaleur dans les solides ((HP) dans la liste Modèle Boulder, puis on ajoute les conditions (la température initiale, isolation thermique et les conditions aux limites de flux thermique) dans le cas des matériaux solides.

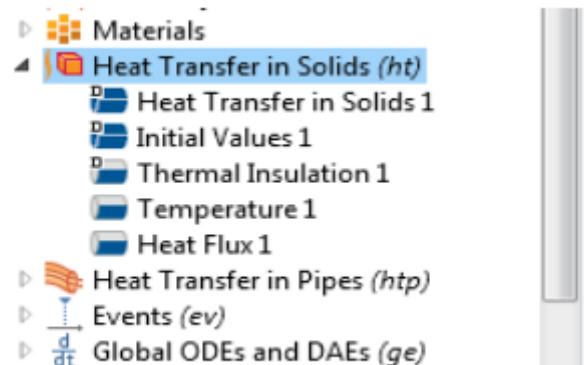


Figure 45. Sélection du module transfert de chaleur dans les solides

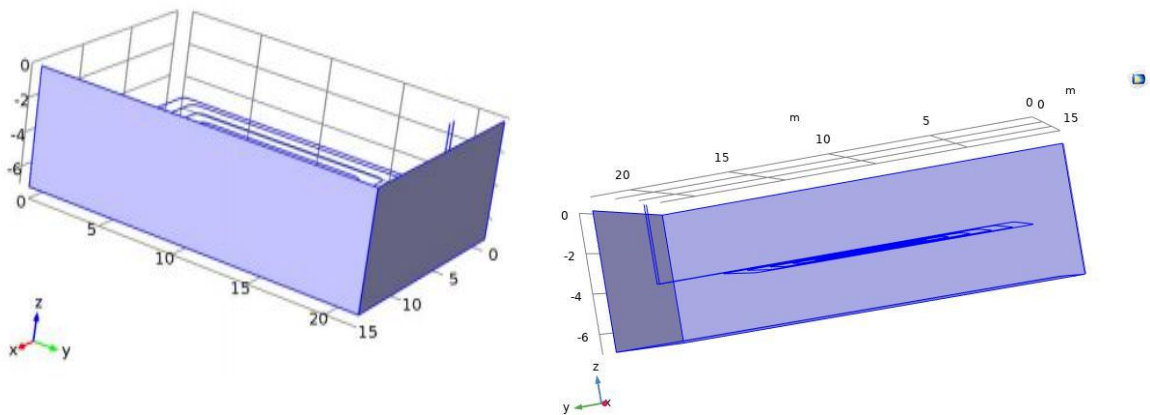


Figure 46. Conditions aux limites dans les frontières de la géométrie de l'échangeur.

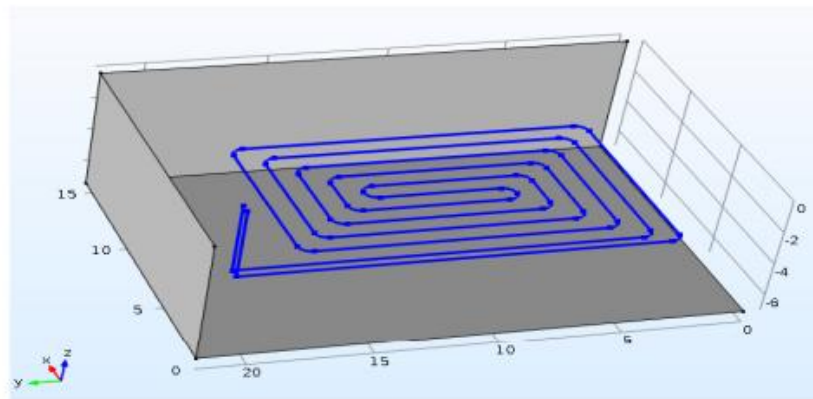


Figure 47. Transfert de chaleur dans les tubes

- Dans la fenêtre Model Builder, cliquez avec le bouton droit de la souris sur Transfert de chaleur dans les tuyaux (htp) et spécifiez Transfert de chaleur.
- Dans la fenêtre Paramètres de transfert thermique, nous sélectionnons la position thermique et la conductivité thermique de la pièce.

4- Température à l'entrée et à la sortie de l'eau :

Pour étudier la température à l'entrée et à la sortie de l'eau, suivez les étapes suivantes

- Dans la fenêtre Model Builder, cliquez avec le bouton droit sur le transfert de chaleur dans les tuyaux (htp) et choisissez la température.
- Dans la fenêtre "Paramètres de température", nous localisons la section de température. ▪ Dans le champ de texte T_{in} , nous avons écrit l'équation suivante :

$T = T_{in}$

- Dans la barre d'outils Physique, cliquez sur "Points" et sélectionnez Sortie de chaleur.
- Nous avons identifié seulement le point 11.

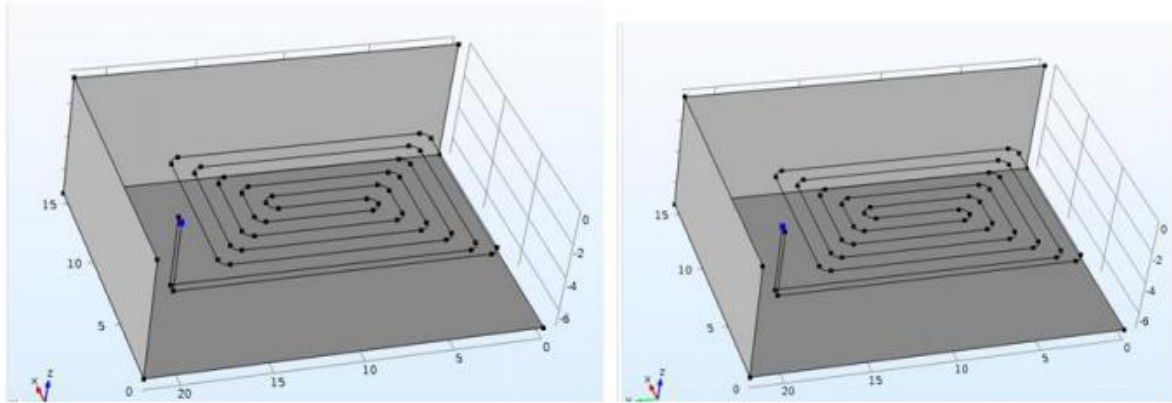


Figure 48. Température à l'entrée et à la sortie de l'eau.

5-Maillage

Pour créer un Maillage, vous devez suivre les étapes suivantes :

- La première étape consiste à cliquer avec le bouton droit sur Maillage dans le Model Builder.
- La deuxième étape Nous faisons un cliquer droit sur Maillage et sélectionnez Plus d'opérations, puis sélectionnez Bord.
- La troisième étape, nous entrons dans les paramètres pour le tube sont (point d'entrée et de sortie, et les divisions du réseau le long du tube).
- La quatrième étape Nous faisons un cliquer droit sur Maillage et choisissez Free Tetrahedral.
- La cinquième étape Entrez les paramètres pour la géométrie uniquement.
- Enfin, nous cliquons sur Construire tout.

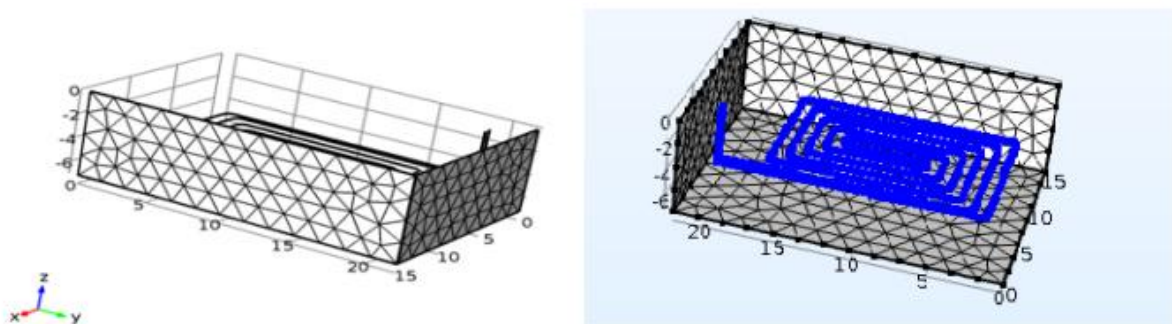


Figure 49. Le maillage de la structure.

Tableau 5. Caractéristiques du maillage

Description	Valeur
Qualité minimale de l'élément	0.1261
Qualité moyenne des éléments	0.7037
Éléments tétraèdres	39244
Éléments triangulaires	1088
Éléments de bord	559
Éléments Vertex	54

En supposant que les propriétés du fluide sont indépendantes de la température, la température d'entrée du collecteur de chaleur nécessaire pour atteindre un certain taux d'extraction de chaleur, $P(t)$ est donné par :

$$T_{in} = T_{out} - P \rho C_p V$$

où ρ et C_p la densité et la capacité calorifique spécifique du fluide à l'intérieur des canalisations et V le débit volumique, ici égal à 1 [l / s].

L'extraction de chaleur dynamique est déclenchée en fonction d'une demande de chaleur journalière typique d'une maison unifamiliale. Le processus d'extraction de chaleur est actif chaque jour jusqu'à ce que la chaleur demandée soit extraite. Lorsque la demande est atteinte, l'extraction de chaleur est arrêtée mais le débit de fluide dans les tuyaux continue à un débit plus faible. Dans cette application, ce débit pendant l'inaction de la pompe est fixé à 1 / 10ème du débit de fonctionnement,

soit 0,1 [l / s]

2-Le chauffage géothermique est une méthode écologique et économe en énergie pour alimenter en chaleur des maisons modernes et bien isolées. Les coûts d'investissement sont plus élevés que pour le chauffage au gaz ou au mazout, il est donc nécessaire d'étudier les possibilités de disposer des capteurs de chaleur dans le sous-sol.

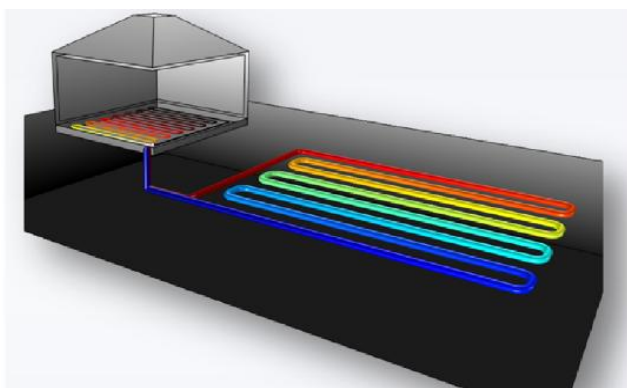


Figure 50. Exemple de batterie de récupération de chaleur dans un jardin, reliée à une habitation via une pompe à chaleur

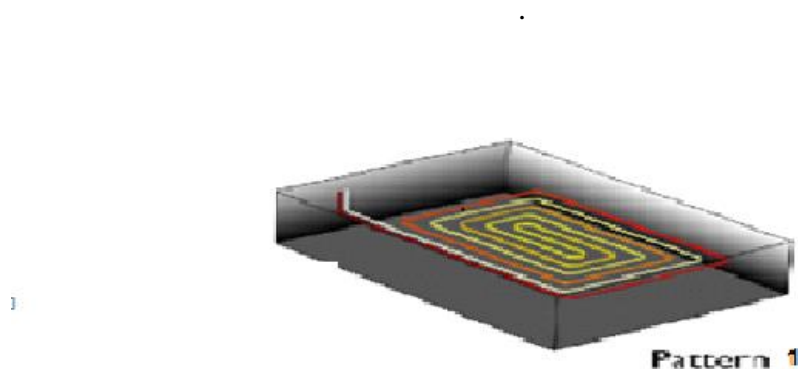


Figure 51. Modèle pour les collecteurs de chaleur.

6-Définition du modèle

Le modèle de disposition des tuyaux sont illustrés à la Figure 2. La fonctionnalité de sous séquence de géométrie dans COMSOL Multiphysics offre la possibilité d'effectuer l'analyse sur différents arrangements de tuyaux dans le même modèle à l'aide d'un balayage paramétrique.

Ce modèle utilise des fonctions et des événements pour décrire les conditions réelles de Fonctionnement. Pour le sous-sol, un gradient de température avec la profondeur est prescrit. En surface, une température dépendante du temps est appliquée qui correspond aux variations de température typiques en Europe centrale.

En supposant que les propriétés du fluide sont indépendantes de la température, la température d'entrée du collecteur de chaleur nécessaire pour atteindre un certain taux d'extraction de chaleur Où ρ et C_p la masse volumique et la capacité calorifique spécifique du fluide à l'intérieur des conduites et V le débit volumétrique, ici égal à 1 l / s.

L'extraction de chaleur dynamique est déclenchée en fonction d'une demande de chaleur quotidienne typique d'une maison individuelle. Le processus d'extraction de chaleur est actif chaque jour jusqu'à ce que la chaleur demandée soit extraite. Lorsque la demande est atteinte, l'extraction de chaleur est arrêtée mais l'écoulement du fluide dans les tuyaux continue

toujours à un débit inférieur. Dans cette application, ce débit lors de l'inaction de la pompe est fixé à 1 / 10ème du débit de fonctionnement, soit 0,1 l / s.

7-Résultats et discussion

-Effet des conditions climatique sur la température de surface du sol selon les différentes profondeurs :

Dans cette partie nous avons considéré les conditions climatiques de la ville de Mostaganem en terme de température et d'humidité relative.

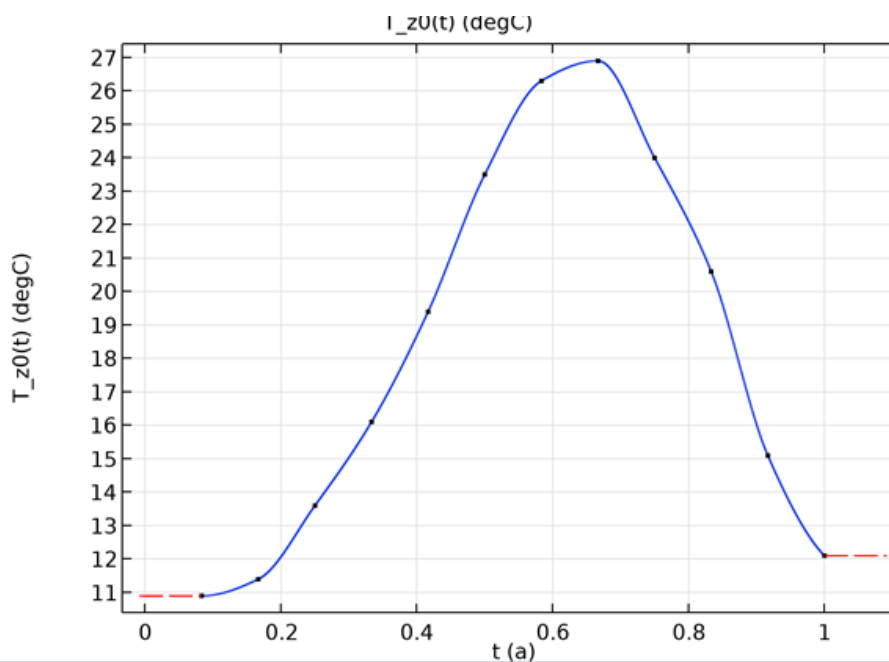


Figure 52. Evolution de la température de surface dans la période annuelle.

La figure 58 représentée la variation de la température du sol dans la période annuel, on observé une augmentation de la température du sol dans les premières mois (du 1 à sixième mois), et puis on remarque une diminution progressive de la température du sol jusqu'au la fin de l'année. Cela est dû à l'effet des conditions climatiques qui entraîne l'acquisition de température à la surface du sol

Effet de profondeur d'enfouissement du tube sur la distribution de la température

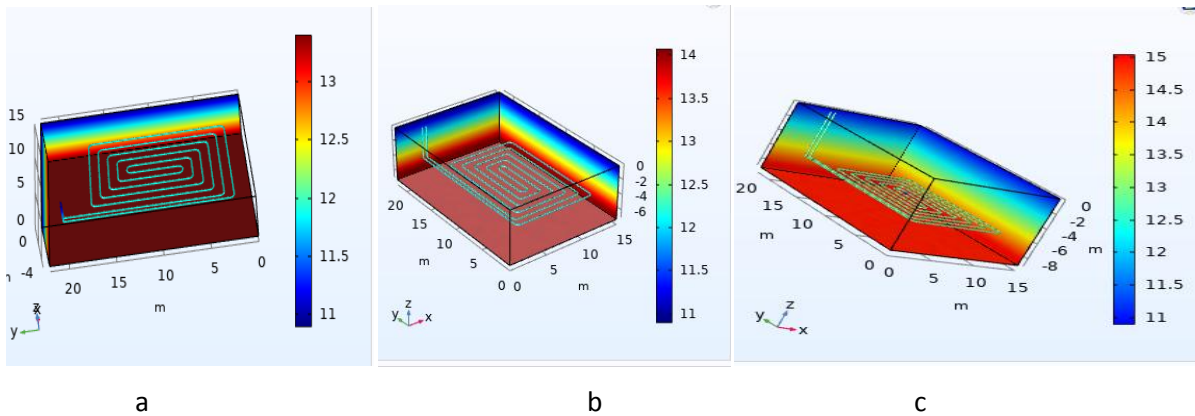


Figure 53. Profil de distribution de température à diérentes profondeurs

(a) 2m (b) 4m (c) 6m

Le profil de distribution de la température de l'eau de l'entrée à la sortie de l'échangeur dans une période de deux jours est représenté à La figure59 A partir ces figure, on remarque que l'augmentation de la température de l'eau à la sortie du tube qui est a profond de 2m et attient de 13C° Jusqu'à 14C ° est a profond de 4m est a atteint de 14c°est en remarque la température de L'eau a la profondeur de 6m et atteint de 15c°, sachant que la température de l'eau à l'entrée est presque de 11c°, cette augmentation est causée par l'effet de la profondeur entre la conductivité du sol et le serpentin de l'échangeur.

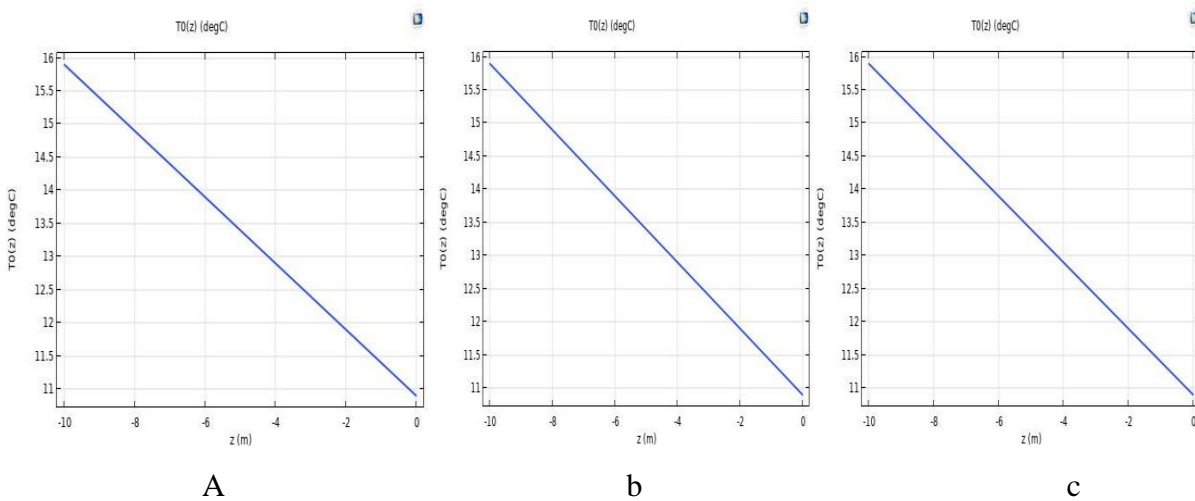


Figure 54. Variation de la température de sol selon profondeur de sol.

(a) 2m (b) 4m (c) 6m

La figure 60 représente la variation de la température de sol en fonction de leur profondeur, on a observé une augmentation linéaire entre la température de sol et la profondeur, tel que pour une profondeur à l'ordre de 10 mètres la température de sol est atteinte à une valeur de 16°C.

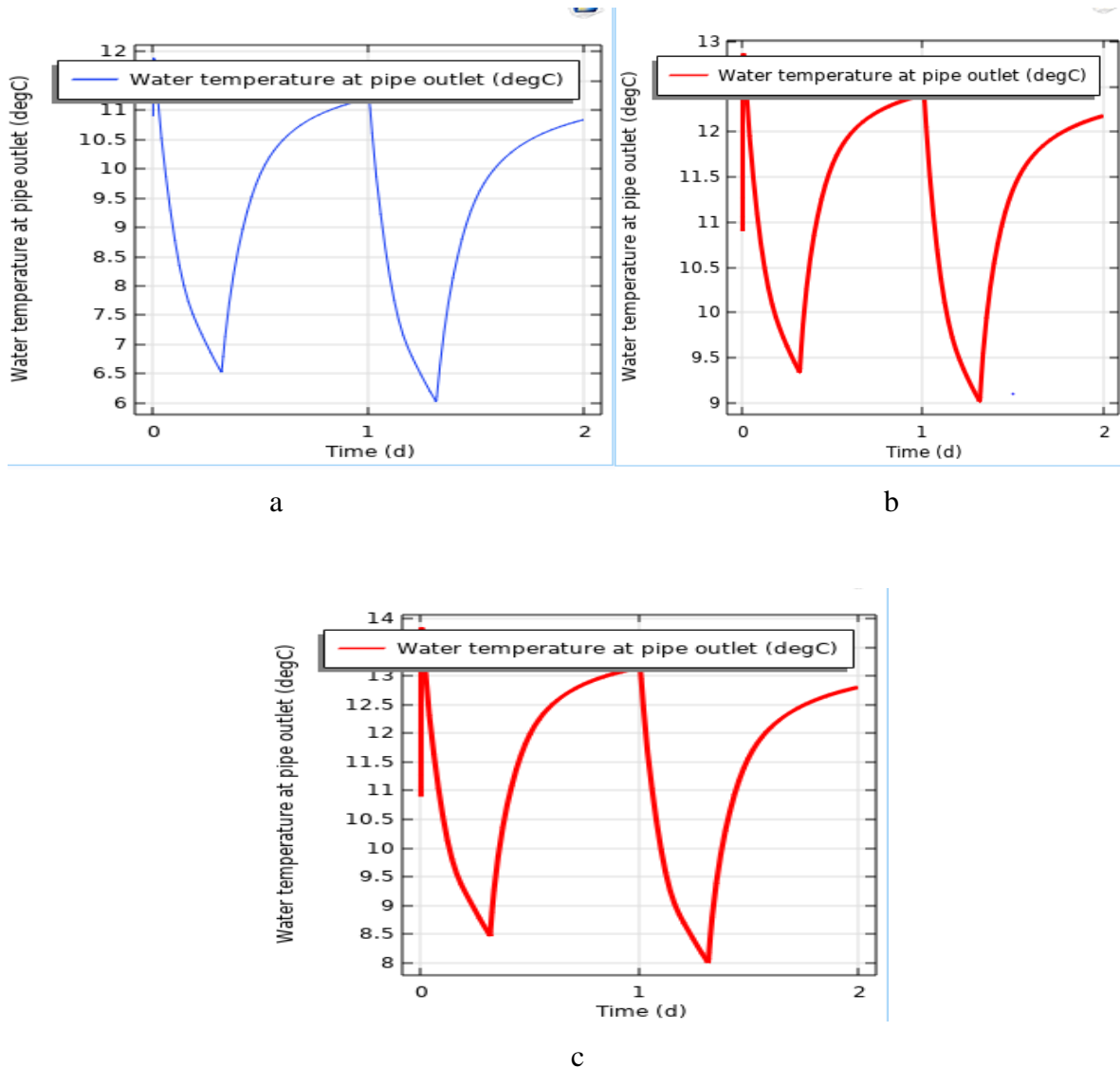


Figure 55. Evolution de la température d'eau dans l'échangeur en fonction du temps selon la différente profondeur

(a) 2m

(b) 4m

(c) 6m

La figure 61 présenté la température de l'eau à la sortie en fonction du temps pour le modèle de serpent. C'est important pour s'assurer que le fluide à l'intérieur de serpent reste au-dessus d'une certaine valeur, on remarque une augmentation de la température de l'eau est atteint une différent température max dans les tes trois cas par exemple dans la profondeur de

2m la température est atteint a 12c° après elle diminue jusqu'à 6,5C° après elle reprendre augmentation jusqu'a 11,5c° ensuite elle diminue mais a les profondeurs de 4m a 6m elle fait des températures maximal de 13c° a 14c° après a profondeur de 4m elle la température diminue de presque de 9,4c° après une augmentation de 12,5c° après elle diminue jusqu'a 9c° est a la profondeur de 6m en remarque une diminution de température de 14c° a 8,5c° après elle augmente jusqu'a 13C° après un jour elle diminue encore a 8c° après elle diminue après elle fait une augmentation de 13C° . Dans cet exemple, l'eau est utilisée comme fluide de travail est on conclut que la profondeur joue un rôle très important de la température de sols

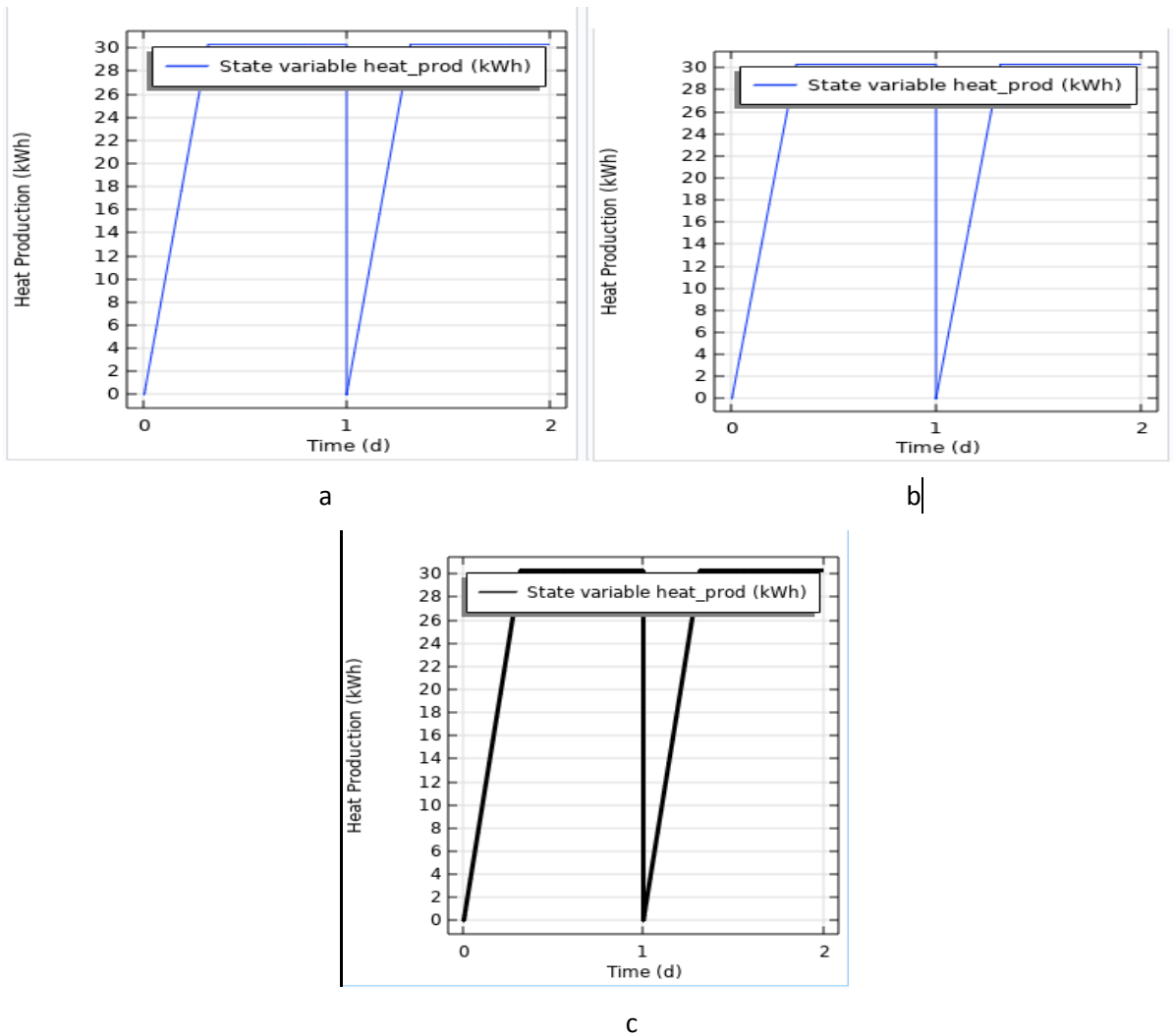


Figure 56. Variation du flux de chaleur produite par l'échangeur en fonction du temps. (Période de deux jours en hiver).

(a) 2m

(b) 4m

(c) 6m

L'état de fonctionnement de l'échangeur dans le temps est montré à la figure 62. L'état de l'échauffement dépend de la production de chaleur quotidienne. Dès que la chaleur la production atteint la demande quotidienne, l'état du chauffage est éteint jusqu'au lendemain. La production de chaleur les deux jours du temps de simulation. Juste après l'exigence quotidienne de 30 [kWh], la production est arrêtée jusqu'au lendemain.

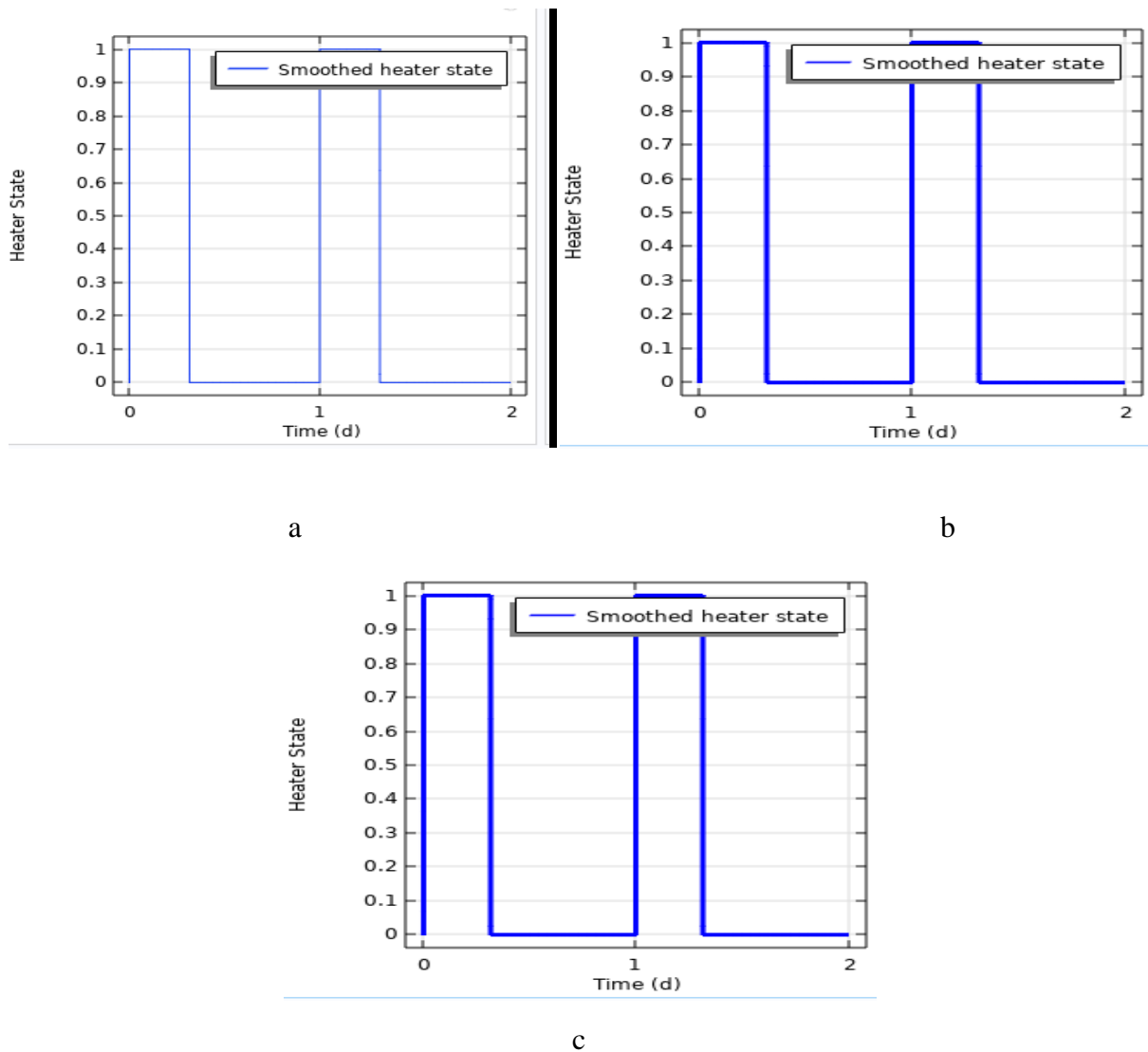


Figure 57. Variation du l'état de chauffeur de produite par l'échangeur en fonction du temps

(a) 2m

(b) 4m

(c) 6m

La figure 63 ce présentes la variation du l'état de chauffeur de produite par l'échangeur en fonction du temps

- Effet des conditions climatique sur la température de surface du sol selon les différent humidité de sole

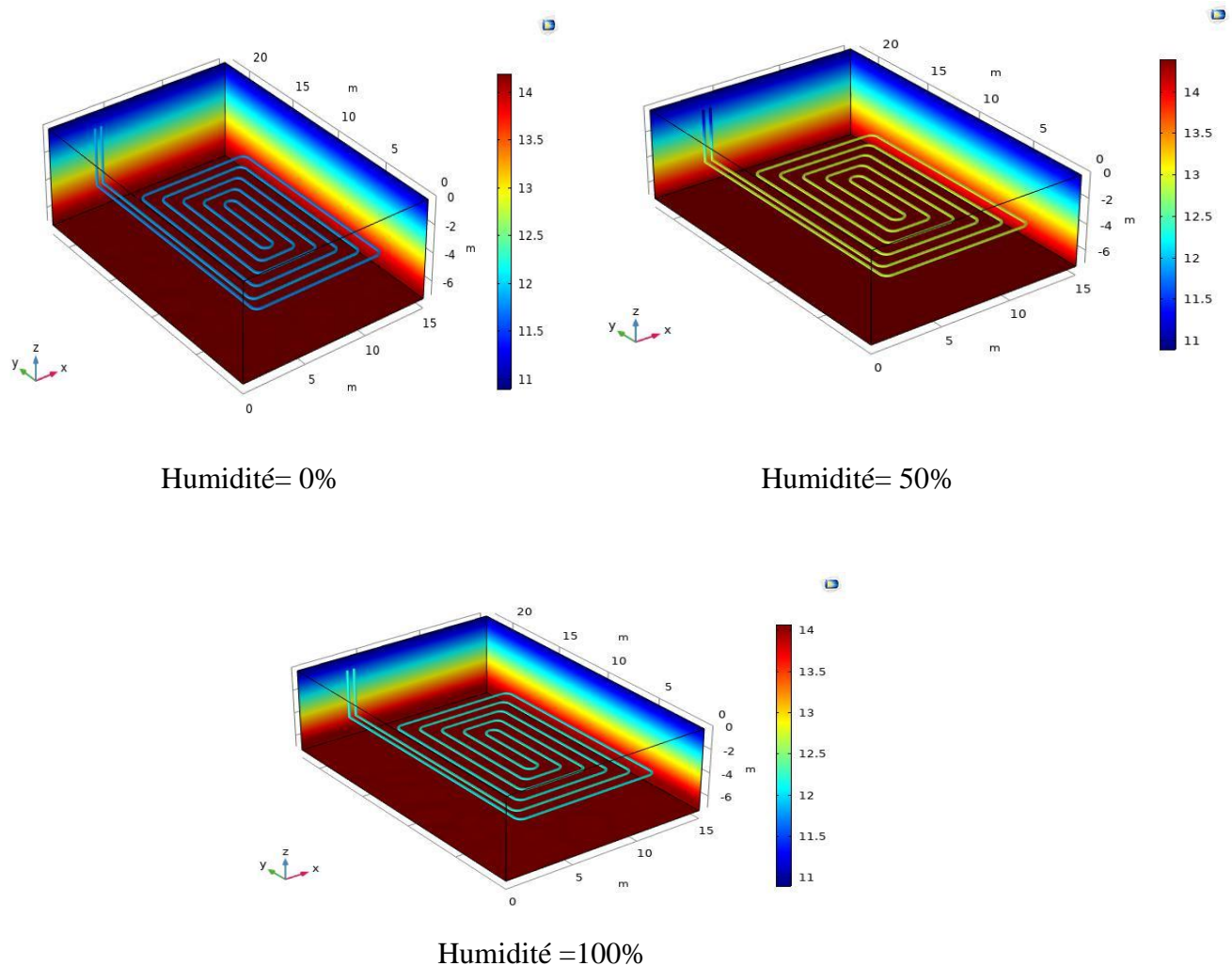


Figure 58. Profil de distribution de température de sol selon les différent cas d'humidité

Le profil de distribution de la température de l'eau de l'entrée à la sortie de l'échangeur dans une période de deux jours est représenté à La figure 64. A partir cette figure, on remarque que l'augmentation de la température de l'eau à la sortie du tube et atteint presque 14° mai en remarque un petit différence de la température dans les trois cas on trouve dans l'essai de l'humidité 0% au milieux de tube est plus froide est a 13% que l'essai de humidité de 50% est a l'essai de l'humidité de 1% , sachant que la température de l'eau à l'entrée est en général 11° , cette augmentation est causée par l'effet d'échange thermique entre la conductivité du sol et le serpentin de l'échangeur qui est l'humidité .

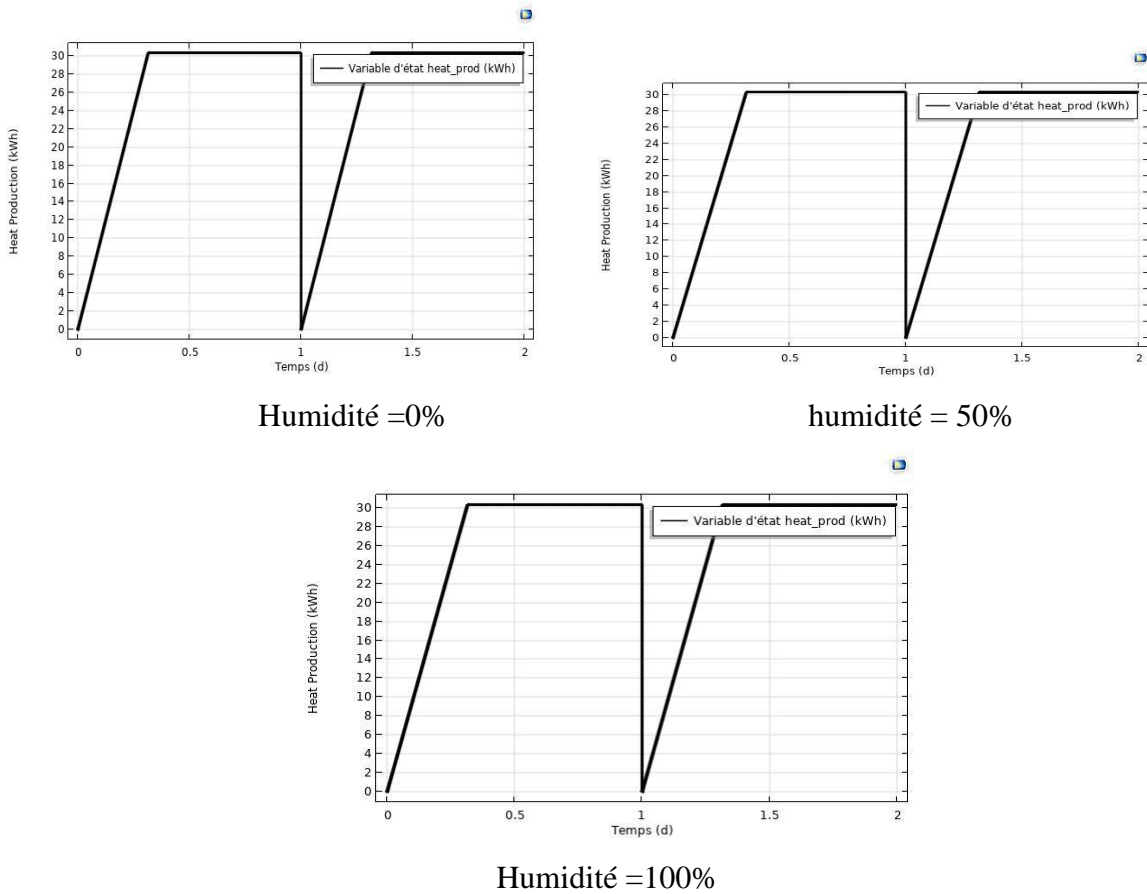
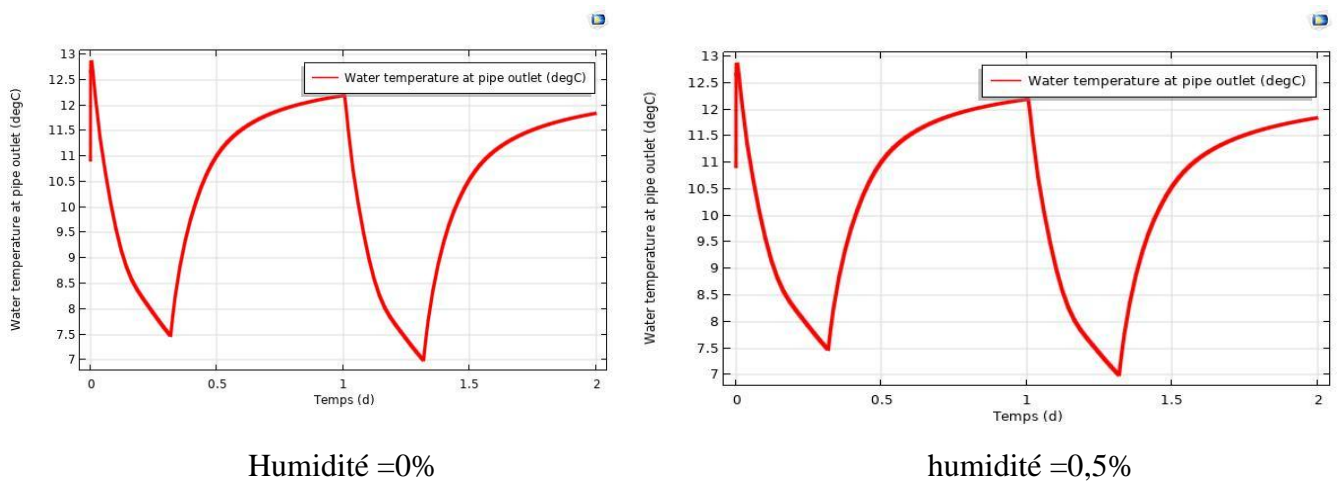
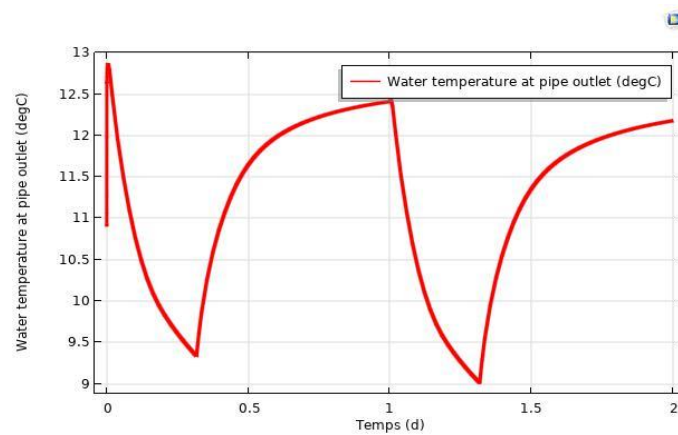


Figure 59. Variation du flux de chaleur produite par l'échangeur en fonction du temps.

L'état de fonctionnement de l'échangeur dans le temps est montré à la figure 65. L'état de l'échauffement dépend de la production de chaleur quotidienne. Dès que la chaleur la production atteint la demande quotidienne, l'état du chauffage est éteint jusqu'au lendemain. La production de chaleur les deux jours du temps de simulation. Juste après l'exigence quotidienne de 30 [kWh], la production est arrêtée jusqu'au lendemain.





Humidité = 100%

Figure 60. Evolution de la température d'eau dans l'échangeur en fonction du temps selon la différente valeur d'humidité

La figure 66 présenté la température de l'eau à la sortie en fonction du temps pour le modèle de serpent. C'est important pour s'assurer que le fluide à l'intérieur de serpent reste au-dessus d'une certaine valeur. Dans les cas de humidité de 0% est a 0,5% en remarque une augmentation de la température de 11c° a 13C° Après une diminution progressive jusqu'a 7,5c° après une augmentation jusqu'a 12,5 c° en suit une deuxième diminution jusqu'a 7c° après une augmentation est atteint une valeur de 12c° mai dans le cas ou nous avons travaille avec humidité 1% on a remarque un augmentation de la température de 11C° a 13C° après elle diminue jusqu'a 9,4c° Après elle augmente jusqu'a 12,5 C° après le premier jour elle fait elle fait une diminution jusqu'a 9C° après elle augmente jusqu'a 12,1C° ,dans cette exemple, l'eau est utilisée comme fluide de travail.

- Effet des conditions climatique sur la température de surface du sol selon les différent diamètre :

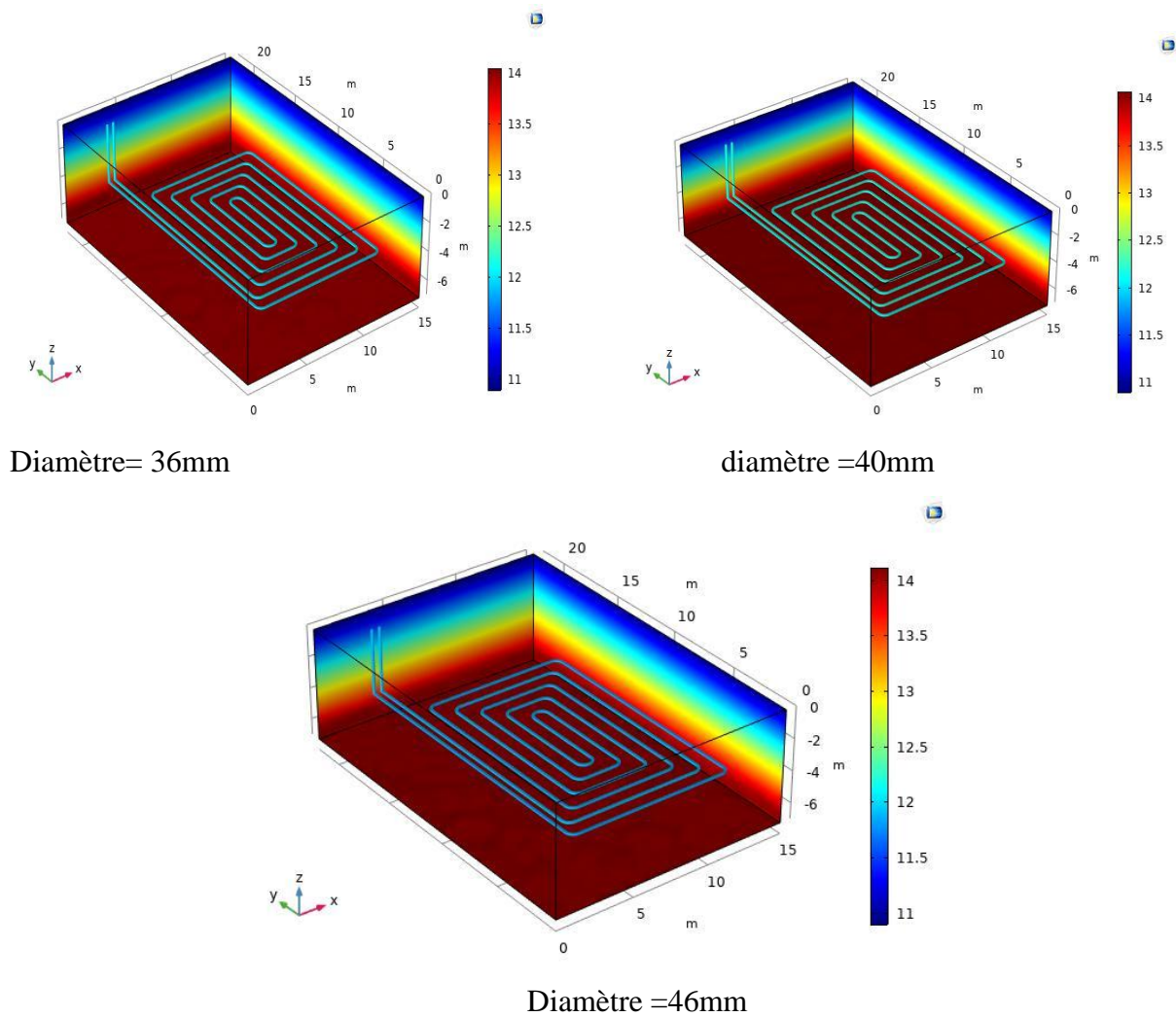


Figure 61. Profil de distribution de température de sol selon les différents diamètres de tube

Le profil de distribution de la température de l'eau de l'entrée à la sortie de l'échangeur dans une période de deux jours est représenté à La figure 68. A partir cette figure, on remarque que l'augmentation de la température de l'eau à la sortie du tube et atteint de 14°C dans les, sachant que la température de l'eau à l'entrée est en général 11°C .

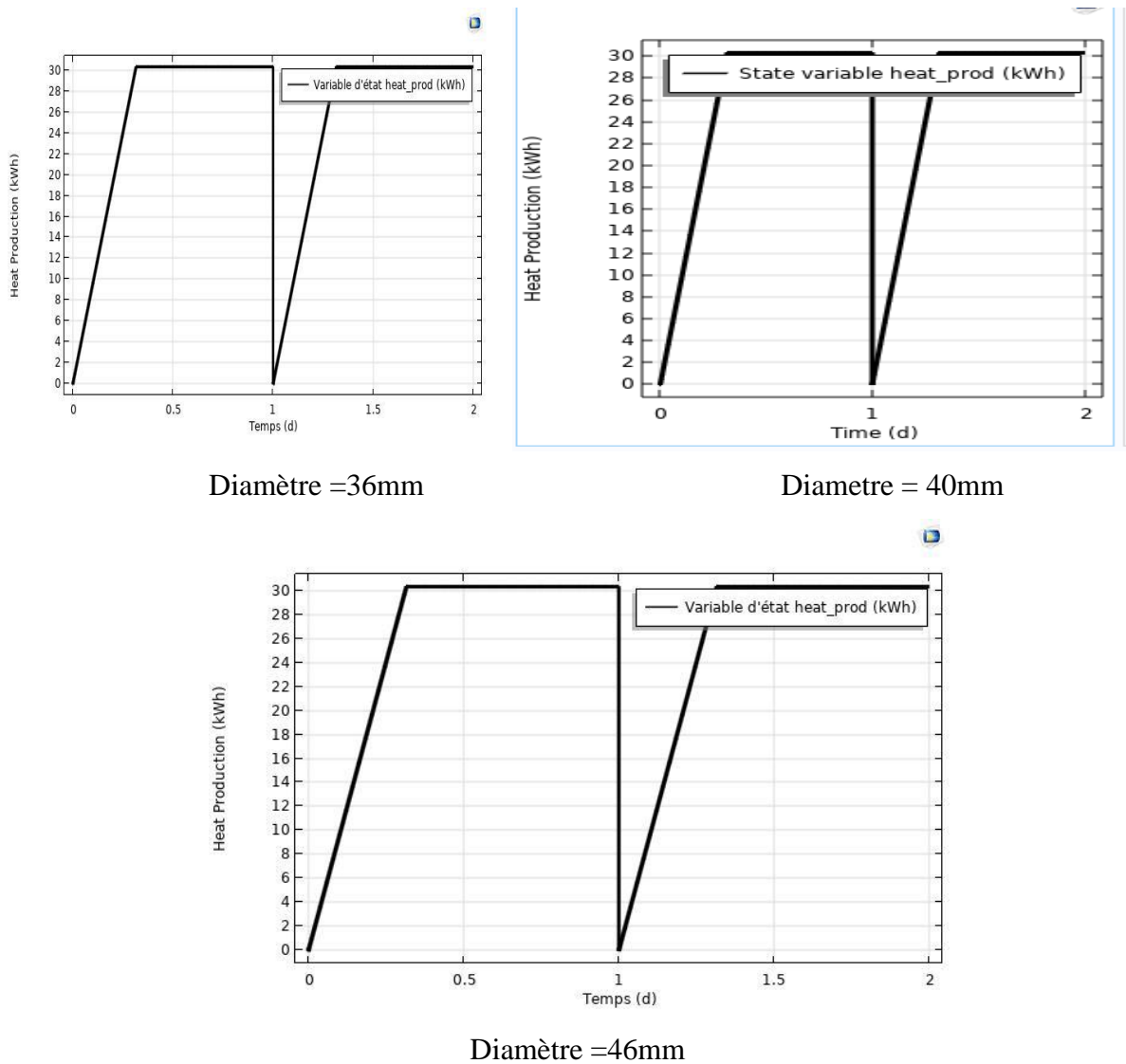


Figure 62. Variation du flux de chaleur produite par l'échangeur en fonction du temps.
(Période de deux jours en hiver).

L'état de fonctionnement de l'échangeur dans le temps est montré à la figure 69. L'état de l'échauffement dépend de la production de chaleur quotidienne. Dès que la chaleur la production atteint la demande quotidienne, l'état du chauffage est éteint jusqu'au lendemain. La production de chaleur les deux jours du temps de simulation. Juste après l'exigence quotidienne de 30 [kWh], la production est arrêtée jusqu'au lendemain.

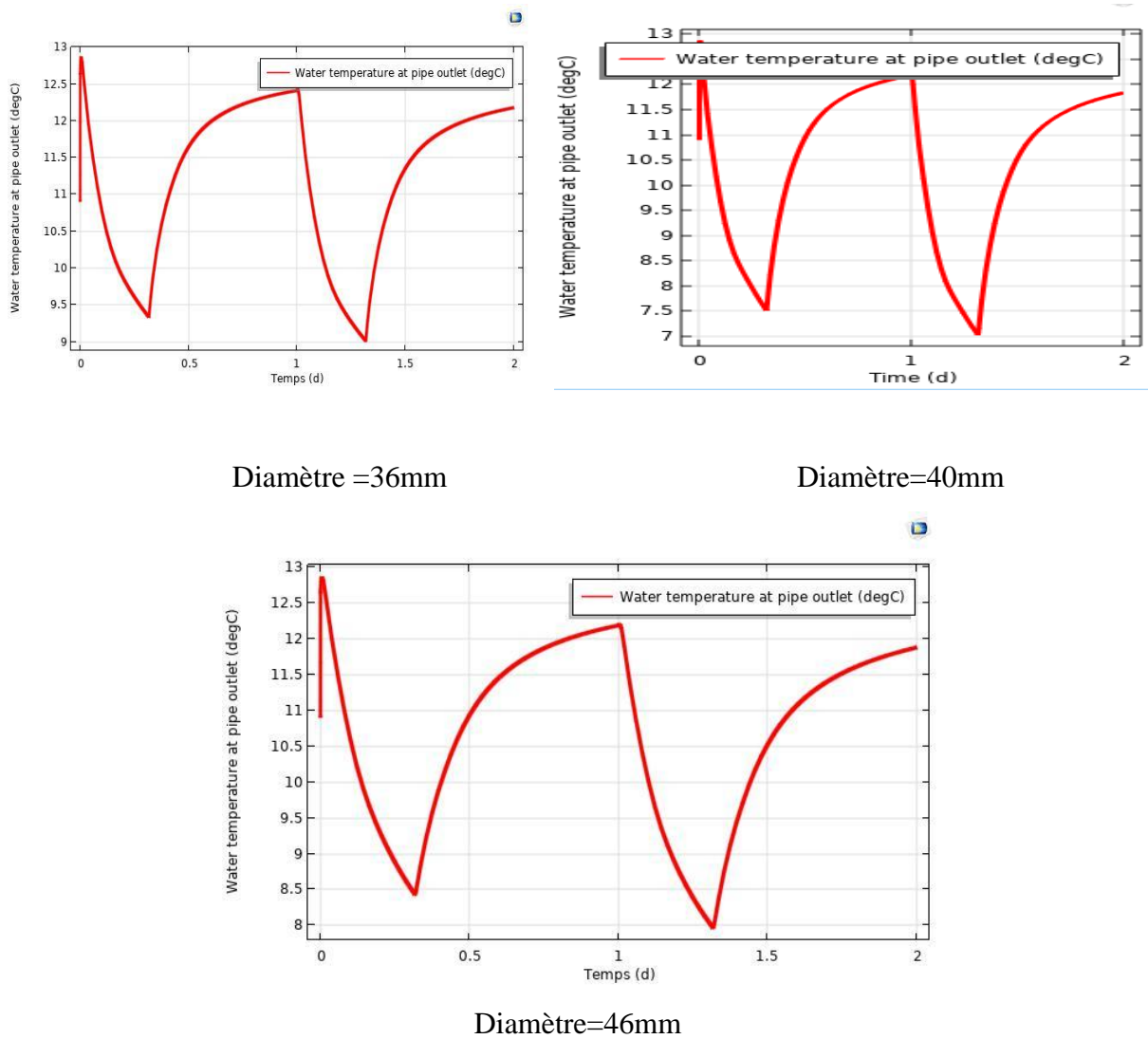


Figure 63. Evolution de la température d'eau dans l'échangeur en fonction du temps selon la différente valeur d'humidité

La figure 70 présenté la température de l'eau à la sortie en fonction du temps pour le modèle de serpentín. C'est important pour s'assurer que le fluide à l'intérieur de serpentín reste au-dessus d'une certaine valeur. Dans les différent diagramme nous avons remarqué au diamètre de 36° L'augmentation de la température est de 11c° jusqu'a 13c° après une diminution jusqu'a 9,4 ensuite une augmentation Dans cet exemple, l'eau est utilisée comme fluide de travail.

- Effet des conditions climatique sur la température de surface du sol selon les différentes valeurs de la demande journalière d'énergie :

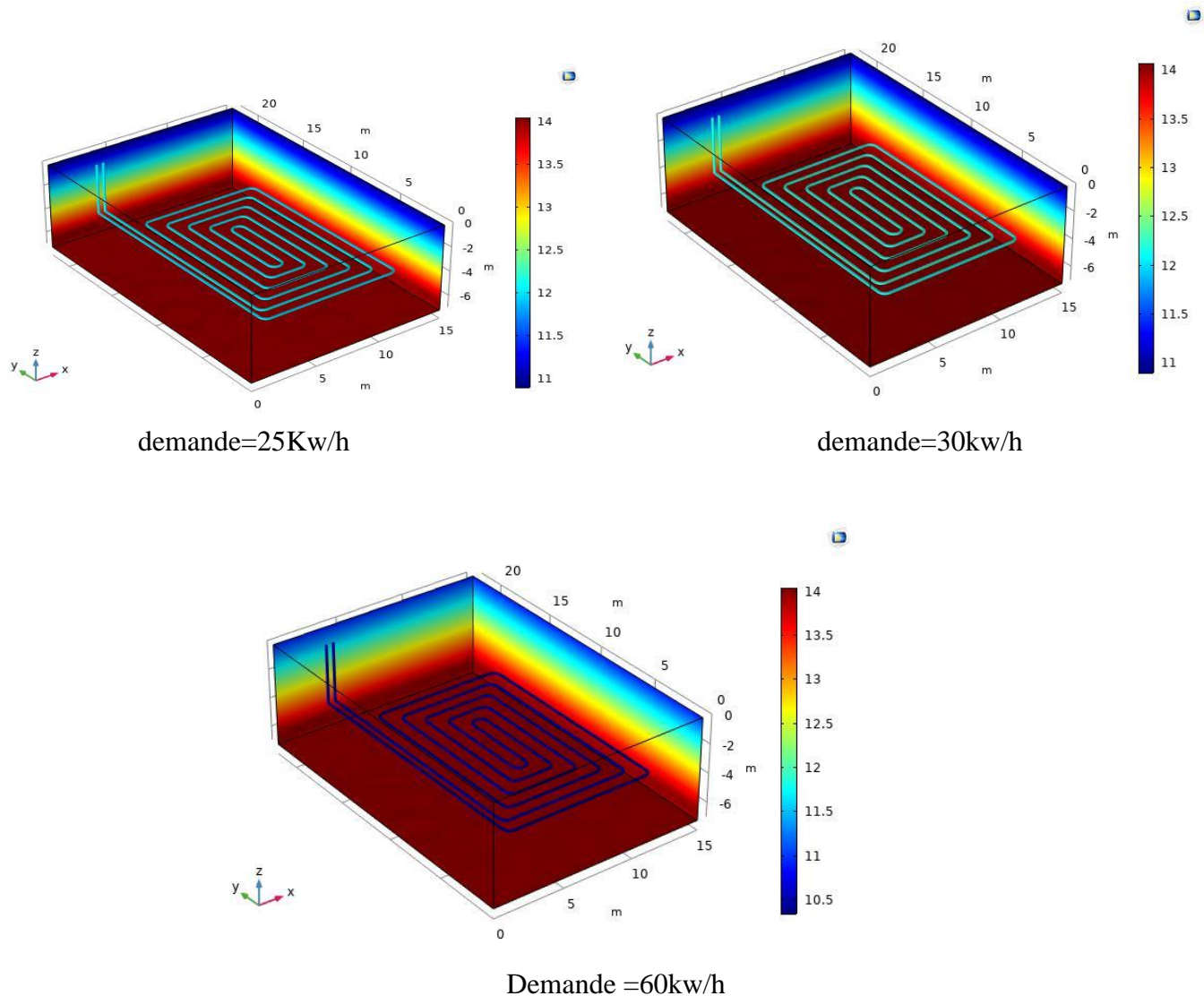


Figure 64. Profil de distribution de température de sol selon les différentes valeurs de la demande d'énergie

Le profil de distribution de la température de l'eau de l'entrée à la sortie de l'échangeur dans une période de deux jours est représenté à La figure 72. A partir cette figure, on remarque que l'augmentation de la température de l'eau à la sortie du tube et atteint presque 14°C mais on remarque une petite différence de la température dans les trois cas on trouve dans l'essai qu'on a travaillé avec la demande 60Kw/h elle réchauffer l'eau plus vite que la demande a 25 est a 30°C , sachant que la température de l'eau à l'entrée est en général 11°C dans le cas de demande de 25kw/h est a 30kw/h est a température de $10,5^{\circ}\text{C}$ dans le cas de demande

=60Kw/h, cette augmentation est causée par l'effet d'échange thermique entre la conductivité du sol et le serpentin de l'échangeur

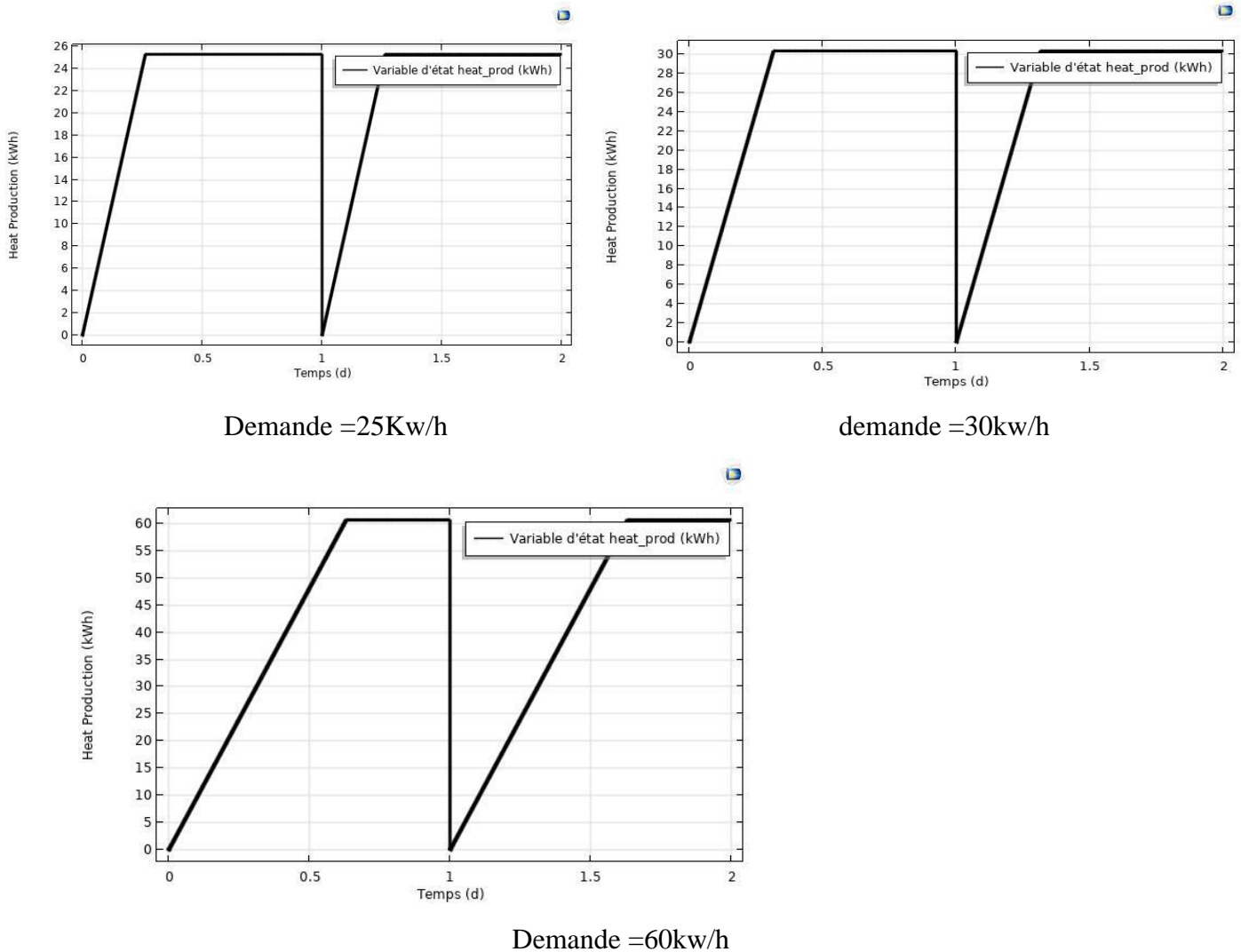


Figure 65. Variation du flux de chaleur produite par l'échangeur en fonction du temps.

L'état de fonctionnement de l'échangeur dans le temps est montré à la figure 73. L'état de l'échauffement dépend de la production de chaleur quotidienne. Dès que la chaleur la production atteint la demande quotidienne, l'état du chauffage est éteint jusqu'au lendemain. La production de chaleur les deux jours du temps de simulation. Juste après l'exigence quotidienne de 30 [kWh], la production est arrêtée jusqu'au lendemain.

8. Conclusion

À partir de cette étude de simulation nous concluons que les conditions climatiques ont un impact significatif sur le travail des échangeurs de chaleur eau-sol. La présence d'une certaine profondeur affecte le travail de l'échangeur de chaleur ou augmente la température de l'eau sortante, ainsi que l'augmentation de la profondeur du sol permet de stabiliser l'état du fonctionnement de l'échangeur et d'augmenter son efficacité. De nombreux facteurs influent sur la température de l'eau à l'intérieur du tube, notamment le mouvement du sol et la conductivité du matériau du tube.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire est une simulation numérique d'un système d'échanges de chaleur géothermique eau-sol. L'objectif principal de cette étude c'est pour atteindre la meilleure efficacité thermique possible dans un échangeur eau-sol. L'échangeur géothermique eau-sol, est un système placé à une profondeur suffisante pour récupérer la chaleur du sous-sol pour chauffer l'eau pour produire une quantité de chaleur, et cela permet de chauffer un espace quelconque.

Une simulation numérique est faite par le logiciel CFD COMSOL-Multiphysics en utilisant les deux modules : Transfert de chaleur et la mécanique des fluides. L'utilisation de ces modules permet alors de prévoir l'influence de plusieurs paramètres sur l'état de fonctionnement de l'échangeur. L'emploi de ce logiciel dans l'approche numérique est simple et facile d'utilisation et très peu coûteux en temps de calcul, il permet de résoudre et d'analyser rapidement les géométries complexes, et de simuler l'influence de différents paramètres sur les performances thermiques de l'échangeur. La prédiction des performances nécessite la connaissance de quelques paramètres, notamment : la température de l'eau à l'entrée de conduite sous-sol, la température ambiante, les propriétés physique du sol. Ces paramètres on a pu constater qu'elle influe sur la performance thermique de l'échangeur.

À la suite de cette approche numérique, il nous semble utile de rappeler quelque conclusion importante obtenue au cours de ce travail :

- Les conditions climatiques affectent la température du sol tout au long de l'année, où nous constatons l'augmentation de la température au premier rang de l'année et diminuons dans la seconde moitié de l'année.
- La profondeur affecte la température du sol, mais nous encourageons la stabilité de la température du sol à une certaine profondeur.
- La présence d'une certaine profondeur affecte le travail de l'échangeur, l'augmentation ou la diminution de la température.
- Plusieurs facteurs influent sur le réchauffement de la température de l'eau à l'intérieur du tube, notamment la mobilité du sol et la qualité du matériau du tube.

Références Bibliographiques

- [1] L.Freris et al « les énergies renouvelables pour la production de l'électricité »2009.
- [2] La loi nationale n°04/09 du 14 Aout 2004, relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.
- [3] Ministère Algérien de l'énergie et des mines, « guide des énergies renouvelables », 2007.
- [4] C.NGÔ, « quelles énergies pour demain », Commissariat à l'énergie Atomique Européen, 1999.
- [5] Le rapport Brundtland, ONU, 1987.
- [6] www.renewables-made-in-germany.com. Consulté en septembre 2009.
- [7] www.ademe.fr, consulté en janvier 2011.
- [8] Observ'ER, l'observatoire des énergies renouvelables « la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde », 11° inventaire 2009.
- [9] GES : gaz à effet de serre.
- [10] Programme indicatif des besoins de production d'électricité 2007-2018, CREG.
- [11] Ministère de l'Energie et des Mines. Evolution du secteur de l'énergie et des mines 1962-2007. Edition 2008.
- [12] Source : Ministère de l'énergie et des mines « guide des énergies renouvelables », 2007.
- [13] et [14] L.freris et D.infield, « les énergies renouvelables pour la production de l'électricité », 2009.
- [15] CREG, (Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz), programme indicatif national 2008-2017.
- [16] Document « Annuaire Statistique 1962-1986(149-1959) », Sone gaz n°240-GE-12-87.
- [17] C.Hamouda et A. Malek, « Analyse théorique et expérimentale de la consommation d'énergie d'une habitation à Batna », revue des énergies renouvelables, vol.9 n°3 (2006).
- [18] Source : CREG, Programme indicatif des besoins en moyen de production d'électricité 2008-2017.
- [19] A.Ricaud, « expertises et conseils, document de synthèse »,2009.
- [20] “Global market outlook for photovoltaic until 2013”, European Photovoltaic Industry Association, EPIAMarch, 2009.

- [21] SONELGAZ, «Prévisions de la demande d'énergie électrique - Objectifs période « 2007– 2017»
- [22] <https://www.geothermies.fr/>
- [23] Julien HEINTZ (CETIAT). Michaël BLAZY (ANJOS VENTILATION). Ivan BORDAS (VIM). " Les puits canadiens/ provençaux (Guide d'informations) "janvier 2008
- [24] S. Ouali, 'Etude Géothermique du Sud de l'Algérie', Mémoire de Magister en géophysique, Université Boumerdès, Mars 2006*
- [25] Belloufi Yousef .Modélisation D'un Echangeur Air/Sol Dont Le But De Rafrachissement Des Locaux. 2012
- [26] Jean Lemale. La géothermie. Le moniteur. © Dunod, Paris 2009. ISBN 978-2- 10- 052879-0
- [27] Mouloud AISSANI.et ALL Simulation des Flux Thermiques lors du soudage TIG et prédiction de la taille des zones du cordon dans les tôles d'Acier 304L
- [28] Satara Elbouti ,Mabrouk Abdelhakim, Etude D'un Echangeur De Chaleur Air/Sol. 2016
- [29] R. naturelles C.-C.-V.-Rets. International, "Chapitre Analyse de projets de pompes à chaleur géothermique." 2006. [Online]. Available: <http://publications.gc.ca/collections/Collection/M39-111-2005F.pdf>. [Accessed: 27- Feb- 2017].
- [30] COMSOL multiphysique V5.5.2