

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU - BEKR BELKAID DE TLEMCEM FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



UNITE DE RECHERCHE MATERIAUX ET ENERGIES RENOUVELABLES (URMER)



**MEMOIRE**

Pour obtenir le diplôme de

**MASTER EN PHYSIQUE**

**Spécialité : Matériaux Systèmes et Energies Renouvelables**

*Contribution à l'étude et dimensionnement d'une installation à base  
d'énergie géothermique pour la production d'énergie électrique.*

**Présenter par :**

**KHERBACHE FATIMA ZOHRA**

Soutenue publiquement le 22/06/2015, devant le Jury composé de :

**Président : Pr. T. BENOUAZ.....(Univ. Tlemcen)**

**Directeur de Mémoire : Dr. S. KHEDIM,.....(Univ. Tlemcen)**

**Examineur : Dr. L. MERAD.....(Univ. Tlemcen)**

**Examineur : Dr. C. ZIDANI.....(Univ. Tlemcen)**

**Année universitaire : 2014 - 2015**

## **Remerciements**

*Avant tout, je remercie Dieu le tout Puissant, le Miséricordieux, de m'avoir donné le courage, la force, la santé et la persistance et de m'avoir permis de finaliser ce travail dans les meilleurs conditions.*

*Je tiens à remercier ma directrice de mémoire **Mme S. KHEDIM**, Docteur à l'université Abou BekrBelkaid-Tlemcen, pour l'honneur qu'elle m'a fait en dirigeant ce travail, pour ses aides, ses conseils, tout au long de l'élaboration de ce modeste travail.*

*A **Mr T. BENOUAZ**, Professeur à l'université Abou BekrBelkaid-Tlemcen, j'adresse mes remerciements les plus sincères pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider ce jury.*

*Je tiens à remercier profondément **Mme C. ZIDANI**, Docteur à l'université Abou BekrBelkaid-Tlemcen d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Mes vifs remerciements s'adressent à **Mr. L. MERAD**, Docteur à l'université Abou BekrBelkaid-Tlemcen, de l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner ce mémoire.*

*Enfin, je remercie, tous ceux qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.*

# SOMMAIRE

<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES</b> .....	3
1. Introduction .....	3
2. Les différentes sources d'énergie fossile .....	5
2.1. L'énergie nucléaire .....	5
2.2. Le charbon.....	6
2.3. Le gaz naturel.....	7
2.4 Le pétrole .....	7
3. Les énergies renouvelables.....	9
3.1. L'énergie géothermique.....	9
3.2. La biomasse.....	9
3.3. L'énergie éolienne .....	10
3.4. L'énergie hydraulique.....	11
3.5. L'énergie solaire.....	12
<b>Chapitre II : L'ENERGIE GEOTHERMIQUE ET SES APPLICATIONS</b> .....	14
1. Introduction .....	15
2. La géothermie.....	18
3. Types de gisements géothermiques .....	19
3.1. La géothermie à haute énergie .....	20
3.2. La géothermie à moyenne énergie .....	21
3.3. La géothermie à basse et très basse énergie .....	21
3.4. Géothermie HDR (roche chaude sèche).....	21
4. Les forages .....	22
4.1. Techniques de forage.....	23

4.2. Méthodes d'exploration .....	23
4.3. Potentiel.....	24
4.4. Estimation de la puissance disponible et de la qualité de l'énergie .....	25
5. Exploitation de la géothermie dans le monde .....	26
5.1.La capacité énergétique.....	27
5.2. Coûts et prix de revient .....	28
5.3. Impact sur l'environnement/climat .....	29
5.4. Conditions-cadre .....	30
5.5.Création d'emplois .....	30
6. La géothermie en Algérie .....	31
7. L'expérience tunisienne.....	33

**Chapitre III : DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION A ENERGIE GEOTHERMIQUE.....34**

1.Introduction .....	34
Partie I.Description détaillée de la maison individuelle modélisée .....	34
1.Caractéristiques thermiques des parois .....	35
2. Orientation des ouvertures et répartition par zone thermique .....	35
3. Définition des apports dans chaque zone thermique.....	36
3.1 Apports des personnes occupant l'habitation .....	36
3.2. Apports internes et éclairage .....	36
4. Ventilation .....	37
5. Inertie de l'espace intérieur .....	37
Partie II. Production d'énergie pour usage domestique .....	37
1. Les capteurs géothermiques verticaux .....	37
2. Aspects réglementaires.....	38
3. Rôle des opérateurs .....	39
4. État de l'art de l'installation souterraine .....	40

4.1. Connaissance préalable du sous-sol .....	41
4.2. Dimensionnement des capteurs .....	42
4.3. Implantations des ouvrages sur le terrain .....	43
4.4. Contrôles avant travaux.....	45
5. Modélisation de la pompe à chaleur.....	47
5.1. Modèle simplifié de la pompe à chaleur par corrélation.....	48
5.2. Coefficient de Performance (COP) .....	49
5.3. Principe de la pompe à chaleur .....	50
5.3.1. Le cycle thermodynamique .....	50
5.3.2. Le gain.....	51
4.Exploitation industrielle de la géothermie .....	55
4.1. Description du procédé binaire .....	57
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>67</b>

## *Listes des figures*

<b>Figure 1</b> : Évolution de la consommation mondiale de l'électricité (Mtep).....	5
<b>Figure 2</b> : Répartition des ressources de production d'énergie mondiale .....	8
<b>Figure 3</b> : l'évolution de l'énergie au cours du temps.....	10
<b>Figure 4</b> : Schéma d'une éolienne (axe horizontal) .....	11
<b>Figure 5</b> : Barrage hydraulique .....	12
<b>Figure 6</b> : Plan de la maison délimitant les différentes zones thermiques .....	35
<b>Figure 7</b> : Profil d'occupation de la maison. ....	37
<b>Figure 8</b> : Schéma de principe d'une installation de chauffage à basse température utilisant une sonde géothermique.....	39
<b>Figure 9</b> : Exemple de prise en compte des terrains pour la réalisation et le remplissage d'une sonde géothermique.....	41
<b>Figure 10</b> : Exemples d'implantation de sondes à promouvoir ou à proscrire .....	45
<b>Figure 11</b> ; Exemple d'implantation de sondes et distances minimales à respecter par rapport à divers obstacles locaux (schéma BRGM).....	46
<b>Figure 12</b> : Le cycle thermodynamique .....	52
<b>Figure 13</b> : Schéma des technologies géothermiques peu profondes disponibles .....	53
<b>Figure 14</b> : Concept d'extraction de chaleur géothermique avec systèmes fermés (échangeurs de chaleur verticaux (A) et horizontaux (B) et un système ouvert (C). ....	54
<b>Figure 15</b> : Concept du stockage géothermique saisonnier non profond: (A) système ouvert (ATES) et (B) système fermé (BTES). ....	55
<b>Figure 16</b> : Schéma de fonctionnement d'une installation ORC (cycle organique de Rankine) utilisant une eau captée dont la température est comprise entre 100 et 160°C .....	59
<b>Figure 17</b> ; Comparatif des performances de production d'électricité en fonction de la température de l'eau captée et de la puissance électrique qu'il est possible de générer. A des températures supérieures à 200°C, une installation hybride (flash/ORC) offre le meilleur	

rendement.....60

**Figure 18** :Evolution prévue des coûts d'investissement et de revient des centrales géothermiques en fonction du niveau de développement technologique.....61

## **Résumé**

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. C'est donc une énergie fiable et stable dans le temps. Dans ce travail, nous avons traité tous les aspects majeurs de la technologie géothermique à usage domestique. Nous avons aussi discuté le dimensionnement des installations et estimé le coût obtenu avec ces installations qui reste compétitif.

**Mots clés:** Energie géothermique–Dimensionnement–Energie électrique



# **INTRODUCTION GENERALE**

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, la flambée des cours du brut, et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie dans l'obligation et donc le passage à l'utilisation et le développement des énergies renouvelables sont imminents.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) à l'échelle de l'homme (solaire par exemple). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire) mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse, et aussi la géothermie qui représente le but de cette étude.

A toute époque, les manifestations naturelles de la chaleur de la Terre, telles les sources thermales, les geysers et les volcans, ont été des centres d'attraction de l'humanité. Les sources chaudes ont été utilisées depuis la haute Antiquité. Les Romains étaient les premiers à utiliser les bains thermaux et aussi les premiers à mettre au point le chauffage par le sol dans certains de leurs édifices, une technique qui s'est ensuite perdue jusqu'au 20<sup>e</sup> siècle. De nombreuses villes ont été fondées autour de sources thermales.

Plus de 99% de la masse de la terre est à une température de plus de 1000° C. Seul le 0,1% de la masse de la terre (c'est-à-dire les trois premiers kilomètres) est plus froid que 100° C. A la surface de la Terre, la chaleur rayonne avec un flux moyen de 0,065 Watt/m<sup>2</sup>. Cette chaleur dégagée n'a pas pour origine principale le refroidissement du globe terrestre, mais provient à 90% de la désintégration des éléments radioactifs (uranium, thorium, potassium) contenus dans les minéraux de la croûte [1].

L'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol est appelée la géothermie, quelle que soit la température de la ressource, la profondeur à laquelle on l'exploite et l'usage que l'on en fait.

On distingue trois types de géothermie [2] :

- la géothermie peu profonde à très basse température (inférieure à 50°C)
- la géothermie profonde (jusqu'à 2000 m) à basse énergie (50 à 100°C), moyenne (100 à 150°C) ou haute énergie (contexte volcanique, supérieure à 150°C)
- la géothermie très profonde (de 5000 à 10000 m) à très haute température (jusqu'à 300°C)

La géothermie de basse et très basse énergie est utilisée pour alimenter les réseaux de chaleur (chauffage urbain).

La géothermie moyenne et haute énergie permet la production d'électricité.

Le principe d'une centrale géothermique est d'extraire la chaleur contenue dans le sol, soit pour l'utiliser sous forme de chauffage (réseau de chaleur), soit pour la transformer en électricité, ou les deux à la fois, c'est dans ce cas de la cogénération.

En haute et très haute énergie, la vapeur jaillit avec assez de pression pour faire tourner une turbine, afin de produire l'électricité.

En moyenne énergie, la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire : on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la terre, que l'on chauffe avec l'eau géothermale. Ce fluide se charge en énergie thermique, entre en ébullition et se vaporise, faisant tourner une turbine dont le mouvement, transmis à l'alternateur, produit de l'électricité. Une centrale géothermique est donc une centrale thermique.

En basse et très basse énergie, l'énergie est soutirée du sous-sol moyennant de sondes géothermiques en utilisant une pompe à chaleur. Une pompe à chaleur peut revaloriser la chaleur ambiante à relativement basse température (12°C) pour des applications à une température plus élevée (40°C) comme le chauffage des habitations ou l'eau sanitaire [3]. La pompe extrait l'énergie thermique (chaleur) d'un support (source de chaleur) à une température relativement basse et libère cette énergie thermique à une température plus élevée dans un autre support (système d'émission de chaleur). Le transport de la chaleur est assuré par un liquide (fluide caloporteur). La quantité d'énergie dont l'appareil a besoin pour ce faire est faible par rapport au rendement. 60 à 80% de l'énergie fournie par la pompe à chaleur provient de l'environnement [4].

Le manuscrit est divisé en trois chapitres. Le premier chapitre est dédié aux ressources d'énergie où nous exposons les énergies fossiles et les énergies renouvelables. Dans le second chapitre nous nous étalons dans le thème de l'énergie géothermique, nous citons ces différents types et ses multiples applications. Au troisième chapitre nous portons notre intérêt à la production de l'énergie dans le cadre de l'utilisation domestique où nous exposons une étude complète de l'installation et le dimensionnement de sondes géothermique verticales. Nous avons proposé un tableur de calcul sur Excel pour un dimensionnement simplifié et précis à la fois. Nous avons clôturé ce mémoire par une conclusion générale.

# **Chapitre I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES**

## Chapitre I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

### 1. Introduction

L'Afrique connaît une période de croissance soutenue et sans précédent. D'ici 2050, le continent comptera une population d'au moins 2 milliards de personnes (soit deux fois puisqu'aujourd'hui), dont 40% dans les zones rurales. En 2010, près de 590 millions d'Africains (57% de la population) n'avaient pas accès à l'électricité et 700 millions (68% de la population) ne disposaient pas de combustibles et technologies de cuisson propres. Si les tendances relatives à l'énergie ne se modifient pas, l'Afrique comptera toujours, en 2030, 655 millions de personnes (42% de la population) sans accès à l'électricité et 866 millions (56% de la population) de personnes sans combustibles et technologies de cuisson propres, la majorité de la population se trouvant donc privée du droit à une vie productive et saine.

Les économies africaines connaissent actuellement une croissance annuelle moyenne de 4%. Six des dix économies ayant enregistré la croissance la plus rapide au cours de la dernière décennie se trouvent en Afrique subsaharienne. Si cette tendance se poursuit, le PIB de l'Afrique devrait être multiplié par trois d'ici 2030 et par sept d'ici 2050. Toutefois, seul un secteur énergétique plus développé et plus performant permettra un essor économique durable.

L'Algérie, la porte de l'Afrique possède le potentiel et la capacité pour faire des énergies renouvelables le principal moteur de cette croissance. Ce choix s'avérerait compétitif par rapport à d'autres solutions, favoriserait les économies d'échelle et offrirait des avantages considérables en termes de développement équitable, de création de valeur à l'échelle locale, de sécurité énergétique et de viabilité environnementale.

Cette transformation sans précédent ne se fera pas d'elle-même. Elle ne sera possible que si les responsables déploient des efforts concertés pour mettre en place les mécanismes permettant de stimuler les investissements et pour faciliter le développement du secteur au moyen de politiques pertinentes et de collaboration au niveau régional. Ceci est d'une part.

D'une autre part, de sérieux problèmes sont posés par les énergies fossiles, non seulement

sur le plan écologique engendrant la pollution et le réchauffement climatique de la planète. En effet, la capacité de l'atmosphère à absorber sans danger des substances toxiques est depuis longtemps dépassée. À cause des émissions de CO<sub>2</sub>, nous pouvons déjà anticiper les effets dévastateurs du réchauffement climatique sur notre environnement et au-delà sur la vie des populations, en particulier celles qui y sont très vulnérables. En 2020, entre 75 et 250 millions de personnes en Afrique pourraient être exposées à une pénurie d'eau croissante. Et dans certains pays du continent, les superficies agricoles sont menacées d'être réduites de moitié. Aussi sur le plan politique, à ne pas ignorer les conflits entre les états pour mettre la main sur les réserves de combustibles fossiles qui restent des sources épuisables.

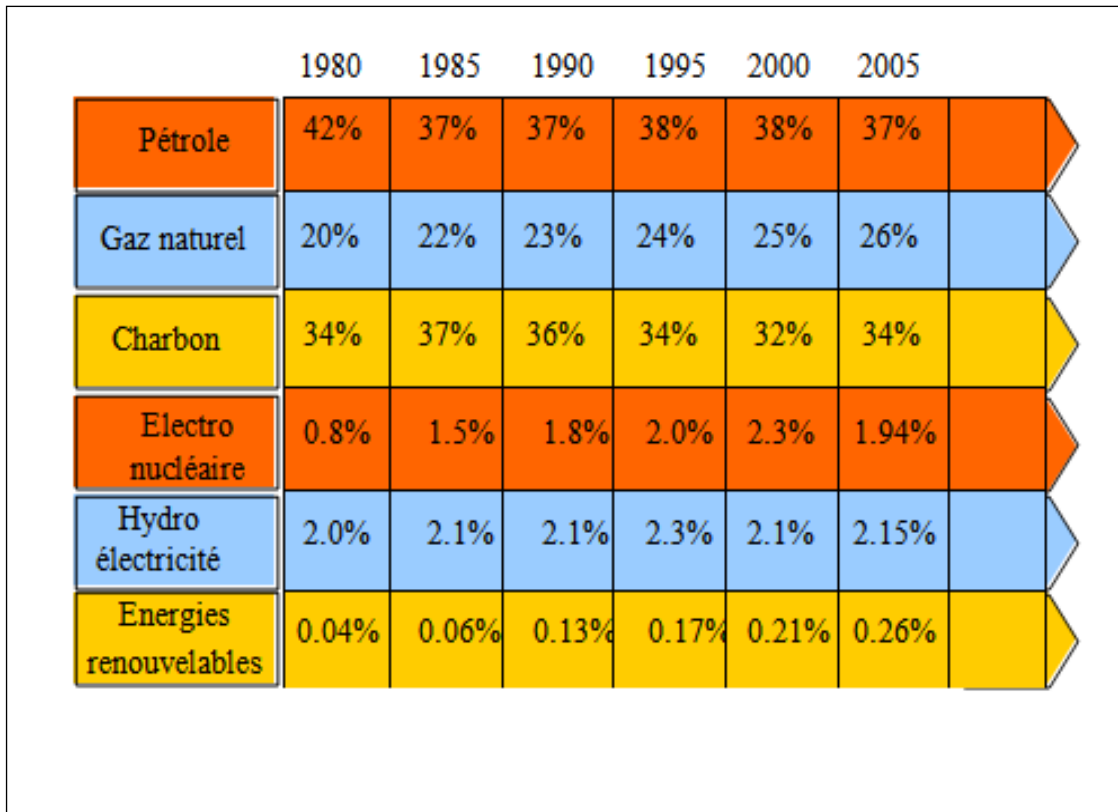
Dans ce contexte, il est donc clair qu'un approvisionnement en énergie basé sur des ressources épuisables, aux prix élevés et fluctuants, aux coûts économiques, sociaux et environnementaux importants, tels que le pétrole, le gaz naturel et le charbon, pose des risques majeurs pour le développement économique et social des pays. Les récents événements tragiques au Japon et les effets menaçant la santé des populations et l'environnement nous montrent que l'énergie nucléaire n'offre pas d'alternative non plus.

Des mesures doivent être prises pour encourager la transition vers l'utilisation des énergies renouvelables car elles :

- sont disponibles dans le monde entier, inépuisables, écologiques et contribuent à la protection de l'environnement ;
- réduisent la dépendance vis-à-vis des importations d'énergie ;
- augmentent la création de valeur sur place et créent des emplois ; et
- sécurisent l'approvisionnement énergétique au-delà de l'ère des hydrocarbures et du charbon.

En résumé le recours aux énergies propres et durables est imminent. Dans ce qui suit, nous allons présenter en premier lieu les différentes énergies renouvelables, en spécifiant l'énergie géothermique qui fait l'objet de ce travail.

Les différentes sources d'énergie dont on dispose dans le monde, mis à part les énergies nucléaire et géothermique, sont toutes d'origine solaire. En effet, même le charbon et le pétrole proviennent des plantes tributaires du soleil. La nature transforme donc l'énergie solaire en bien d'autres sources.



**Figure 1. :** Évolution de la consommation mondiale de l'électricité (Mtep) [5].

## 2. Les différentes sources d'énergie fossile

Elles présentent presque 86 % de la production mondiale de l'énergie (voir **figure 1**).

### 2.1. L'énergie nucléaire

Il y a deux sortes de réactions susceptibles de produire de l'énergie nucléaire :

**a. La fusion :** Elle se produit notamment dans les étoiles. Elle est qualifiée de thermonucléaire parce qu'elle n'existe qu'à des millions de degrés. L'homme ne sait pas encore la maîtriser sur terre malgré les recherches dans ce sens.

**b. La fission :** C'est celle qui se produit le plus couramment dans les piles atomiques appelées plutôt les réacteurs nucléaires, elle résulte de la rupture de très nombreux noyaux atomiques dans un combustible à base d'uranium : elle se retrouve sous forme de chaleur produite par le freinage des produits de fission. À l'intérieur du cœur du réacteur, le combustible doit être ensuite refroidi par un liquide ou un gaz qui transporte cette chaleur vers des générateurs de vapeur, afin de faire bouillir de l'eau. La vapeur d'eau sous pression permet d'entraîner une turbine couplée à un générateur d'électricité. Ce qui est spécifique est donc la chaudière nucléaire composée du réacteur, du générateur de vapeur et des appareils destinés à faire circuler le liquide ou le gaz qui transporte la chaleur de l'un à l'autre. La pièce maîtresse est le réacteur nucléaire qui est le foyer où est mise en œuvre de manière contrôlée la réaction en chaîne. Le démarrage, les changements de puissance, le contrôle et l'arrêt de la réaction en chaîne sont commandés à distance par des barres formées d'une matière qui absorbe les neutrons (poisons).

L'enfoncement plus ou moins profond de ces barres dans le cœur du réacteur commande le rythme de la réaction en chaîne. On estime à 3.4 millions de tonnes les ressources exploitables, actuellement connues pour une consommation annuelle d'un peu plus de  $4 \times 10^4$  tonnes . [6].

## 2.2. Le charbon

On appelle charbon des roches sédimentaires d'origine organique contenant au moins 50 % de carbone. Les origines du charbon remontent à l'époque du Carbonifère, il y a 250 à 300 millions d'années, lorsque la forêt hercynienne a engendré la concentration de dépôts considérables de débris végétaux qui ont été recouverts de terre et d'alluvions à la suite d'affaissements du sol ou d'une élévation du niveau des eaux. Ce cycle se perpétue pendant des millions d'années, créant ainsi une alternance de couches de matière organique et de couches stériles. Au fur et à mesure de leur maturation, ces couches de matière organique sont passées, au cours des temps géologiques, par des états successifs : tourbe, lignite, houille puis anthracite. Cette évolution correspond à un appauvrissement en composants organiques volatils et à une concentration en carbone.



D'une façon générale, on distingue au niveau international deux principales catégories de charbon:

**Les houilles et les anthracites :** Sont des produits dont le pouvoir calorifique dépasse 23.9GJ/t. Ce sont les seuls susceptibles d'être transportés en quantité notable loin de leur lieu de production. On distingue les charbons à coke, dits charbons métallurgiques, destinés à la sidérurgie et les charbons vapeur, destinés à être brûlés dans des chaudières pour produire de la vapeur et de l'électricité.

**Le charbon brun :** C'est un produit non cokéfiant dont le pouvoir calorifique est inférieur à 23.9 GJ/t. Il inclue les lignites, dont le pouvoir calorifique est inférieur à 17.4 GJ/t. Il est à plus de 90 % transformé sur place en électricité [7].

### 2.3. Le gaz naturel

Deux filières gaz sont aujourd'hui considérées :

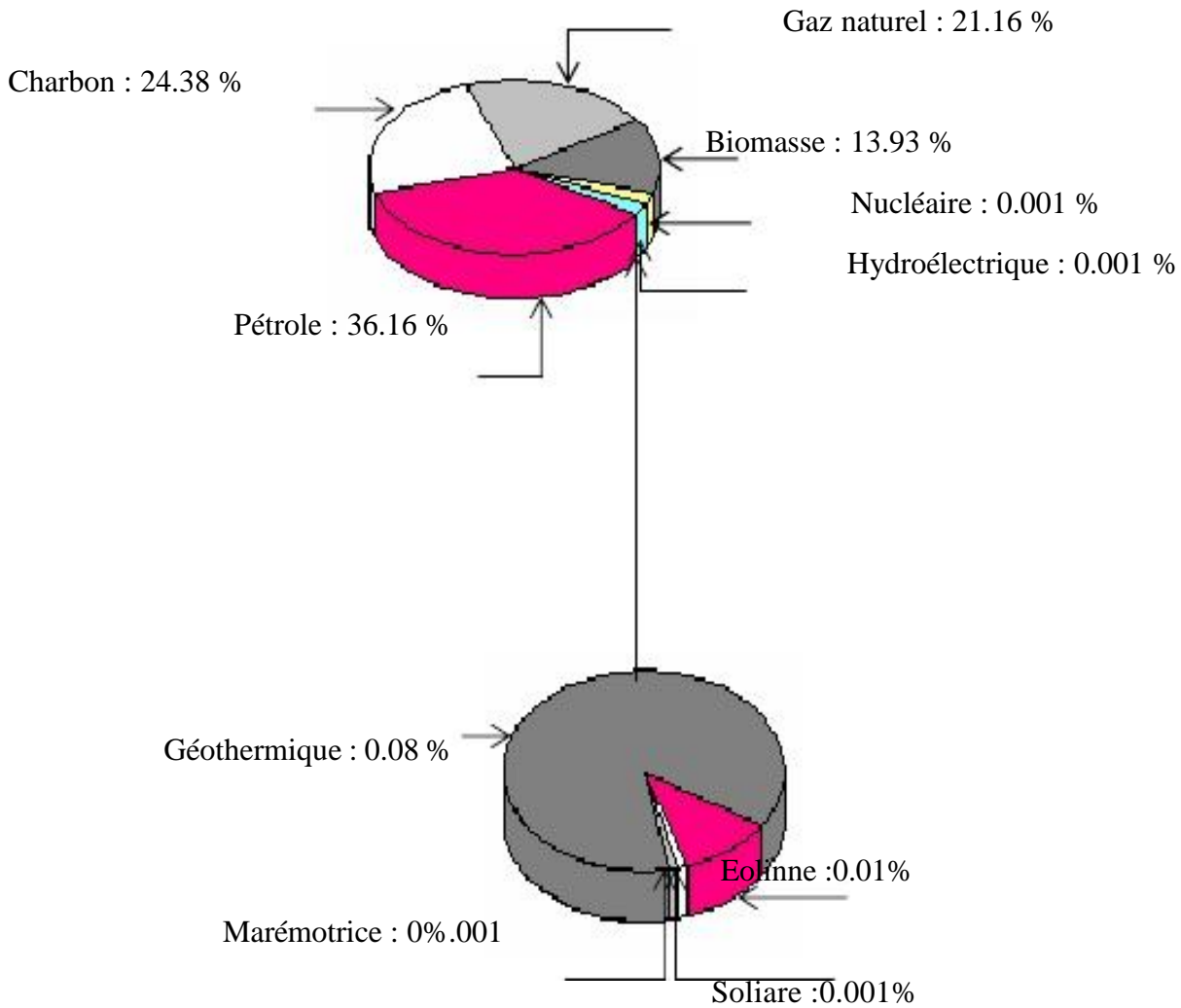
**Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) :** C'est un mélange de butane et de propane analogue à celui qui est utilisé dans les bouteilles à usage domestique et dans les Camping-gaz. Il est obtenu soit lors de l'extraction du pétrole, soit au cours du raffinage. Les quantités disponibles sont donc modestes, et surtout variables.

**Le gaz naturel pour véhicule (GNV) :** C'est du méthane, son stockage, à l'état liquide, nécessite une température trop basse et (ou) une pression trop élevée pour qu'il soit envisageable sur un véhicule. Le GNV est donc transporté à l'état gazeux sous une pression d'environ 20 méga pascals dans des réservoirs adaptés [8].

### 2.4 Le pétrole

Le pétrole s'est formé sous la surface de la terre, par suite de la décomposition d'organismes marins. Les sédiments s'alourdissent et tombent au fond de l'eau sous l'effet de leur propre poids. Au fur et à mesure que les dépôts supplémentaires s'empilent, la pression exercée sur ceux qui se trouvent en dessous augmente plusieurs milliers de fois et la température s'accroît de plusieurs centaines de degrés. La boue et le sable durcissent pour

former des schistes argileux et du grès ; le carbone est précipité et les coquilles de squelettes durcissent et se transforment en calcaire ; les restes des organismes morts sont ainsi transformés en pétrole brut et en gaz naturel. Une fois formé, le pétrole remonte vers la croûte terrestre et se loge dans les pores microscopiques des sédiments plus gros qui se trouvent au-dessus d'eux



**Figure 2 :** Répartition des ressources de production d'énergie mondiale [9] .

. Il arrive fréquemment que le matériau qui remonte rencontre un schiste imperméable ou une couche de rocher dense qui l'empêche de remonter plus haut. Le pétrole est alors emprisonné et un gisement de pétrole se forme. Le pétrole constitue actuellement environ 36 % de la production mondiale de l'énergie (voir figure 1.2)

### **3. Les énergies renouvelables**

Actuellement, le problème inhérent à l'utilisation des énergies non renouvelables, c'est leur disponibilité en quantité limitée et leurs effets nuisibles sur le plan environnemental, ce qui a forcé l'humanité à rechercher des nouvelles sources d'énergie.

Ces sources sont inépuisables et elles sont également peu ou pas polluantes, l'énergie solaire, éolienne, géothermique ne rejettent aucune pollution lorsqu'elles produisent de l'énergie. Elles présentent aujourd'hui 14 % environ de la production mondiale de l'énergie (voir figure 1.2).

#### **3.1. L'énergie géothermique**

Dans certaines roches et à certaines profondeurs circule de l'énergie, sous forme de vapeur et d'eaux chaudes. Ces eaux puisées à leur source ou récupérées lorsqu'elles surgissent des geysers, sont collectées puis distribuées pour alimenter des réseaux de chauffage urbain.

#### **3.2. La biomasse**

Ce terme générique désigne, en fait, toute matière d'origine organique. Dès lors, les utilisations énergétiques de la biomasse recouvrent un grand nombre de techniques. Globalement, on peut utiliser la biomasse de trois façons différentes : en la brûlant, en la faisant pourrir ou en la transformant chimiquement.

1. La brûler, c'est s'en servir comme un combustible de chaudière. On utilise aussi bien des déchets de bois, de récoltes que certains déchets, comme les ordures ménagères, les déchets industriels banals ou certains résidus agricoles.



**Figure 3** : l'évolution de l'énergie au cours du temps

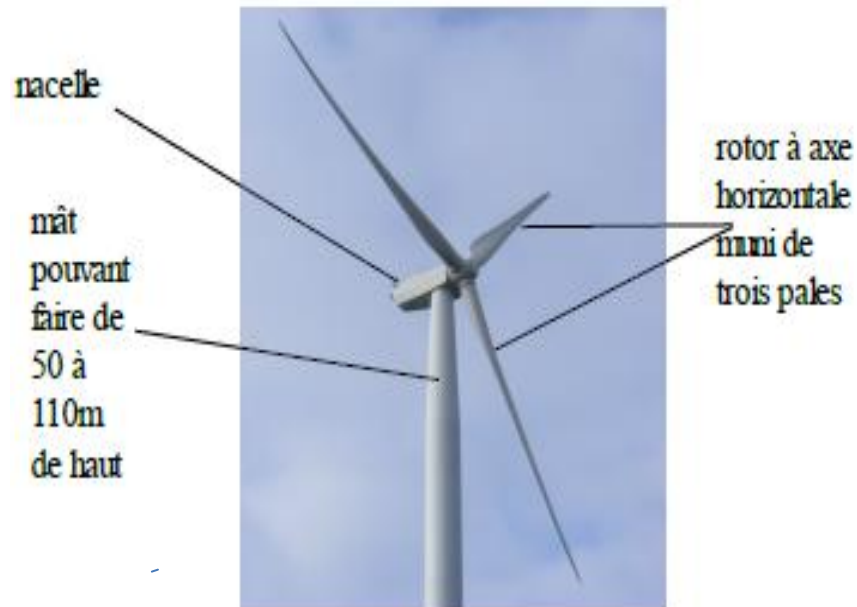
2. En se décomposant, sous l'effet des bactéries, certains déchets putrescibles (comme certaines boues de stations d'épuration des eaux usées ou la fraction organique des déchets ménagers, les épluchures par exemple) produisent du biogaz. Ce mélange de gaz est en majorité composé de méthane, utilisable, une fois épuré, pour alimenter, lui aussi, des chaudières ou des véhicules fonctionnant au GNV.

3. Enfin, certaines cultures, comme le colza, les betteraves ou certaines céréales, telles que le blé, peuvent être transformés en biocarburant. L'huile de colza transformée est un excellent substitut au gazole. Alors que la transformation chimique des céréales ou de la betterave peut fournir de l'ETBE, un additif qui, ajouté à l'essence, permet de réduire certaines émissions polluantes de nos voitures.

### 3.3. L'énergie éolienne

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en des formes d'énergies plus utiles, notamment l'énergie mécanique ou l'électricité. L'énergie éolienne ne produit pas de pollution et constitue une forme d'énergie indéfiniment durable. C'est un principe vieux comme les moulins à vent. Le vent fait tourner les pales qui sont elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice.

Lorsque le vent est suffisamment fort (15 km/h minimum), les pales tournent et entraînent la génératrice qui produit de l'électricité. C'est le même principe que celui de notre bonne dynamo de vélo. Il existe deux grandes catégories d'éoliennes : les aérogénérateurs domestiques de faibles puissances qui fournissent en électricité des sites isolés, pour des besoins individuels ou de petits réseaux collectifs, et les éoliennes de grandes puissances raccordées aux réseaux nationaux, dont les plus grandes ont une puissance aujourd'hui de 2500 kW.



**Figure4:** Schéma d'une éolienne (axe horizontal)

### 3.4. L'énergie hydraulique

Son principe ressemble à celui de l'éolienne. Simplement, ce n'est plus le vent mais l'énergie mécanique de l'eau qui entraîne la roue d'une turbine qui à son tour entraîne un alternateur. Ce dernier transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. La puissance disponible dépend de deux facteurs : la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau. Deux types de solutions sont possibles, selon la configuration du site :

1. Sur les grands fleuves ou au bas des montagnes, on construit un barrage. L'eau s'engouffre au bas du barrage, passe dans une sorte de galerie au bout de laquelle se situent les turbines. Le passage de l'eau fait tourner les hélices qui entraînent un alternateur. C'est ce dernier qui produit le courant.
2. Sur les petites rivières, on met en place des microcentrales qui ne barrent pas le cours d'eau : un petit canal est construit, où une partie de l'eau s'engouffre et va faire tourner les turbines de la centrale au fil de l'eau



**Figure 5:** Barrage hydraulique

### 3.5. L'énergie solaire

Semblable à un réacteur nucléaire, le soleil tire son énergie de la fusion du noyau d'hydrogène qui donne naissance à un noyau d'hélium. Cette réaction produit une énergie incommensurable (à tel point que la petite fraction que nous en recevons chaque jour sur Terre à plus de 150 millions de kilomètres suffirait à subvenir aux besoins en énergie de l'ensemble de l'humanité pendant environ 30 ans).

Mais cette énergie, comme nous le verrons, n'est pas facile à capter. Les hommes ont développé deux techniques pour utiliser l'énergie du soleil :

- a. Le solaire thermique : Qui consiste à chauffer un liquide ou un gaz pour en utiliser ultérieurement l'énergie (eau sanitaire, séchage des récoltes, etc.).
- b. Le solaire photovoltaïque : Qui utilise la capacité des semi-conducteurs à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique. Si cette transformation ne se fait pas sans pertes (le rendement du photovoltaïque est environ trois fois moindre que celui du thermique), elle permet des applications beaucoup plus larges (transport, alimentation de petits appareils, etc.).

L'énergie solaire spécialement semble, a priori, une solution efficace pour remplacer le pétrole. La production de baril atteint actuellement un pic et les spécialistes pensent qu'elle diminuera pendant les dix prochaines années. L'Union Européenne fixe à 20 % la part des énergies renouvelables en 2020, et 50 % en 2040 [10]. La production d'énergie solaire devrait être l'une des plus importantes, car elle présente de nombreux avantages :

- Le soleil envoie chaque année sur la Terre plus de 40 000 fois les besoins en énergies fossiles de

l'humanité. Autant dire une énergie inépuisable, gratuite et omniprésente.

- L'énergie solaire peut aussi bien produire de la chaleur (solaire thermique), et de l'électricité (solaire photovoltaïque).
- Le coût proportionnel est quasi nul : lorsque le panneau solaire est installé, l'énergie ne coûte rien, même si l'investissement et l'entretien représentent des dépenses certaines.
- Contrairement à d'autres ressources énergétiques, l'énergie solaire est décentralisée. Ce qui explique également pourquoi beaucoup d'endroits isolés en disposent déjà.

Le monde occidental se prépare donc à l'avenir en investissant dans cette énergie renouvelable. La France développe actuellement un champ de panneaux solaires en Guyane, et octroie des chauffe-eaux solaires aux habitants. En 2025, la Guyane sera énergétiquement indépendante et l'Espagne construit actuellement le plus grand parc de panneaux solaires d'Europe en Andalousie [6]. Mais qu'en est-il de l'Afrique ? Cette énergie serait également une chance pour ce continent, qui a l'ardeur du soleil comme une de ses richesses. Mais l'Afrique est aussi le continent qui semble le moins disposé à pouvoir en profiter. Il est encore trop tôt pour savoir si le solaire constitue vraiment une alternative au pétrole, mais une chose est sûre, le soleil est l'énergie de l'avenir et la solution la plus prometteuse pour le futur énergétique, de l'humanité.

**Chapitre II : L'ENERGIE  
GEOtherMIQUE ET SES  
APPLICATIONS**



**Chapitre II : L'ENERGIE GEOTHERMIQUE ET SES APPLICATIONS****1. INTRODUCTION**

A toute époque, les manifestations naturelles de la chaleur de la Terre, telles les sources thermales, les geysers et les volcans, ont été des centres d'attraction de l'humanité. Les sources chaudes ont été utilisées depuis la haute Antiquité. Les Romains étaient vraisemblablement de grands amateurs de bains thermaux et aussi les premiers à mettre au point le chauffage par le sol dans certains de leurs édifices, une technique qui s'est ensuite perdue jusqu'au 20<sup>e</sup> siècle. De nombreuses villes européennes ont été fondées autour de sources thermales telles que Bath en Grande-Bretagne, Baden-Baden en Allemagne ou Aix-les-Bains en France, pour ne citer que ces trois villes d'eau.

Plus de 99% de la masse de la terre est à une température de plus de 1000° C. Seule 0,1% de la masse de la terre (c'est-à-dire les trois premiers kilomètres) est plus froide que 100° C. A la surface de la Terre, la chaleur rayonne avec un flux moyen de 0,065 Watt/m<sup>2</sup>. Cette chaleur dégagée n'a pas pour origine principale le refroidissement du globe terrestre, mais provient à 90% de la désintégration des éléments radioactifs (uranium, thorium, potassium) contenus dans les minéraux de la croûte.

En s'enfonçant dans le sous-sol, la température des ouvrages tels que tunnels, galeries de mines et forages monte régulièrement, en moyenne le gradient géothermique augmente de 33° C par kilomètre de profondeur mais parfois des conditions géologiques spécifiques sont responsables de fortes augmentations de température et le gradient peut atteindre 40 à 50 °C/km, et même beaucoup plus dans des zones volcaniques.

L'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol est appelée la géothermie, quelle que soit la température de la ressource, la profondeur à laquelle on l'exploite et l'usage que l'on en fait. Les profondeurs de la terre recèlent d'énormes quantités de chaleur naturelle, dont l'origine réside essentiellement dans la désintégration d'éléments radioactifs. Selon les connaissances actuelles, les températures culminent à 6000°C dans le noyau et atteignent jusqu'à 1300°C environ dans le manteau supérieur du globe terrestre. Le flux géothermique qui parvient à la surface du globe dépasse 40 milliards de kW. Plus de 99 % de la masse de notre Terre est soumise à des températures dépassant 1000 °C. Seul 0,1% est plus froid que 100 °C. En moyenne, la température augmente à partir de la surface terrestre de 3 °C environ

par 100 mètres de profondeur, ce qui correspond à un gradient géothermique normal. En de nombreux endroits du globe, nous constatons toutefois des anomalies géothermiques (dites «positives»), c'est-à-dire des régions présentant des gradients de température nettement plus élevés, par exemple en Islande, en Italie, en Indonésie ou en Nouvelle-Zélande.

Cependant, la chaleur contenue dans les roches est trop diffuse pour être extraite de manière économique : il est nécessaire d'avoir à disposition un fluide caloporteur, généralement de l'eau, afin de transporter l'énergie vers la surface. Ce fluide souvent présent dans le sous-sol, il s'agit des aquifères, bien connus à faible profondeur (moins de 100 m), mais certaines formations géologiques perméables peuvent être trouvées à des profondeurs de 200 à 3000 m, avec des températures qui s'échelonnent entre 15° et nettement plus de 250 °C selon les régions. En l'absence d'aquifères, d'autres techniques sont à disposition pour transférer la chaleur contenue dans les roches. C'est au moyen de forages que l'on peut faire remonter de l'eau souterraine contenant l'énergie thermique du sous-sol. La technologie actuelle permet d'atteindre puis de capter des ressources géothermiques jusqu'à 5000 m de profondeur et 400 °C.

C'est en 1904 que la géothermie industrielle a démarré avec la production d'électricité en Toscane. A partir des années 1960, des centrales électriques géothermiques voient le jour progressivement dans 24 pays. L'utilisation directe de la chaleur souterraine, notamment pour le chauffage et pour le thermalisme, s'est développée dans 70 pays. En Suisse, les sondes géothermiques verticales pour le chauffage de villas familiales connaissent un fort engouement et les champs de sondes réalisés pour le chauffage et le refroidissement de bâtiments de grande taille se mettent en place avec succès. Récemment, des centrales de production couplée d'électricité et de chaleur utilisant des ressources géothermiques à grande profondeur ont vu le jour.

Le Sahara algérien a fait l'objet de plusieurs études hydrogéologiques et géologiques, en vue de l'exploration de la nappe du Continental Intercalaire.

En 1960, A. Cornet a achevé l'étude hydrogéologique du Sahara algérien qui est toujours considérée comme une référence dans le domaine. Elle comporte les divers aspects géologiques et hydrogéologiques des nappes aquifères dans le Sahara d'Algérie.

Suite à ces nombreux travaux, une autre vaste étude de la nappe est engagée en collaboration entre l'Algérie et la Tunisie sous l'égide de l'Unesco entre 1968 et 1972. D'importants moyens matériels et humains étaient alors déployés dans le cadre du projet ERESS : Etude

des ressources en eau du Sahara septentrional. Cette étude couvre une superficie de 800 000 km et concerne l'Algérie et la Tunisie.

Une actualisation de l'étude ERESS est réalisée et présentée en 1981 dans le rapport PNUD : Actualisation de l'étude des ressources en eau du Sahara septentrional. L'objectif principal de ces dernières études est l'évaluation de la demande en eau des régions sahariennes entre 2000 et 2010 dans le but de construire un modèle mathématique du Continental Intercalaire dont les résultats permettront une meilleure exploitation des eaux du Continental Intercalaire tout en minimisant l'impact sur l'environnement. D'autres études ont été réalisées au niveau de la division géothermie du CDER (Centre de Développement des Energies Renouvelables). Elles rentrent dans le cadre de la recherche géothermique qui a pour objectif principal l'évaluation du potentiel géothermique de l'Algérie.

L'énergie géothermique est l'une des plus importantes sources d'énergies renouvelables dans le monde. Les utilisations de cette énergie sont multiples. Elles vont des utilisations directes telles que la pisciculture, le chauffage des serres et la balnéothérapie aux utilisations industrielles telle que la production d'électricité.

L'Algérie, de part, sa situation géographique (zone à forte activité tectonique) est considérée parmi les pays riches en eaux thermo minérales.

Si le potentiel des ressources géothermiques du Nord de l'Algérie est bien connu, pour le Sud algérien aucune étude détaillée n'a été encore menée.

Les principaux points qui ont été développés dans ce chapitre sont :

- Une introduction sur le domaine de la géothermie qui est principalement destinée à présenter la géothermie pour le lecteur, à travers un historique sur la géothermie, et les divers domaines d'intérêt de cette nouvelle science.
- Un aperçut sur la place de la géothermie dans le monde. Cette partie donnera une idée sur les différentes réalisations dans le domaine de l'exploitation de la géothermie dans le monde et les projets futurs pour cette science.
- Cartographie détaillée qui comporte :
  - Un inventaire des points d'eau.
  - Les caractéristiques de la nappe d'eau (niveau piézométrique, débit)
  - Caractéristiques physico-chimiques du fluide géothermale telles

que (Température, résidus secs, faciès chimique, PH....etc.).

- Mise en évidence des zones d'intérêt géothermique à travers les cartes de flux de chaleur et de gradient géothermique.

## 2. La géothermie

La géothermie, du grec **géo** (la terre) et **thermos** (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.[11].

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories(énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité.

L'énergie géothermique est localement exploitée pour chauffer ou disposer d'eau chaude depuis des millénaires, par exemple : en Chine, dans la Rome antique et dans le bassin méditerranéen.

La géothermie s'intéresse à l'étude des phénomènes thermiques de la terre qui sont liés à la formation et à la composition du globe[12]. La terre est chaude. La chaleur terrestre qui se propage à travers la croûte continentale (appelé flux de chaleur) n'est pas homogène; le flux de chaleur varie donc d'un endroit à un autre.

En présence d'un flux de chaleur élevé, les eaux souterraines se réchauffent et se transforment en eau thermale. Les eaux deviennent chaudes et remontent en surface sous différentes formes. Ces formes peuvent être :

- **Geysers** : Dans les pays volcaniques, l'eau bouillante jaillit à la surface sous forme de jets atteignant jusqu'à 50 m de haut. Exemple : Les geysers d'Islande, de Nouvelle-Zélande ou de Californie ;
- **Fumerolles** : Ce sont des fentes à partir desquelles des gaz volcaniques, la plupart du

temps vapeur d'eau, s'échappent vers l'atmosphère. Exemple: Fumerolles en Italie à Larderello ;

- **Sources thermales** : Ce sont des émanations d'eau, de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique à température élevée. Elles doivent leur origine à des émanations de vapeur d'eau provenant de zones profondes qui, lorsqu'elles atteignent les couches superficielles, se refroidissent et se condensent, donnant naissance à des eaux de températures très élevées. Exemple[13] : Les sources thermales du Nord de l'Algérie.

L'exploration géothermique s'intéresse essentiellement à définir et à classer, la source de chaleur, le réservoir géothermique et le fluide géothermique.

### 3. 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 :

- 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)[14] 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

- 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.)

- 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 adjar.

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

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

### 3.1. La géothermie à haute énergie

La géothermie haute énergie, exploite les gisements de vapeur sèche ou humide (mélange eau et vapeur). Ces gisements se caractérisent par des températures supérieures à 150°C [15].

On rencontre cette géothermie à haute énergie dans les régions volcaniques et sismiques (frontières de plaques) où le gradient géothermique est particulièrement élevé.

La géothermie haute énergie est destinée principalement à la production d'électricité. La vapeur, qui est puisée dans le réservoir géothermique, est déchargée dans une turbine, reliée à

un alternateur pour la production d'électricité.

La vapeur sèche est directement utilisée alors que la vapeur humide qui est plus fréquente nécessite l'utilisation d'un séparateur.

Un exemple de ce type de géothermie est donné par la centrale de Bouillante à Guadeloupe (France).

### **3.2. La géothermie à moyenne énergie**

La géothermie basse énergie se caractérise par une température comprise entre 30°C et 150° C, elle est rencontrée à une profondeur moyenne de 1000 à 2500 m, dans les formations perméables remplies d'eau situées principalement dans les bassins sédimentaires de grandes dimensions. Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage de serres.

### **3.3. La géothermie à basse et très basse énergie**

La géothermie très basse énergie est rencontrée à de faibles profondeurs (nappes phréatiques) où la température est de l'ordre de 10 à 30°C. Elle est utilisée entre autre pour la pisciculture, l'horticulture et le séchage de produits agricoles[16].

### **3.4. Géothermie HDR (roche chaude sèche)**

Une autre technique géothermique qui a été mise au point, c'est la géothermie roche chaude sèche ou Hot Dry Rock[17]. La technique consiste d'abord à prospector les sites géothermiques favorables qui sont les sites renfermant des roches sèches en profondeur (moins de 6 km), tels que les granites. De l'eau froide sous forte pression est injectée par la suite en profondeur dans des puits ou forages d'injection. L'eau élargit les fissures dans les massifs rocheux. Elle acquiert ainsi une forte quantité de chaleur, puis elle remonte en surface par un forage de production. Avant de réinjecter cette eau dans le forage, ses calories sont récupérées et exploitées au niveau d'une centrale géothermique. Le circuit ainsi formé peut produire une importante quantité d'énergie géothermique.

Depuis vingt-cinq ans, plusieurs projets de recherches sont menés dans ce domaine surtout aux Etats-Unis, au Japon et en Europe. Parmi ces projets, celui de l'union européenne, il est destiné à la création de centrales géothermiques. Cependant d'autres progrès dans

l'exploitation restent à accomplir pour maîtriser ce type de gisement qui peut représenter l'essentiel du potentiel géothermique dans le monde compte tenu du fait de la grande répartition de roches chaudes en profondeur.

#### 4. 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[18].

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)[19].

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

Ce système permet un bon contrôle des paramètres de forage (poids de l'outil, vitesse de rotation, qualité de la boue, débit d'injection de la boue) en fonction des terrains à traverser.

- Le forage rotary entraîne une consolidation des parois en terrains meubles par dépôt d'un cake



#### 4.1. Techniques de forage

La profondeur ciblée pour une exploitation efficace de la géothermie profonde se situe à environ 4 à 5 km, ce qui correspond à des températures de 120°C à plus de 160°C. Avec une centrale à système «flash» par exemple, la production d'électricité à partir de l'eau captée à une telle profondeur pourrait atteindre un taux d'efficacité électrique «raisonnable», supérieur à 15%.

Les techniques de forage actuelles permettent d'aller jusqu'à 7 ou 10 km de profondeur. Etant donné que les coûts de forage augmentent non pas de façon linéaire, mais exponentielle en fonction de la profondeur<sup>10</sup>, il existe également une limite économique qui s'établit aujourd'hui à 5 km environ. Les nouvelles avancées, également prometteuses pour l'exploration géothermique, proviennent essentiellement de l'industrie du pétrole et du gaz, avec par exemple l'automatisation du procédé de forage ou la technique de forage horizontal, qui a notamment été perfectionnée ces dernières années pour l'exploitation des gisements de gaz de schiste. Cependant, l'expérience de l'industrie pétrolière et gazière se limite surtout au forage dans les couches sédimentaires, et ne contribue que de manière limitée au développement de systèmes pétrothermaux visant les roches cristallines. Des techniques de forage considérées aujourd'hui comme originales, telles que la perforation «par fusion de la roche» développée notamment par l'ETH Zurich, laissent envisager à long terme une diminution considérable des coûts de forage.

#### 4.2. Méthodes d'exploration

Lors du choix du site, il est indispensable de réaliser des études géophysiques afin de réduire les risques d'échec, en particulier pour les projets hydrothermaux. Les couches sédimentaires peuvent être modélisées à l'aide de méthodes sismiques consistant à envoyer des ondes sonores dans le sous-sol et à analyser les échos dans chacune des couches traversées. Cela permet d'obtenir un profil des couches sédimentaires le long d'une ligne (sismique 2D). De nouvelles technologies 3D permettent d'améliorer considérablement la modélisation, notamment lorsqu'elles peuvent être calibrées avec les vraies données de forage. La sismique 3D a été par exemple utilisée à l'hiver 2009/2010 pour le choix du site du projet hydrothermal à Saint-Gall. Si ces méthodes n'ont pas permis de trouver de l'eau, il a cependant été possible de mettre en évidence la présence de zones de failles pouvant présenter une perméabilité élevée.

Dans la perspective du développement des systèmes pétrothermaux, il est particulièrement important d'enregistrer en continu les petites vibrations qui se produisent lors de la phase de stimulation. Les mesures réalisées à Bâle ont permis de fournir des informations précieuses

sur les relations entre la pression injectée, la vitesse d'écoulement, les vibrations sismiques et les fissures consécutives. Ces données sont utilisées encore aujourd'hui par des universités du monde entier, dont l'ETH Zurich, afin de mieux comprendre le processus de stimulation et de mettre au point de nouveaux concepts de gestion des risques.

### 4.3. Potentiel

Le potentiel de production d'électricité à partir de la géothermie est difficilement chiffrable dans la mesure où la faisabilité technique n'a pas encore été démontrée. L'Institut Paul Scherrer estime le potentiel théorique de production d'électricité à près de 64 000 TWh (récupération de 4% de l'énergie stockée dans les roches, avec un degré d'efficacité électrique de 10%), ce qui représente mille fois la consommation électrique actuelle de la Suisse.

Le potentiel techniquement exploitable est en revanche nettement plus réduit. Dès lors que la faisabilité est avérée, Axpo estime que la production à partir de la géothermie pourrait atteindre environ 17 TWh. Le potentiel économique est de nouveau différent: dans une méta-étude de 2009, Trialogue Energie Suisse évalue le potentiel maximum à 0,5 TWh d'ici 2035 et à 3,5 TWh d'ici 2050, pour autant que l'accent soit mis sur la production d'électricité et non de chaleur.<sup>13</sup> Dans le cadre de ses perspectives énergétiques les plus récentes, l'OFEN estime que la production d'électricité se portera en 2050 à 4 TWh. Le manque de maturité technique, les risques d'échec élevés, la rentabilité incertaine et enfin le manque d'acceptation constituent à l'heure actuelle les principaux freins au développement de la géothermie en Suisse.

**Tableau 1.** Potentiel de la production d'électricité jusqu'en 2050.

Potentiel (TWh)	2012	2035	2050
Théorique	64 000		
Technique	17		
Attendu/réalisable	0	0 - 0,4	3,5 - 4

### 4.4. Estimation de la puissance disponible et de la qualité de l'énergie

La géothermie est l'une des rares sources d'énergie renouvelables capable de fournir tout au long de l'année une énergie en ruban. La chaleur résiduelle peut être utilisée pour des réseaux de chaleur à distance.

**Tableau 2.** Disponibilité de la puissance géothermique en hiver, jusqu'en 2050.

<b>Puissance disponible (% de la puissance installée)</b>	<b>2012</b>	<b>2035</b>	<b>2050</b>
<b>Charge de base</b>	-	100%	100%

L'électricité géothermique connaît un essor important depuis quelques années et, en 2013, quelques 11,38 TWh d'énergie électrique ont été produites en Europe grâce à une puissance totale installée d'environ 1,71 GWe. Selon les Plans d'action nationaux pour l'énergie renouvelable (NREAP) des États-membres de l'UE, la puissance passera de 0,9 GWe, installée en 2013, à 1,4 GWe en 2020. La production d'électricité géothermique prévue pour 2020 est de 11 TWh. Pour l'Europe, la production totale passera de 11,4 TWh à 16,7 TWh, cette forte augmentation étant due à la croissance rapide des marchés turcs et islandais. Le potentiel économique de l'énergie géothermique est beaucoup plus élevé en 2020 :

- 21,2 TWh pour l'UE-28 ;
- 70,8 TWh pour le potentiel total de l'Europe.

**Tableau 3.** Evolution des coûts prévue par l'AES jusqu'en 2050.

<b>Coûts</b>	<b>2013</b>	<b>2035</b>	<b>2050</b>
<b>Investissement (CHF/kWel)</b>	env. 22 000	11 500	10 000
<b>Exploitation et maintenance</b>	3,5% des coûts d'investissement par an		
<b>Heures d'exploitation de pleine charge (h/a)</b>	6500	7500	8000
<b>Prix de revient (ct/kWh)</b>	25 -36	16 - 23	11 - 16

## 5. Exploitation de la géothermie dans le monde

La plus ancienne application des sources thermales est la balnéothérapie. Elle fut utilisée par les chinois et les japonais, par les grecs, les turques, et les romains... etc.

La plus importante exploitation de la géothermie est dans le domaine de la production d'électricité. En 1904, le prince Piero Ginori Conti promut cette industrie pour la première fois dans le monde à Larderello en Italie.

C'est donc grâce à l'Italie qu'un élan considérable dans le domaine de l'exploitation de l'énergie géothermique a été accompli.

Après un demi-siècle, la nouvelle Zélande commença alors la production de l'énergie géothermique; suivie par la suite, par les Etats Unis en Californie notamment et à Sans Francisco.

Depuis, bien d'autres pays ont à leurs tours investis dans ce domaine, c'est le cas du Japon, du Mexique, du Salvador, de l'Islande et de la Turquie.

Les utilisations de la géothermie dans le monde sont nombreuses. Elles sont résumées dans le tableau 4 suivant (diagramme de Lindal) :

**Tableau 4:** Les utilisations de la géothermie à travers le monde.

<i>T (°C)</i>	<i>Domaines d'utilisation</i>	
<b>200</b>		<b><i>Production d'électricité par la méthode conventionnelle</i></b>
<b>190</b>	<i>Réfrigération par absorption</i>	
<b>180</b>	<i>Préparation de pâte à papier</i>	
<b>170</b>	<i>Fabrication d'eau lourde</i>	
<b>160</b>	<i>Séchage de poisson, séchage de bois</i>	
<b>150</b>	<i>Fabrication d'alumine</i>	
<b>140</b>	<i>Séchage de produits agricoles</i>	

		<b><i>Production d'électricité par cycle binaire</i></b>
<b>130</b>	<i>Evaporation</i>	
<b>120</b>	<i>Production d'eau douce par distillation</i>	
<b>110</b>	<i>Séchage de parpaings de ciment</i>	
<b>100</b>	<i>Séchage de légumes</i>	
<b>90</b>	<i>Déshydratation</i>	
<b>80</b>	<i>chauffage de serres Chauffage urbain</i>	
<b>70</b>	<i>Réfrigération</i>	
<b>60</b>	<i>Elevage d'animaux</i>	
<b>50</b>	<i>Balnéothérapie</i>	
<b>40</b>	<i>Chauffage de sols</i>	
<b>30</b>	<i>Piscine, fermentation</i>	

### 5.1. La capacité énergétique

La géothermie est une source d'énergie renouvelable qui produit deux types d'énergies, l'énergie électrique et l'énergie calorifique. Sur le plan exploitation, elle est classée troisième dans le monde après la biomasse et l'hydraulique. Aujourd'hui, elle représente 3 % de la production énergétique mondiale dont 0.4 % dans l'énergie électrique.

L'énergie géothermique est aujourd'hui utilisée dans plus de soixante pays, mais cependant elle est particulièrement développée dans certains pays seulement comme les Etats-Unis, le Japon, l'Islande, la Nouvelle-Zélande, les Antilles françaises et la Suisse.

L'Islande étant un pays volcanique, il est par conséquent très riche en eau thermale. Aujourd'hui ce pays satisfait pratiquement la totalité de ces besoins en chaleur et en électricité à partir de l'énergie géothermique.

Un très bon exemple est donné aussi par les philippines qui produisent 21.5% de son énergie électrique à partir de la géothermie.

Afin de rentabiliser ce type de gisements il faut surtout une bonne étude d'intérêt économique qui concerne tous les aspects, tels que, le coût des installations géothermiques, quantité de calorie fournie, transformation des calories en énergie... etc[20]

**Tableau 5 :** Evolution de la capacité géothermique installée dans le monde pour la production d'électricité en MWe[21]

Pays	1995	2000	2002
<b>Amérique du Nord</b>	3 570	2 983	2 971
<b>Amériques centrale et du Sud</b>	231	407	416
<b>Total Amérique</b>	3 801	3 390	3 387
<b>Asie</b>	1 979	3 075	3 220
<b>Union européenne</b>	641	805	883
<b>Autres pays d'Europe</b>	81	213	297
<b>Total Europe</b>	722	1 018	1 180
<b>Océanie</b>	286	437	441
<b>Afrique</b>	49	54	128
<b>Total monde</b>	6 837	7 974	8 53

## 5.2. Coûts et prix de revient

Le prix de revient est très difficile à estimer à l'heure actuelle puisqu'aucun projet n'a été réalisé à ce jour. On peut cependant supposer que le coût de revient potentiel se situerait aux alentours du tarif prévu par la RPC, soit 45 centimes par kWh. La rentabilité peut être améliorée par la vente de la chaleur produite, si les coûts de transport de la chaleur sont également amortis. Le prix de la chaleur provenant d'une source d'énergie renouvelable doit aujourd'hui être déterminé par rapport au prix de la chaleur «fossile».

En Suisse, les coûts de forage pour un seul puits s'élèvent à environ 20 millions de francs. Le forage d'exploration de Triemli par exemple a coûté un montant de cet ordre de grandeur. Les coûts pour une exploitation efficace de la géothermie s'avèrent nettement supérieurs car deux puits sont nécessaires. Pour son projet hydrothermal d'une puissance électrique prévue de 4,5 MW, la ville de Saint-Gall a demandé un prêt de 160 millions de CHF au total (50 millions pour les deux forages, 25 millions pour l'installation, 85 millions pour le réseau de chaleur à distance). Cela correspond à un investissement de 35 500 francs par kWel avec le réseau de chaleur à distance, 16 700 francs par kWel hors réseau de chaleur à distance, c'est-à-dire uniquement pour les forages et la centrale géothermique.

Les perspectives énergétiques actuelles de l'OFEN chiffrent les coûts d'investissement à 7000 francs par kWel pour 2010, avec une diminution à 4500 francs par kWel d'ici 2050. Le secteur de l'énergie considère néanmoins ces estimations irréalistes, ce que confirment les chiffres du projet de Saint-Gall, cités plus haut. D'autres sources de l'OFEN tablent aujourd'hui sur un investissement de près de 22 500 francs par kWel, ce qui correspond à un prix de revient d'environ 40 centimes par kWh. Avec l'expérience et les progrès technologiques correspondants, le prix de revient pourrait chuter à long terme à 15 centimes par kWh.

## 5.3. Impact sur l'environnement/climat

Les centrales électriques géothermiques sont considérées comme rejetant peu de CO<sub>2</sub>. Sur l'ensemble de leur durée de vie, elles émettent en moyenne dans le monde quelque 120 grammes d'équivalent CO<sub>2</sub> par kWh. La géothermie est donc une technologie «propre et sûre».

Les installations géothermiques se prêtent à une exploitation décentralisée (environ 5 MWe). Elles peuvent donc être placées à l'intérieur ou à proximité de zones urbaines, ce qui joue un rôle majeur pour l'une utilisation efficace de la chaleur. Sur les sites où les conditions

géologiques sont réunies, il devrait également être possible à l'avenir d'augmenter la capacité des centrales: plusieurs forages percés dans différentes directions pourraient être exploités sur un même site.

En raison des séismes de faible intensité qui se sont produits à Bâle, à Saint-Gall, mais aussi à Landau en Allemagne, tous provoqués par les forages profonds et par les travaux qu'ils impliquent, la géothermie fait l'objet d'un débat public. Il importera à l'avenir d'évaluer correctement le risque sismique et de comparer les conséquences des microséismes aux avantages de la géothermie.

#### **5.4. Conditions-cadre**

Les conditions-cadre ont été largement exposées dans le chapitre 2. Les obstacles à une exploration géothermique systématique par des sociétés privées ou des fournisseurs d'énergie sont dans l'ensemble encore trop importants. Il s'agit notamment des coûts de forage très élevés, des risques financiers substantiels (risque d'échec, couverture des risques insuffisante, assurances), ainsi que des procédures de concession et d'autorisation mal définies. Il n'existe en effet pas de législation nationale claire en ce qui concerne le droit de propriété et l'aménagement du sous-sol. Le Conseil national a ainsi rejeté en 2010 une motion proposant d'intégrer le sous-sol exploitable au champ d'action de l'aménagement du territoire.<sup>20</sup>

Il existe également d'autres obstacles, parmi lesquels les forts risques inhérents au projet, comme la sismicité induite ou encore, suite au projet de Bâle, le manque d'acceptation sociale et politique vis-à-vis de la stimulation des roches cristallines. En revanche, les projets hydrothermaux actuellement menés en Suisse sont bien acceptés. La demande de prêt pour les forages d'exploration à Zurich et le projet hydrothermal de Saint-Gall ont été approuvés par la population avec pour chacun plus de 80% de votes favorables. Malgré les événements survenus récemment à Saint-Gall, les réactions mesurées laissent penser que les habitants soutiennent toujours la géothermie. L'acceptation de futurs projets pétro-thermaux, qui présentent un risque accru de sismicité induite, demeure toutefois incertaine. Dans ce contexte, une évaluation correcte des risques et une communication adéquate seront indispensables.

#### **5.5. Création d'emplois**

Les emplois proposés s'adressent à des personnes possédant différents types et différents niveaux de compétence. Ainsi l'exploration de nouveaux gisements géothermiques requiert la

qualification de scientifiques et d'ingénieurs, alors que la construction et l'exploitation de nouvelles centrales exigent des techniciens qualifiés. L'industrie géothermique peut avoir une influence sur l'activité économique et la création d'emplois, principalement dans les secteurs suivants : □ fournisseurs d'équipements mécaniques et de matières premières ;

- conseillers et entrepreneurs pour la recherche de ressources géothermiques ;
- entreprises de forage et d'entretien des puits ;
- services environnementaux de gestion des permis et d'analyse des échantillons ;
- promoteurs en géothermie, gérant l'évolution du projet, la construction, la sécurité, etc. ;
- gestionnaires de centrales électriques et personnels d'entretien ;
- scientifiques dans le secteur de la recherche et du développement.

## 6. La géothermie en Algérie

En Algérie la recherche géothermique rentre dans le cadre des activités du Centre de Développement des Energies Renouvelables C.D.E.R. de Bouzaréah et fut aussi l'objet de recherches à la SONATRACH (Direction Recherche et Développement, 1980)

Les études en géothermie ont été menées principalement sur le Nord algérien ; parmi ces études on peut citer [22]...etc.

Ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales. Près de 200 sources ont été inventoriées, elles sont réparties à travers tout le territoire nord algérien, majoritaires au Nord-Est (voir tableau 3). Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskoutine (98°C) à Guelma ; Hammam Boutaleb (52°C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66°C) à Mascara. Ces nombreuses sources thermales émergent principalement à partir des calcaires jurassiques du Nord de l'Algérie.

Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence ; au Nord-Ouest, au Nord-Est et au Centre-Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les régions d'Oran, de la Kabylie et de Constantine.

En plus des nombreuses sources thermales dans le Nord du pays, il existe dans le Sud algérien et plus exactement dans le Sahara septentrional une importante réserve en eau thermale qui est la nappe du Continental Intercalaire.



**Tableau 6 :** Principales Caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales du Nord de l'Algérie.

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

En Algérie, depuis fort longtemps les eaux thermales ont été utilisées pour leurs bienfaits thérapeutiques. Les sculptures découvertes dans les régions des hammams indiquent que bien avant l'époque romaine des établissements balnéaires existaient à ces endroits. Mais ce sont surtout les romains qui ont le mieux développé les techniques de captation et de canalisation des eaux thermales. Très souvent, ils ont construit leurs villes à proximité des établissements thermaux afin de tirer le meilleur parti de ces sources thermales.

Aujourd'hui, bien que le potentiel géothermique soit très important dans notre pays, le domaine de l'exploitation reste limité et se restreint principalement à la balnéothérapie et aux utilisations domestiques.

Depuis 1990, une récente application de l'énergie géothermique a commencé dans le Sahara algérien. C'est dans la région de Touggourt qu'une première installation

d'équipements destinés aux chauffages des serres est assurée par l'équipe du laboratoire Thermique du C.D.E.R.

Bien que cette application ait donné de bons résultats, elle ne s'est pas encore généralisée et reste très modeste en rapport avec le potentiel géothermique du Sud algérien.

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

## **7. L'expérience tunisienne**

La Tunisie qui exploite la même nappe du Continental Intercalaire que l'Algérie est très avancée dans le domaine du chauffage de serres.

En effet au Sud de la Tunisie plus exactement dans la région de Kebili, plus de 104 ha de serres agricoles sont chauffées par la chaleur d'origine géothermique.

Des bénéfices importants sont réalisés à travers cette exploitation qui permet de cultiver hors saison toutes sortes de fruits et légumes qui sont principalement destinés à l'exportation

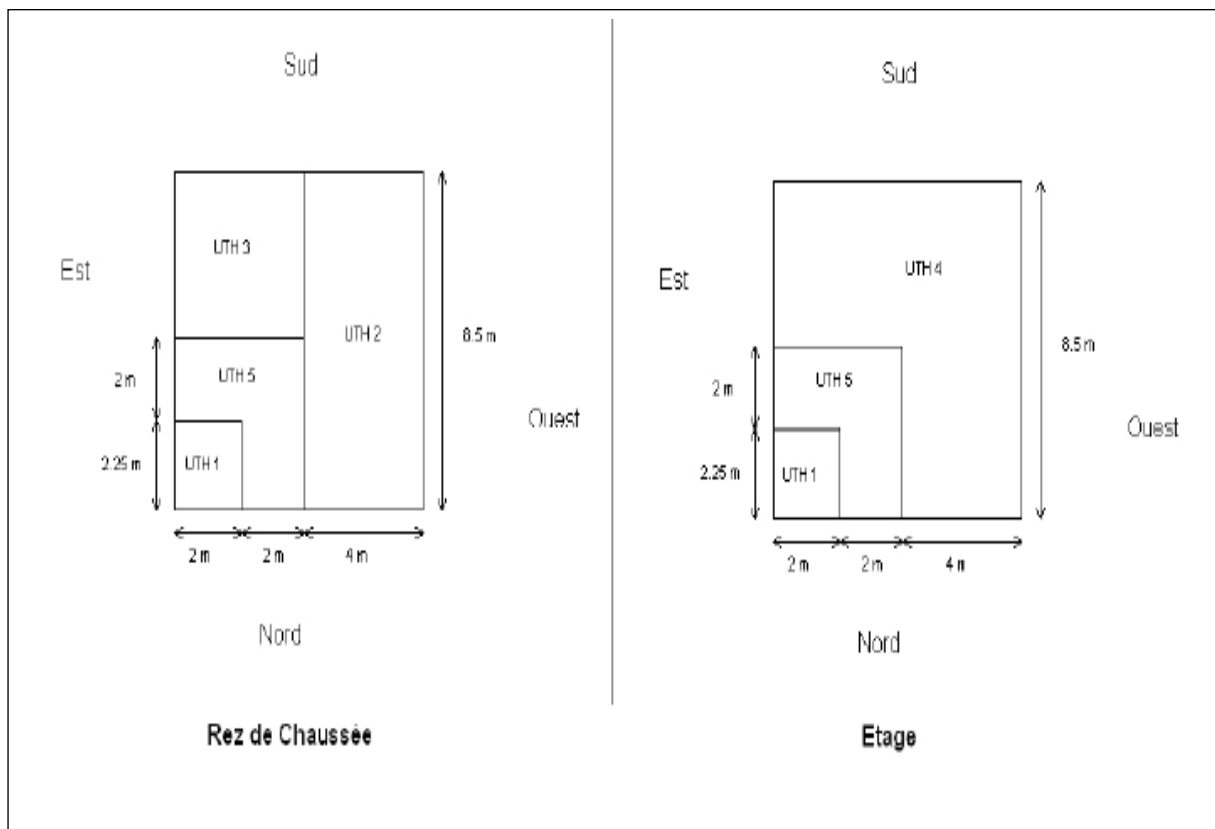
**Chapitre III : DIMENSIONNEMENT  
D'UNE INSTALLATION A ENERGIE  
GEOtherMIQUE**

## 1. Introduction

Le but d'une exploitation de l'énergie géothermique est de capter la chaleur des profondeurs, pour l'amener à la surface de la terre en recourant à des technologies spécifique. A certains endroits, la nature fournit elle-même le système de circulation requis, par exemple les sources thermales. En d'autres lieux, on doit faire appel à des forages avec pompes de production ou à des sondes géothermiques doublées de pompes de circulation

### Partie I. Description détaillée de la maison individuelle modélisée

Le bâtiment est découpé en 5 unités thermiques (UTH) : sanitaires et salle de bains (UTH 1), Salon (UTH 2), cuisine (UTH 3), chambres (UTH 4), couloirs (UTH 5). La géométrie simplifiée de la maison est décrite en Figure 1. La hauteur sous-plafond est de 2:5 m au rez-de-chaussée et au 1er étage, ce qui correspond à un volume habité de 340 m<sup>3</sup>. La maison est orientée plein sud.



**Figure 6** : Plan de la maison délimitant les différentes zones thermique [23]

## 1. Caractéristiques thermiques des parois [23]

Parois extérieures	Composition	U ( $W/m^2K$ )	A ( $m^2$ )
Mur extérieur	Parpaing (20 cm)	0.362	148.54
	Doublage placoplâtre TH38 90+10 (10 cm)		
Toiture	Placoplâtre BA13 (1.3 cm)	0.165	68
	Laine de roche (24 cm)		
Plancher bas	Béton lourd (20 cm)	0.77	68
	Polystyrène expansé (4 cm)		
	Mortier (5 cm)		
	Carrelage (2 cm)		
Porte d'entrée	Bois plein (1.7 cm)	3.535	1.94
Porte secondaire	Bois léger (4.3 cm)	2.195	1.64
Fenêtres	4/16/4 Argon $g = 0.589$	1.4	12.88

Parois intérieures	Composition	U ( $W/m^2K$ )	A ( $m^2$ )
Mur intérieur	Plâtre courant (0.5 cm)	2.897	73.125
	Brique d'argile (5 cm)		
	Plâtre courant (0.5 cm)		
Plancher intermédiaire	Carrelage (1 cm)	2.683	68
	Mortier (5 cm)		
	Béton lourd (4 cm)		
	Hourdis béton (12 cm)		
	Placoplâtre (1.3 cm)		

Ponts thermiques	Psi ( $W/mK$ )	L (m)
Mur extérieur / Plancher bas	0.33	33
Mur extérieur / Plancher intermédiaire	0.78	33

## 2. Orientation des ouvertures et répartition par zone thermique [23]

Unité thermique	Nombre d'ouvertures	Surface unitaire ( $m^2$ )	Orientation
Sanitaires et salle de bains	2 fenêtres	0.3	Nord
	1 fenêtre	0.57	Nord
Salon	1 porte-fenêtre	2.58	Sud
	1 fenêtre	1.25	Ouest
	1 fenêtre	1.25	Nord
Cuisine	1 porte-fenêtre	2.58	Sud
	1 porte secondaire	1.64	Est
Chambres	2 fenêtres	1.25	Sud
	1 fenêtre	1.25	Nord
Couloirs	1 fenêtre	0.3	Nord
	1 porte d'entrée	1.94	Nord

### 3. Définition des apports dans chaque zone thermique

#### 3.1 Apports des personnes occupant l'habitation

On considère que chaque occupant de la maison émet une puissance constante de 120 W sous forme radiative. L'histogramme présenté en Figure 2 décrit l'occupation de la maison au cours d'une journée type. On suppose que l'occupation de la maison suit ce profil tous les jours de l'année.

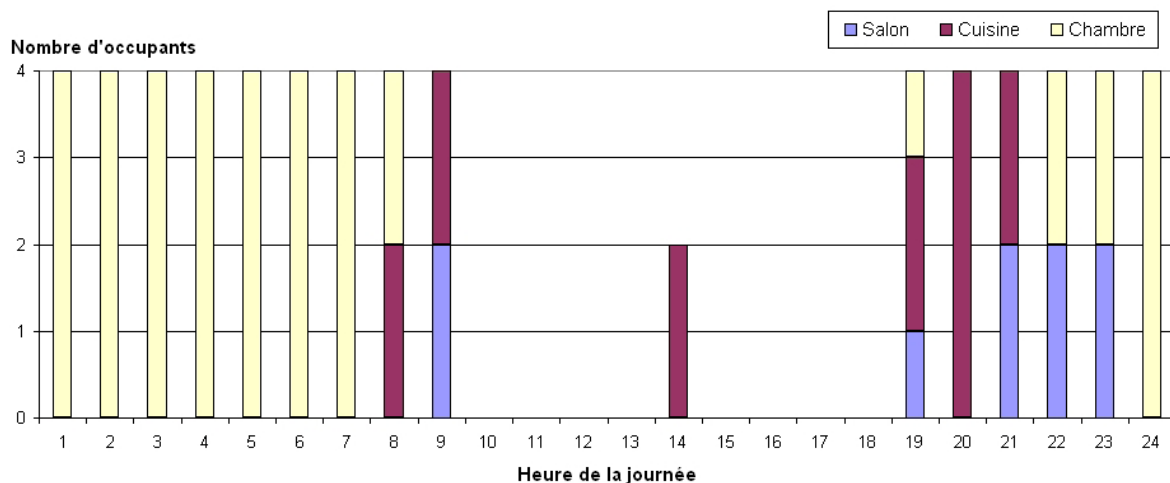


Figure 7 : Profil d'occupation de la maison.[23]

#### 3.2. Apports internes et éclairage

Pour chaque zone thermique, des profils de journée type ont été définis par permettant de déterminer les apports internes et l'éclairage de chaque zone thermique heure par heure[23]. On suppose lors de la simulation du bâtiment que tous les jours de l'année sont des jours type.

**Sanitaires et salle de bains.** On ne considère pas d'occupation dans les sanitaires et la salle de bains. Les apports internes et l'éclairage sont donc nuls dans ces espaces.

**Salon.** La puissance d'éclairage installée est de  $12 \text{ W/m}^2$  (puissance rayonnante). La puissance maximale apportée par le matériel hifi est de  $10 \text{ W/m}^2$  sous forme de puissance convective.

**Cuisine.** La puissance d'éclairage installée dans la cuisine est de  $15 \text{ W/m}^2$  (puissance rayonnante). Les apports n'y sont jamais nuls. Cela est dû au fonctionnement permanent de certains matériels tels que le réfrigérateur. La puissance maximale de ces apports est de  $45 \text{ W/m}^2$  sous forme de puissance convective.

**Chambres.** La puissance d'éclairage installée est de  $7 \text{ W/m}^2$  (puissance rayonnante) et la puissance maximale des apports (radioréveil, chaîne hifi) est de  $4 \text{ W/m}^2$ , sous forme de puissance convective.

**Couloirs.** Aucune occupation n'est considérée dans cet espace, l'éclairage et les apports internes sont nuls.

#### 4. Ventilation

La ventilation est réalisée par un système à double Flux sans échangeur, elle est supposée fonctionner en permanence. L'air frais est injecté dans les chambres et le salon ( $64 \text{ m}^3/\text{h}$  dans le salon et  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  dans les chambres). L'air vicié est extrait dans la cuisine, les sanitaires et la salle de bains ( $60 \text{ m}^3/\text{h}$  dans la cuisine et  $104 \text{ m}^3/\text{h}$  dans les sanitaires et la salle de bains) [23].

#### 5. Inertie de l'espace intérieur

L'inertie thermique du mobilier est prise en compte par une valeur type de  $20 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ [23].

### Partie II. Production d'énergie pour usage domestique

#### 1. Les capteurs géothermiques verticaux

Les capteurs géothermiques verticaux (sondes géothermiques ou géo-sondes) sont des échangeurs thermiques qui prélèvent de la chaleur emmagasinée dans le sous-sol, par conduction thermique au moyen d'une pompe à chaleur (PAC).

Ils sont constitués d'un ou plusieurs forages verticaux de quelques dizaines de mètres de profondeur, parfois plus, dans lesquels sont insérés des tubes en matériau synthétique, en général du polyéthylène haute densité (PEHD), raccordés à une PAC.

Les tubes peuvent être reliés entre eux, soit par une chambre commune, soit deux par deux en double U à la base. Un fluide antigel caloporteur, de l'eau glycol composée à 30 % minimum de mono propylène glycol, circule à l'intérieur des tubes pour prélever la chaleur au sous-sol environnant.

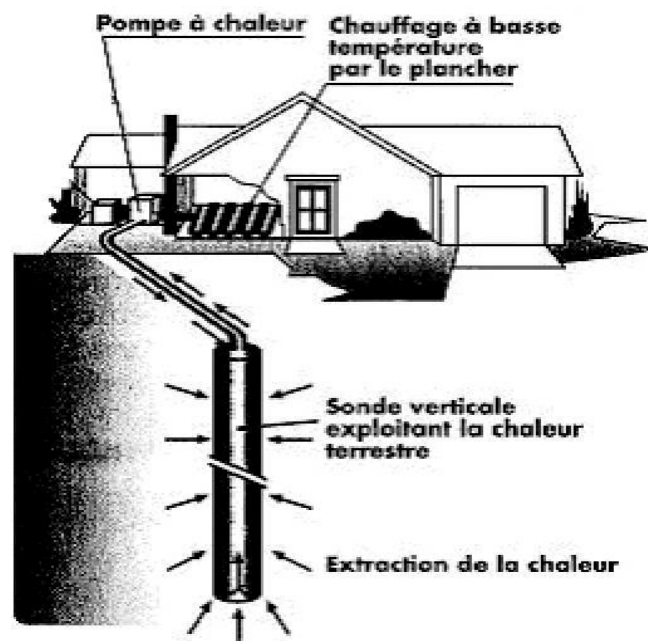
La PAC restitue en surface la chaleur prélevée pour chauffer une habitation, de préférence au moyen d'un plancher chauffant. En été, le système peut être inversé pour fonctionner en mode rafraîchissement (cas d'une PAC réversible).

Cette technique est adaptée aux maisons individuelles, à l'habitat individuel groupé, au résidentiel collectif ou au tertiaire. Elle bénéficie d'aides financières publiques (crédits d'impôts, aides aux opérations exemplaires de l'ADEME, aides de l'Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat-ANAH,...) et peut se satisfaire de démarches administratives simplifiées qu'il faut cependant connaître et respecter.

Le développement des capteurs géothermiques verticaux fiables, durables être secteur de l'environnement, doit tenir compte de plusieurs facteurs liés à l'utilisation du sous-sol.

Pour cela le foreur, doit justifier de :

- une bonne connaissance de la réglementation générale et locale ;
- une bonne connaissance préalable du sous-sol ;
- l'utilisation d'équipements adaptés ;
- des méthodes de travail permettant d'assurer une prestation rigoureuse et de qualité.



**Figure 8 :** Schéma de principe d'une installation de chauffage à basse température utilisant une sonde géothermique [24].

## 2. Aspects réglementaires

Trois grandes séries de textes régissent les dispositions réglementaires applicables aux sondes géothermiques[24]. Il s'agit :

- du Code civil ;
- du Code minier ;
- du Code de l'environnement comprenant la mise en œuvre.



Ces textes et tout particulièrement ceux relevant du Code de l'environnement servent principalement à la protection des ressources en eau. Aussi, nous avons essayé, dans toute la mesure possible, d'en extraire les éléments susceptibles de concerner directement les sondes géothermiques qui, par définition, n'exploitent pas de ressources en eau mais dont la réalisation, lors de la phase forage notamment, peut avoir des conséquences non négligeables sur les aquifères.

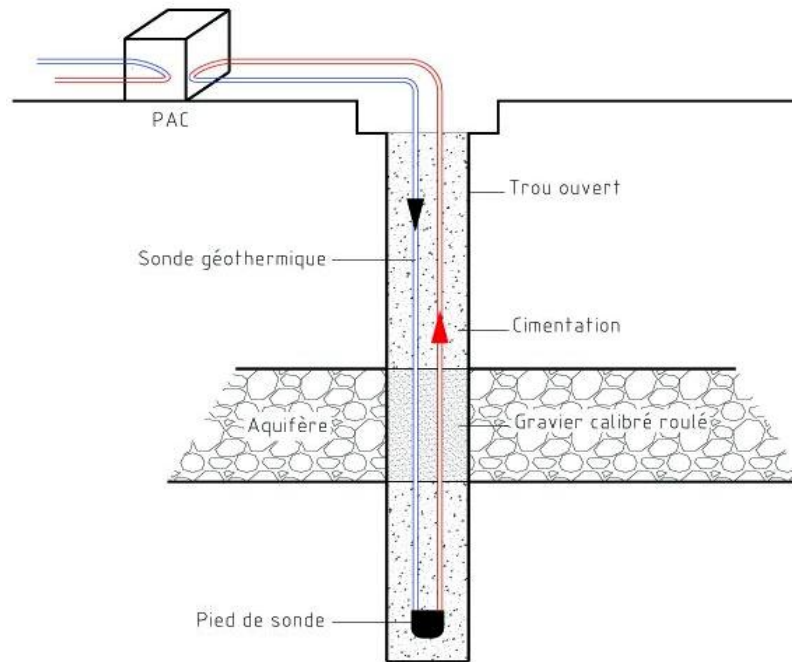
Le tableau suivant fait la synthèse des principales dispositions applicables.

### 3. Rôle des opérateurs

L'installateur chauffagiste, souvent en partenariat avec le constructeur de la PAC, doit définir les besoins thermiques de l'habitation à chauffer, assure l'installation de la pompe à chaleur et du plancher chauffant/rafraîchissant et très souvent, les raccordements au réseau souterrain[24].

Dans le cas d'installations plus importantes (secteur tertiaire ou résidentiel collectif ou habitat individuel groupé), le bureau d'études techniques (BET) spécialiste du génie climatique, souvent en partenariat avec le constructeur de la PAC ou le maître d'œuvre, doit définir les besoins thermiques du (ou des) bâtiment(s) à chauffer. Il rédige le cahier des charges des installations en précisant, en concertation avec le foreur, le dimensionnement des capteurs verticaux, leur nombre et la position des forages à réaliser sur un plan de masse détaillé, fourni par le maître d'ouvrage. Le foreur réalise l'installation souterraine :

- il prend en compte la nature des terrains, la présence éventuelle de niveaux aquifères et les contraintes réglementaires existantes ;
- il assure la procédure de déclaration du forage auprès de la DRIRE dans le département concerné (ou il s'assure que le maître d'ouvrage a bien respecté la procédure de déclaration du forage) ;
- il s'assure du bon dimensionnement des capteurs pour ne pas dépasser la puissance maximale soutirée au sous-sol. Il avertit et conseille le maître d'ouvrage afin d'augmenter la longueur des capteurs, notamment si le terrain est meuble et sec ;
- il met en œuvre les techniques de forage adaptées afin d'assurer la tenue des terrains à traverser ;
- il assure la bonne insertion des capteurs dans les forages ;
- il assure le remplissage (cimentation, graviers, etc.) correct de ces derniers.



**Figure 9** : Exemple de prise en compte des terrains pour la réalisation et le remplissage d'une sonde géothermique. [25]

#### 4. État de l'art de l'installation souterraine

Les éléments du cahier des charges qui suivent sont donnés à titre indicatif, étant entendu que le foreur, par ses connaissances précises du terrain et du projet à réaliser, doit être en mesure d'adapter le cahier des charges pour parvenir au résultat attendu, dans le meilleur respect des contraintes réglementaires et de l'état de l'art. Il reste le seul responsable de la réalisation des ouvrages dont il a la charge. Les sondes mises en place dans les forages sont des organes essentiels du dispositif de chauffage dans la mesure où elles assurent les échanges thermiques entre le milieu naturel et la pompe à chaleur. Ces réalisations doivent être parfaitement maîtrisées par des opérateurs formés à ces techniques et dont la compétence est reconnue et validée.

Un forage mal exécuté est un vecteur potentiel de pollution par infiltrations depuis la surface ou par la mise en communication de différents niveaux aquifères naturellement isolés par des couches imperméables. Il peut aboutir à un échec d'exploitation susceptible de pénaliser l'activité de la filière.

La réalisation d'un forage et l'installation d'une sonde dans le respect des règles de l'art est une opération qui nécessite une grande rigueur professionnelle car l'ouvrage est invisible. Le foreur travaille en aveugle et les malfaçons sont difficiles à vérifier et impossible à réhabiliter après achèvement des travaux. Dans le choix de l'entreprise, les considérations économiques ne doivent pas pénaliser les professionnels sérieux et compétents qui

connaissent et respectent la réglementation et les règles de l'art, refusent la facilité, le mercantilisme, la mise en œuvre d'équipements et de matériaux inadaptés.

#### **4.1. Connaissance préalable du sous-sol**

Un projet de forage ne peut être bien conçu et bien réalisé que s'il s'appuie sur une bonne connaissance préalable du sous-sol, notamment de la nature et de la profondeur probable des couches géologiques et des niveaux aquifères. Pour compléter sa connaissance, le foreur se renseigne auprès du BRGM (Banque des données du Sous-sol), d'un géologue ou d'un hydrogéologue local ou encore, dans certains cas, d'un bureau d'étude ou maître d'œuvre spécialisé dans les travaux dessous-sol ou accède aux données du sous-sol au moyen de la navigation sur Internet.

Toutes ces données peuvent être recherchées dynamiquement sur la zone d'intérêt définie interactivement par l'utilisateur. La définition de la zone d'intérêt peut s'effectuer par recherche géographique ou par mots-clés. Par ailleurs, les informations peuvent être obtenues auprès de chaque Service géologique régional.

L'expérience du terrain que possèdent le foreur et la consultation auprès des administrations et des organismes publics spécialisés conduisent à prendre en compte les données et contraintes suivantes :

- état du site du forage (sol superficiel, remblais éventuels, zones de pollutions du sol) ;
- couches géologiques et niveaux aquifères ;
- carrières et cavités souterraines ;
- concessions minières ;
- périmètres de protection rapprochée des points de prélèvements d'eau destinée à l'alimentation des collectivités humaines ;
- périmètre des sources d'eaux minérales déclarées d'intérêt public ;
- contraintes locales d'urbanisme ;
- présence d'autres forages.

#### **4.2. Dimensionnement des capteurs [26]**

Cette tâche est généralement réservée à l'installateur climaticien ou chauffagiste (aux bureaux d'études techniques (BET), dans le cas de projets non individuels) [26].

Néanmoins le foreur doit vérifier la cohérence des préconisations, notamment en fonction des terrains rencontrés (terrain sec et granuleux ou au contraire, présence d'un aquifère).

L'analyse portera sur le nombre de forages nécessaires pour obtenir la puissance calorifique désirée, en respectant la distance minimale entre chacun d'eux.

En cas de dimensionnement insuffisant, il interviendra auprès du BET et/ou du client pour augmenter la longueur des capteurs.

Le dimensionnement des capteurs doit être déterminé de façon rigoureuse. En effet, tout sous-dimensionnement entraînera un appauvrissement thermique irréversible du sol et une dégradation des performances soutirées au cours du temps ».

Les seuils et prescriptions à respecter sont les suivants :

<b>Dimensionnement du capteur</b>	
<b>Puissance maximale soutirée au sol dans un terrain normalement humide</b> (puissance source froide de la PAC = puissance au condenseur moins puissance électrique)	50 W/ml (Watt par mètre linéaire de sonde verticale ou de longueur de forage)
Energie maximale prélevée dans le sol pour un terrain normalement humide (chauffage uniquement avec puissance de PAC = 100% des déperditions)	100 kWh / ml an (*)
<b>Puissance maximale soutirée au sol pour un terrain meuble et sec (cailloux ou graviers secs)</b>	30 W/ml
Energie maximale prélevée dans le sol pour un terrain meuble et sec (cailloux ou graviers secs)	65 kWh / ml an

(\*) En cas de puissance de PAC inférieure à 100 % des déperditions et en cas de production d'eau chaude sanitaire par la PAC, ce critère devra être vérifié. [26]

Type de terrain	Puissance spécifique extraite	
	pour 1 800 h/an	pour 2 400 h/an
<b>Valeurs générales indicatives</b>		
• Sous-sols pauvres (sédiments secs)	25 W/m	20 W/m
• Sous-sols normalement rocheux et sédiments saturés en eau	60 W/m	50W/m
• Roches consolidées à conductivité thermique élevée	84 W/m	70 W/m
<b>Roches spécifiques</b>		
Graviers et sables secs	< 25W/m	< 20 W/m
Graviers et sables saturés en eau	65 à 80 W/m	55 à 65 W/m
Argile humide	35 à 50 W/m	30 à 40 W/m
Calcaire massif	55 à 70 W/m	45 à 60 W/m
Grès	65 à 80 W/m	55 à 65 W/m
Granite	65 à 85 W/m	55 à 70 W/m
Basalte	40 à 65 W/m	35 à 55 W/m
Gneiss	70 à 85 W/m	60 à 70 W/m

Les valeurs peuvent varier de façon significative en fonction de la nature des terrains (eau, terrains secs) de leur altération et de la présence de fractures.

Les valeurs sont valides pour :

- de l'extraction de chaleur pouvant inclure la production d'eau chaude sanitaire ;
- des profondeurs de sonde de 40 à 100 m ;
- des sondes composées de tubes en double « U » ;

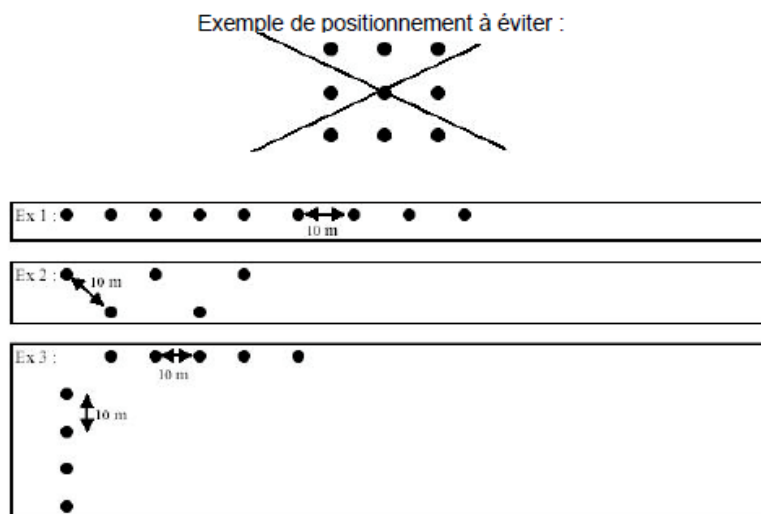
Elles ne sont pas valides pour un champ de sondes composé d'un grand nombre d'unités de faible profondeur sur une surface réduite.

### 4.3. Implantations des ouvrages sur le terrain

Le foreur s'assurera de la conformité de l'implantation du (des) forage (s) sur planait sur le terrain.

Ainsi, des distances minimales sont à respecter avec les arbres (5 mètres), les réseaux enterrés non hydrauliques (1,5 mètres), les fondations, puits, fosses septiques, évacuations (3 mètres).

La disposition des capteurs suivant une maille carrée est à proscrire (schéma ci-après) en raison des interférences thermiques entre forages. Par contre, une disposition des capteurs en ligne (ex. 1) est recommandée avec des variantes possibles : lignes parallèles avec intervalles décalés (ex. 2) ou lignes perpendiculaires (ex. 3).

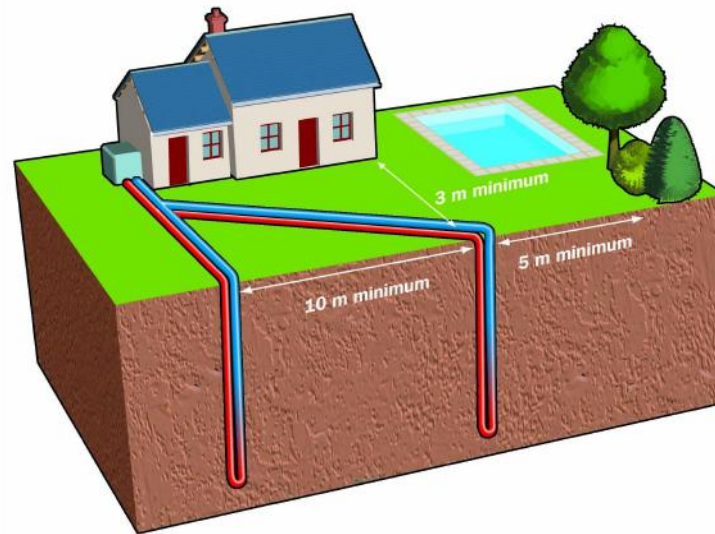


**Figure 10 :** Exemples d'implantation de sondes à promouvoir ou à proscrire.[26]

De même, il est recommandé que l'espacement minimal entre deux capteurs verticaux soit d'au moins 10 mètres. Les capteurs sont à implanter de manière à ce qu'ils ne s'influencent pas mutuellement et que le sol puisse se régénérer correctement.

En cas de présence d'aquifères au droit des forages, il est recommandé de tenir compte du sens d'écoulement des nappes pour leur implantation. Si le chauffage d'une piscine est

envisagé, le foreur s'assurera que les capteurs prévus ne sont pas également ceux destinés au chauffage de la maison.

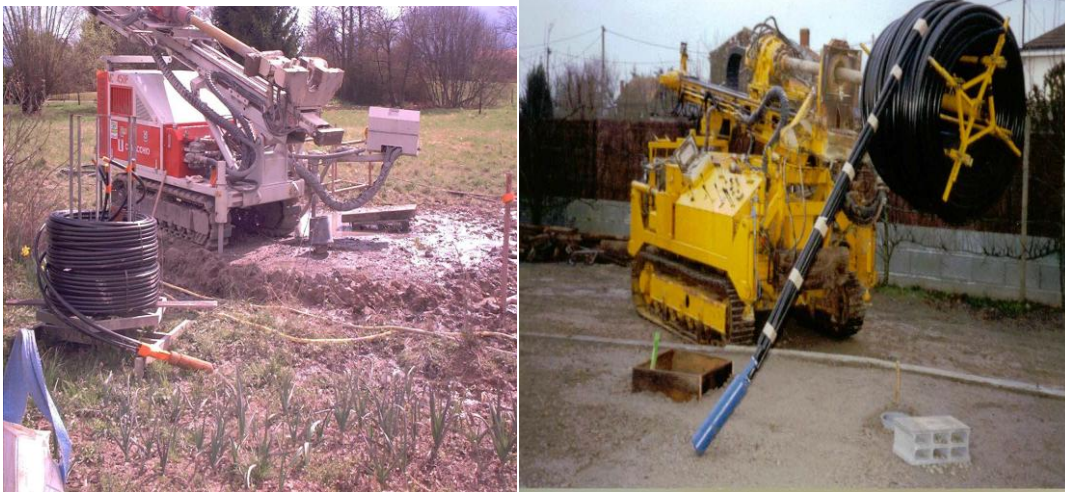


**Figure 11** :Exemple d'implantation de sondes et distances minimales à respecter par rapport à divers obstacles locaux (schéma BRGM).[26]

#### 4.4. Contrôles avant travaux

Le responsable des travaux de forage doit préalablement s'assurer des conditions suivantes:

- **conformité du dossier administratif** : ouverture de chantier, déclaration préalable pour les ouvrages de plus de 10 mètres de profondeur (code des mines) et levas échéant, une autorisation si les seuils de profondeur sont dépassés ;
- **réseaux enterrés existants** : câbles électriques, conduites d'eau ou de gaz... ;
- *dessertes* en eau et électricité et *accès au chantier*, notamment pour des camions de fort tonnage délivrant le ciment prêt à l'emploi ;
- **sécurité sur le chantier** : signalisation, moyens de prévention et matériels de secours, téléphone et liste téléphonique d'appels d'urgence ;
- **conformité des matériels** :
  - Matériels de forage adaptés aux terrains à traverser : marteau fond de trou, sondeuse rotary, battage, tubages à l'avancement, compresseur...
  - Matériels utilisés pour faciliter la mise en place des sondes : treuil, touret, lests...
  - Matériels utilisés pour le remplissage du forage : bac de mélange et pompe d'injection du ciment, tube d'injection du ciment,
  - Appareillage de test en pression



**Figure 12:** Machines de forage au marteau fond de trou et dévidoirs utilisés pour la mise en place de sondes : on préférera un dévidoir à axe horizontal (photo de bas) qui permet d'éviter l'endommagement de la sonde à l'embouchure du forage lorsqu'il est tubé avant remplissage

[26]

**- conformité des fournitures :**

- Tubes de polyéthylène haute densité (PEHD) livrés aux normes standard (diamètres DN 25, 32 ou 40) avec pression nominale de fonctionnement adaptée à la longueur du capteur, en bon état (sans pincement ni éraflures), avec bouchons aux extrémités. Un test en pression doit être fait à réception,
- Sable ou gravier siliceux, roulé, propre, calibré et homogène,
- Bentonite utilisée pour l'étanchéité du trou et en mélange avec le ciment,
- Ciment adapté aux terrains (résistant aux sulfates, par exemple),
- Antigel (mono-propylène glycol) dont le taux minimum (30 % environ pour une bonne stabilité du mélange antigel) doit être adapté aux conditions climatiques hivernales locales.



**Figure 13:** Exemple de sonde composée d'un tube en PEHD rendouble « U », Relié à sa base dans une chambre.[26]

Lors du forage, le foreur se conforme aux règles de l'art et adapte sa méthode aux conditions des terrains. Dans les terrains meubles et bouillants, il veille à éviter l'effondrement possible des parois du trou ; au besoin il utilise un tubage provisoire, qui doit impérativement être retiré lors de la cimentation et ce, afin de garantir l'étanchéité de l'ouvrage, la qualité du bouchon de ciment de tête et un meilleur échange thermique avec le terrain au contact de la sonde.

Le diamètre du trou est choisi en fonction de celui de la sonde à mettre en place (en moyenne de 150 à 180 mm). Les sondages réalisés en petit diamètre avec un faible annulaire rendent très difficile, voire impossible, une bonne cimentation. Le foreur doit donc respecter l'espace nécessaire à une bonne cimentation sans pour autant permettre à la sonde de se vriller lors de son installation.

## 5. Modélisation de la pompe à chaleur

La pompe à chaleur choisie pour notre étude est le modèle Aurea 2-30, proposé par la marque CIAT. Il s'agit du plus petit modèle de pompe à chaleur eau-eau proposé par ce constructeur. Cette pompe à chaleur est capable dans les conditions de fonctionnement les plus défavorables de fournir une puissance calorifique de 6,5 kW (Figure 9), elle sera donc capable de répondre aux besoins de chauffage de l'habitation, le besoin maximal de chauffage étant de 5371 W.

Les deux pompes de circulation de la pompe à chaleur (côté intérieur et extérieur) font partie de l'équipement standard. Elles imposent en fonctionnement nominal un débit  $V_{ch,i}$  de 1,35



m<sup>3</sup>/h sur l'échangeur intérieur (circuit d'émission) et Veche de 1,58 m<sup>3</sup>/h sur l'échangeur extérieur (circuit d'échange dans le sous-sol).

Le tableau constructeur donnant les différents points de fonctionnement de la pompe à chaleur est présenté en Figure14. Dans ce tableau, Pf, Pa et Pc sont respectivement les puissances frigorifique, absorbée compresseur et calorifique.

**PUISSANCES FRIGORIFIQUES ET CALORIFIQUES**

T° sortie eau froide en °C		T° Sortie eau chaude en °C																	
		30			35			40			45			50			55		
		Pf kW	Pa kW	Pc kW	Pf kW	Pa kW	Pc kW	Pf kW	Pa kW	Pc kW	Pf kW	Pa kW	Pc kW	Pf kW	Pa kW	Pc kW	Pf kW	Pa kW	Pc kW
Solution à 40% de Mono Propylène Glycol	-6	5.1	1.7	6.7	4.8	2.0	6.6	4.5	2.2	6.6	4.2	2.5	6.6	3.8	2.9	6.6	3.5	3.3	6.5
	-4	5.5	1.7	7.1	5.2	1.9	7.0	4.8	2.2	7.0	4.5	2.5	6.9	4.2	2.9	6.9	3.8	3.3	6.9
	-2	5.9	1.7	7.5	5.6	1.9	7.4	5.2	2.2	7.4	4.9	2.5	7.3	4.5	2.9	7.2	4.1	3.3	7.2
	0	6.4	1.7	8.0	6.0	1.9	7.9	5.6	2.2	7.8	5.3	2.5	7.7	4.9	2.9	7.6	4.5	3.3	7.5
	2	6.8	1.7	8.5	6.5	1.9	8.3	6.1	2.2	8.2	5.7	2.5	8.1	5.3	2.9	8.0	4.8	3.3	7.9
30H Eau de ville	5	8.0	1.6	9.6	7.5	1.9	9.4	7.0	2.2	9.1	6.5	2.5	9.0	6.1	2.9	8.8	5.6	3.2	8.6
	6	0.1	1.7	9.0	7.7	1.9	9.6	7.2	2.2	9.4	6.0	2.5	9.2	6.3	2.9	9.0	5.0	3.2	0.0
	7	8.4	1.7	10.1	8.0	1.9	9.8	7.5	2.2	9.6	7.0	2.5	9.4	6.5	2.9	9.2	6.0	3.2	9.1
	8	8.8	1.6	10.4	8.3	1.9	10.2	7.9	2.1	9.9	7.3	2.5	9.7	6.7	2.8	9.5	6.2	3.2	9.3
	10	9.3	1.7	11.0	8.8	1.9	10.7	8.3	2.2	10.4	7.8	2.5	10.2	7.2	2.8	9.9	6.7	3.2	9.7
	12	10.0	1.7	11.6	9.4	1.9	11.3	8.9	2.2	11.0	8.3	2.5	10.7	7.7	2.8	10.4	7.1	3.2	10.2
	15	11.0	1.7	12.6	10.4	1.9	12.3	9.8	2.2	11.9	9.2	2.5	11.6	8.6	2.8	11.3	7.9	3.2	11.0
	18	12.1	1.7	13.7	11.5	1.9	13.3	10.8	2.2	12.9	10.1	2.5	12.5	9.4	2.8	12.1	8.7	3.2	11.7
20	12.8	1.7	14.4	12.1	1.9	14.0	11.4	2.2	13.5	10.7	2.5	13.1	10.0	2.8	12.7	9.2	3.1	12.2	

Figure 14 : Points de fonctionnement de la pompe à chaleur Auréa 2-30 (données CIAT) [27]

Ces points de fonctionnement permettent d'établir un modèle simulant le fonctionnement de la pompe à chaleur. On en proposera suivant le niveau de précision souhaité pour la modélisation.

**1. Coefficient de Performance (COP) [28]**

Comme indiqué ci-dessus, la température du sous-sol augmente avec la profondeur selon un gradient géothermique presque linéaire qui dépend de l'histoire géologique et de la structure du sous-sol. Un gradient général de 30°C par km peut être utilisé généralement.

Les gradients géothermiques locaux et le flux thermique peuvent être déterminés à l'aide de mesures de température dans les forages.

$Q = k \cdot \Delta T$  où: Q: le flux thermique total en W.m<sup>-2</sup>

$k$ : la conductibilité thermique de la roche en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

$\Delta T$ : le gradient de température en  $\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$

La valeur moyenne est de  $0,055 \text{ W/m}^2$ . Lorsque l'on souhaite installer un système véritablement renouvelable, on doit donc tenir compte du fait que la puissance doit se situer entre  $50$  à  $100 \text{ kW/km}^2$ . La durée de vie d'un doublet géothermique est évaluée sur minimum  $30$  ans mais en réalité elle est souvent considérablement plus longue.

La production thermique ou la puissance thermique ( $W_{th}$ ) que l'on peut obtenir avec un doublet est donnée par:

$W_{th} = q \cdot \rho \cdot cv \cdot \Delta T$  où:  $W_{th}$ : puissance thermique (Watt ou  $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$ )

$q$ : débit ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ) Nous cherchons ici souvent des débits  $\geq 100 \text{ m}^3/\text{h}$  pour une bonne nappe aquifère.

$\rho$ : densité de l'eau ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )

$cv$ : capacité de chaleur de l'eau ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ )

$\Delta T$ :  $T(\text{production}) - T(\text{injection})$  en  $\text{°C}$

La durabilité de l'application, exprimée en COP (ou Coefficient of Performance), dépend du rapport de l'énergie entrante (puissance de la pompe) et de la puissance géothermique produite. On cherche donc à maximiser le rapport suivant.

$$COP = \frac{\text{Chaleur délivrée utile (MW}_{th})}{\text{électricité nécessaire (MWe)}}$$

Le COP dépend des éléments suivants:

- La différence entre la température de production et de retour de l'eau. Plus la différence est grande, plus le rendement de chaleur est important et plus le COP est élevé.
- Perméabilité de la roche: meilleures sont les propriétés d'écoulement, plus le débit est élevé et moins on requiert de puissance de pompe.

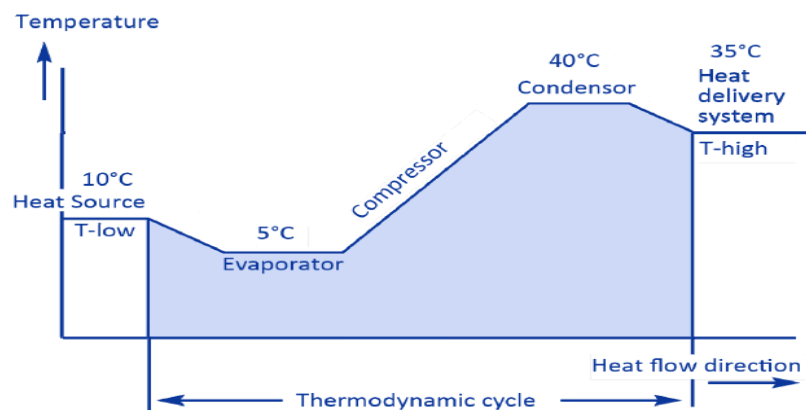
On donne une valeur indicative moyenne pour le COP de  $25$  à  $30$  pour un doublet de géothermie pour la fourniture de chaleur direct pour des logements (chauffage par le sol, température d'alimentation de  $70\text{°C}$ , température de retour de  $30\text{°C}$ ).

## 5.2. Principe de la pompe à chaleur

Une pompe à chaleur peut revaloriser la chaleur ambiante à relativement basse température (12°C) pour des applications à une température plus élevée (40°C) comme le chauffage des habitations ou l'eau sanitaire. La pompe extrait l'énergie thermique (chaleur) d'un support (source de chaleur) à une température relativement basse et libère cette énergie thermique à une température plus élevée dans un autre support (système d'émission de chaleur). Le transport de la chaleur est assuré par un liquide (fluide caloporteur). La quantité d'énergie dont l'appareil a besoin pour ce faire est faible par rapport au rendement. 60 à 80% de l'énergie fournie par la pompe à chaleur provient de l'environnement.

### 5.2.1. Le cycle thermodynamique

Un liquide adapté (fluide caloporteur) a un point d'ébullition à faible pression qui se situe sous la température de la source de chaleur, le liquide s'évapore donc et la chaleur est de cette manière extraite de la source (Figure. 15). En mettant la vapeur générée sous pression à l'aide d'un compresseur qui consomme de l'énergie externe, on augmente le point d'ébullition et la température et la vapeur condense (retour à l'état liquide). Ce faisant, de la chaleur est émise dans le système d'émission de chaleur. Pour revenir à la situation de départ, la pression doit être diminuée à l'aide d'une soupape d'expansion. Et le cycle peut recommencer.



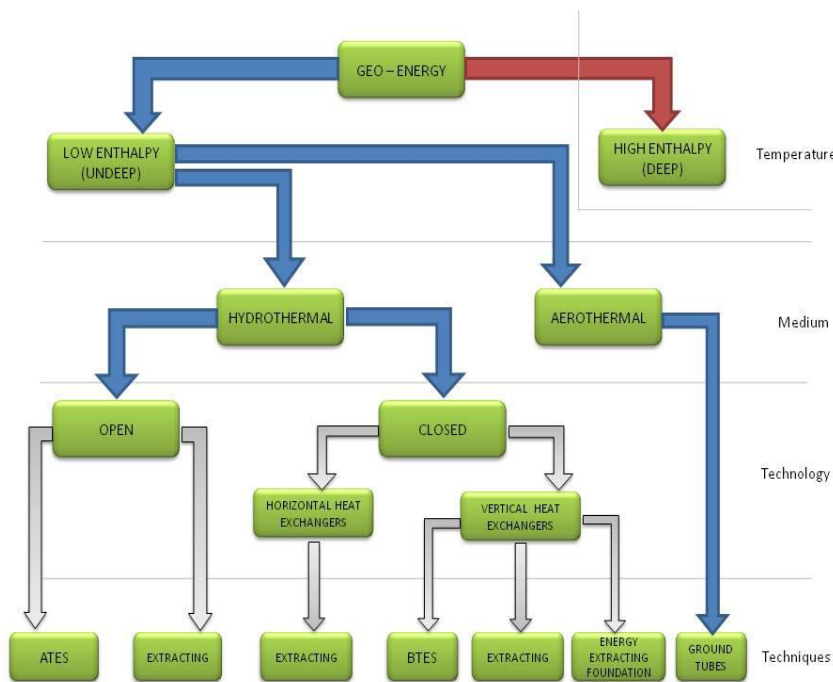
**Figure 15:** Le cycle thermodynamique [29]

### 5.2.2. Le gain

La consommation d'énergie du compresseur détermine de cette manière le gain de la pompe à chaleur. Une bonne pompe à chaleur peut, pour chaque kWh d'électricité que le compresseur consomme, générer de 3 à 6 kWh de chaleur utile et possède donc un COP de 3 à

6. Dans le cadre d'une comparaison des gains des différentes pompes à chaleur, il convient de toujours tenir compte de la température du condensateur et de l'évaporateur liée au gain indiqué.

Dans le cadre de l'application d'une pompe à chaleur, il convient de choisir la source de chaleur qui fournit gratuitement la chaleur. S'il s'agit d'une utilisation indirecte de la géothermie, on n'utilise ici que le sol et la nappe phréatique comme source de chaleur (Figure 11). Une distinction est établie entre les systèmes *ouverts* et les systèmes *fermés*. Une distinction doit encore être établie ensuite entre l'extraction d'énergie seule et la combinaison avec le stockage d'énergie.



**Figure 16:** Schéma des technologies géothermiques peu profondes disponibles.[29]

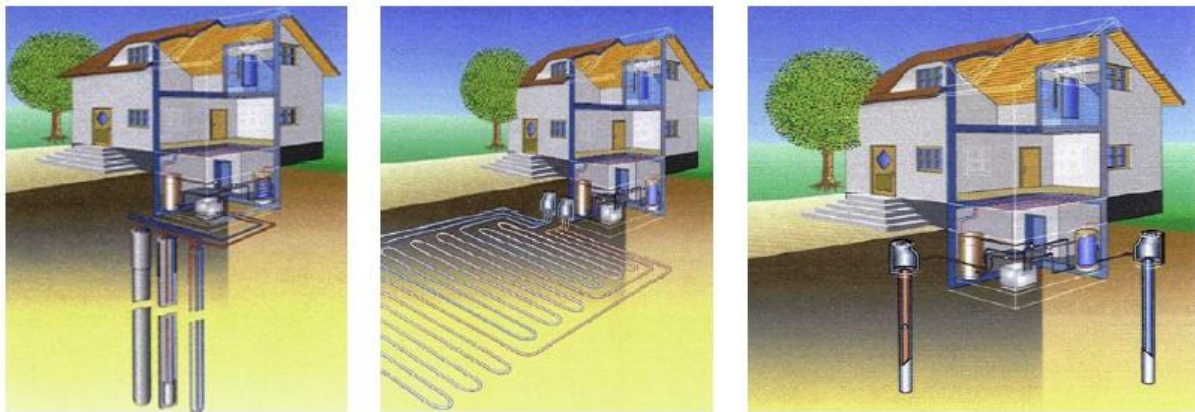
La température dans les premiers mètres sous le niveau du sol est encore soumise aux variations saisonnières. À partir d'une profondeur de 5 mètres, la température du sol est toutefois constante et s'élève dans notre climat modéré à 10°à 12 °C, elle continue ensuite d'augmenter au fur et à mesure que l'on descend, selon le gradient géothermique.

Un échangeur de chaleur (Figure12) se compose d'un système de tuyaux dans lequel coule un mélange d'eau et d'antigel ,généralement du glycol. Ce liquide est conduit dans l'évaporateur de la pompe à chaleur. Le dimensionnement correct de l'échangeur de chaleur

est donc capital (en ce qui concerne les caractéristiques techniques de la pompe à chaleur, le nombre d'heures d'utilisation, le type d'application, la géologie).

Un échangeur de chaleur vertical se compose de sondes acheminées dans le sol jusqu'à une profondeur entre 25 et 150m. La distance entre les différents forages se situe entre 5 et 10 mètres. Ce système n'occupe qu'une faible superficie au sol. Les différents forages sont reliés entre eux et liés à l'échangeur de chaleur principal de la pompe à chaleur.

Si l'installation est bien dimensionnée, la température du sol moyenne diminue de 10° à 12°C à proximité immédiate de la sonde à la fin de la saison de chauffe pas loin sous le point de congélation et se retrouve, au début de la saison de chauffe suivante, presque au niveau d'origine. L'évolution de la température peut être modélisée avec précision lors de la phase de conception du projet.



**Figure 17 :** Concept d'extraction de chaleur géothermique avec systèmes fermés (échangeurs de chaleur verticaux (A) et horizontaux (B) et un système ouvert (C)).[29]

Les échangeurs de chaleur horizontaux se composent d'un réseau de tuyaux à une profondeur de plus d'un mètre (hors gel). Si cela est possible, on place le réseau sous le niveau de la nappe phréatique. Le dimensionnement est réalisé principalement sur la base du coefficient de conduction thermique du sol qui est en grande partie déterminée par la teneur en argile et en humidité. Pour un logement moyen, un forage de 200 à 250 mètres suffit généralement. Selon la composition du sol et la puissance du compresseur de la pompe à chaleur, la surface au sol nécessaire pour un logement moyen se situera entre 200 et 500 m<sup>2</sup>.

Pour un usage ménager, l'extraction d'eaux souterraines, ayant une température de 10° à 12°C ne fera pas descendre la température de la nappe aquifère. Le COP de la pompe à chaleur sera également élevé et variera peu. Pour appliquer cette technique avec succès, on doit toutefois

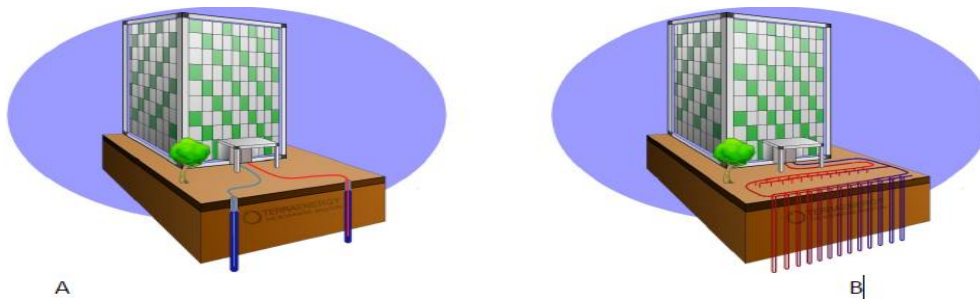
disposer d'une nappe aquifère suffisamment perméable. On pompe l'eau à partir d'un puits de production et on l'envoie dans la pompe à chaleur. L'eau est ensuite réinjectée dans la même nappe géologique via un puits d'injection. Pour les pompes à chaleur, la profondeur des forages se situe entre 20 et 100 m, selon la géologie. Chaque kW de puissance thermique livrée nécessite environ 0,2 à 0,3 m<sup>3</sup>/heure d'eau à 10°C.

Ce système ouvert connaît surtout une application dans les grands bâtiments, comme les complexes d'appartements, les entreprises ou les bâtiments publics où la demande de chaleur et de ventilation est suffisamment importante.

Une pompe à chaleur liée au sol permet de stocker dans le sous-sol la chaleur chargée durant les mois d'été pour la réutiliser en hiver. C'est le principe du stockage thermique saisonnier.

#### a. Système fermé: BTES

La technologie utilisée, BTES, est identique à l'échangeur de chaleur souterrain vertical dans les systèmes fermés comme indiqué ci-dessus. Mais outre l'extraction de chaleur, ce système permet également de stocker dans le sous-sol la chaleur extraite d'un bâtiment pendant l'été, ou par exemple récoltée via des panneaux solaires, pour ensuite la réutiliser pendant la saison de chauffe. Cette technologie est utilisée pour les grands bâtiments comme les bureaux, les serres, les écoles, les piscines, etc. Il se compose en général de tout un champ de forages reliés entre eux, parfois plus de 100 puits. BTES est la technologie géothermique présentant le moins de limites géologiques et qui est dès lors utilisable presque partout (à l'exception des zones d'extraction d'eau). En Algérie, elle peut être utilisée sur 99% du territoire. Le temps de retour surinvestissement est de 6 à 12 ans, sans tenir compte des subsides éventuels.



**Figure 18:** Concept du stockage géothermique saisonnier non profond: (A) système ouvert (ATES) et (B) système fermé (BTES).[29]

### **b. Système ouvert: ATES**

La technologie utilisée, ATES, est identique à l'échangeur de chaleur vertical dans les systèmes ouverts tels que décrits ci-dessus. Mais outre l'extraction de chaleur, ce système permet également de stocker la chaleur dans le sous-sol pour ensuite la réutiliser pendant la saison de chauffe. Le système se compose d'un ou plusieurs puits d'extraction et puits d'injection. ATES est la technologie géothermique présentant la plus grande efficacité énergétique. On a toutefois besoin d'une nappe aquifère à la profondeur souhaitée avec de

l'eau de bonne qualité. Le temps de retour est de 4 à 9 ans, sans tenir compte des subsides éventuels.

### **Partie III. Dimensionnement d'une sonde verticale**

Les concepteurs d'installation de pompes à chaleur géothermiques sont encore peu équipés pour dimensionner correctement les installations sur sondes verticales en tenant compte de la nature du sol, des conditions climatiques et des particularités thermiques du bâtiment. En général, le dimensionnement de sondes géothermiques s'effectue à l'aide de ratios proposés correspondant à la puissance thermique spécifique maximale extractible au sol en W/m. De tels ratios, modulés suivant divers critères tels que le type de sols rencontrés et le taux d'utilisation de la pompe à chaleur sont ainsi fournis par la directive allemande VDI 4640 [23] et la norme suisse SIA 384/6 [24], qui font office de documents de référence pour le dimensionnement des installations de sondes géothermiques verticales (SGV) de faible puissance. Pour les installations de champs de SGV de plus grande ampleur (à partir de 4 SGV selon la norme SIA ou une puissance maximale extractible de 30 kW selon la VDI), il est recommandé d'effectuer des simulations à pas de temps horaires et de dimensionner les SGV à l'aide de logiciels permettant de prendre en compte les interactions entre les différentes SGV. Les logiciels les plus courants utilisés pour dimensionner de telles installations sont les suivants : TRNSYS, EED, PILESIM, EWS.

Dans ce mémoire, nous proposons une feuille de calcul EXCEL permettant un dimensionnement précis et rapide de SGV uniques et un pré-dimensionnement de champs de SGV. Cet outil est intermédiaire entre des ratios de dimensionnement et des logiciels de dimensionnement spécifique et est ainsi facile d'utilisation tout en réalisant un dimensionnement précis de l'installation. La mise en œuvre de cette feuille de calcul est

illustrée au travers de 2 exemples : l'un pour une SGV unique en mode chauffage, l'autre pour un champ de SGV en mode rafraîchissement.

### Présentation de la méthode de dimensionnement

Kavanaugh et Rafferty [25] proposent une équation de dimensionnement de SGV, validée par l'ASHRAE et inscrite au ASHRAE Han book [26]. Cette équation a été restructurée par Bernier [23] et s'écrit alors sous la forme suivante :

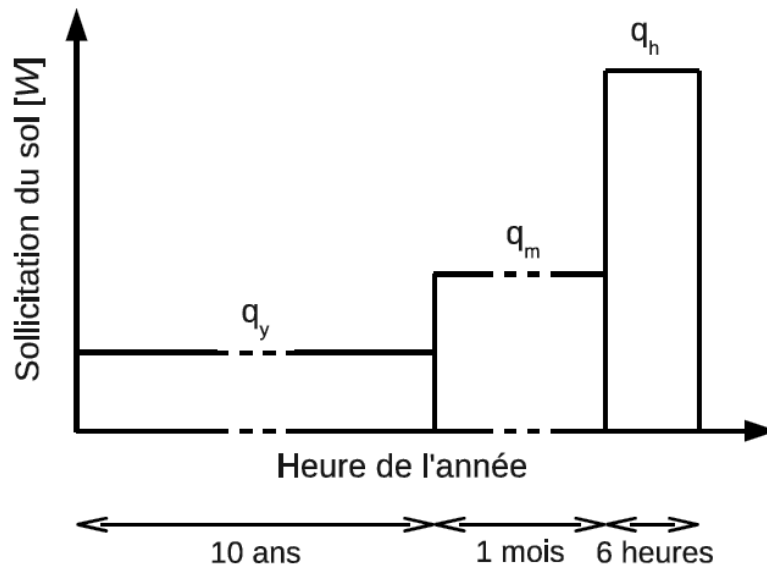
$$L = \frac{q_h R_b + q_y R_{10y} + q_m R_{1m} + q_h R_{6h}}{T_m - (T_g + T_p)} \quad (1)$$

$T_m$  est la température moyenne du fluide dans le forage,  $T_g$  la température du sol non perturbé (avant installation de PAC géothermique) et  $T_p$  une correction à cette température qui intervient dans le cas où on installe un champ de sondes, les unes influençant alors les autres ( $T_p = 0$  dans le cas d'une seule sonde).  $q_y$ ,  $q_m$  et  $q_h$  (en W) représentent respectivement, le prélèvement thermique au sol moyen annuel, le maximum des prélèvements mensuels et le prélèvement maximal horaire.  $R_{10y}$ ,  $R_{1m}$  et  $R_{6h}$  (en  $m.K/W$ ) sont des résistances thermiques du sol correspondant aux périodes de 10 ans, 1 mois et 6 heures. Ces valeurs se situent généralement entre 0.1 et 0.3  $m.K/W$ , les faibles valeurs étant associées aux sols à haute conductivité thermique. Enfin,  $R_b$  est la résistance thermique totale [ $m.K/W$ ] du puits (entre le fluide et le sol juste en contact). Cette valeur varie entre 0.05  $m.K/W$  (sonde à double U avec coulis à haute conductivité) et 0.2  $m.K/W$  (sonde à simple U avec coulis de bentonite standard).

L'équation 1 a été obtenue en supposant que les échanges dans le sol sont purement conductifs et en négligeant les transferts d'humidité.

Le dimensionnement est basé sur un scénario « extrême » en mode chauffage ou climatisation: une sollicitation moyenne annuelle  $q_y$  pendant 10 ans, une sollicitation d'un mois  $q_m$  correspondant au mois le plus froid (respectivement le plus chaud), 6 heures à la sollicitation  $q_h$  correspondant aux conditions du dimensionnement en chauffage (respectivement en rafraîchissement). Le schéma de la Figure 19 illustre ce scénario correspondant à la succession des 3 sollicitations du sol  $q_y$ ,  $q_m$  et  $q_h$ . Cette méthode présente ainsi l'avantage de prendre en compte de manière simplifiée l'historique de la sollicitation thermique du sol durant les 10 années précédant le point de dimensionnement. Le résultat du dimensionnement sera ainsi plus précis que celui proposé par les règles du SIA et de la VDI.





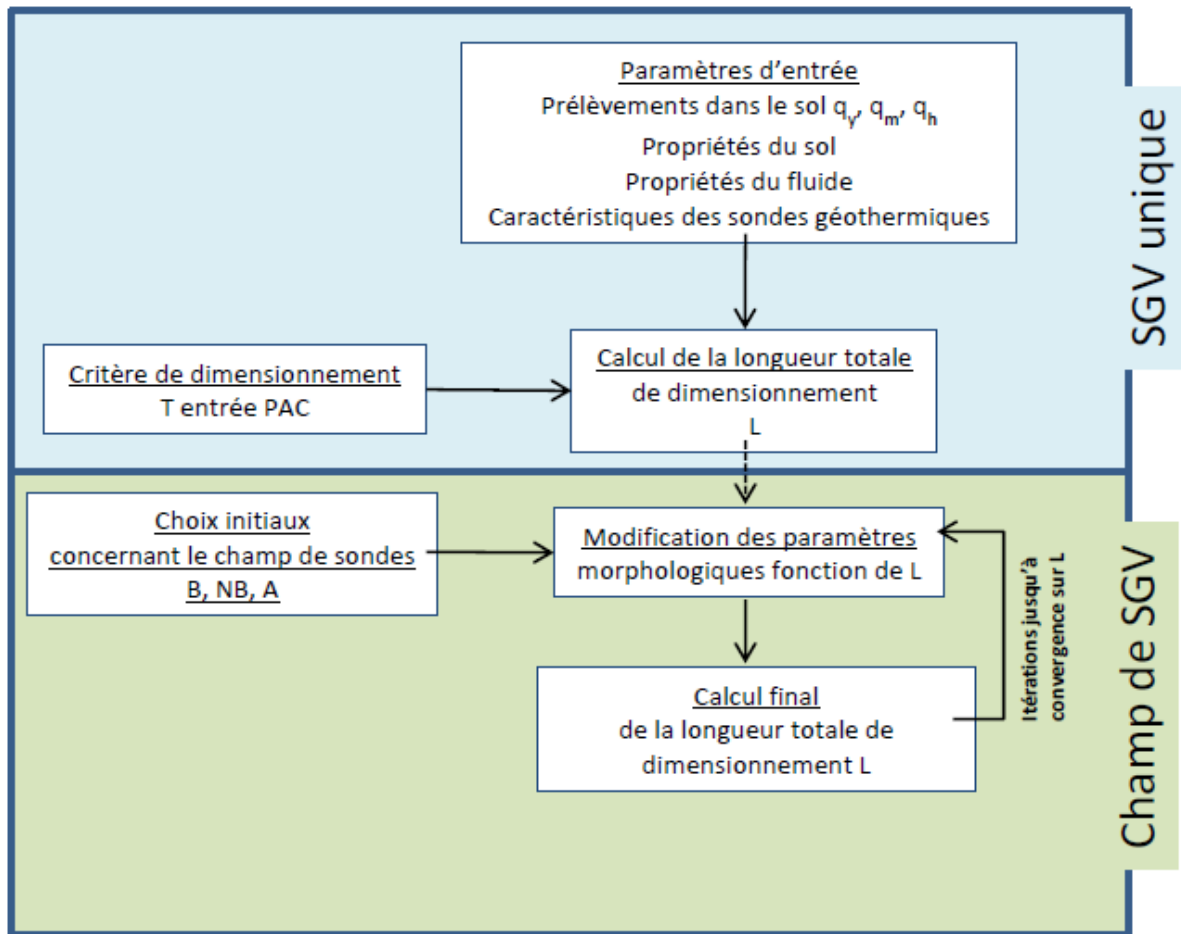
**Figure 19:** Scénario de dimensionnement suivant la méthode de l'ASHRAE [30]

### Outil d'application de la méthode de dimensionnement ASHRAE

Le calcul effectif par l'équation 1 nécessite un calcul complexe des résistances thermiques  $R_{10y}$ ,  $R_{1m}$  et  $R_{6h}$ .

Afin de faciliter la résolution pour le concepteur de l'installation, l'ensemble de ces calculs ont été entrés dans une feuille de calcul EXCEL. Cette feuille de calcul peut être utilisée soit en application "chauffage" (la plus courante), soit en application refroidissement (charges comptées négatives en cas de prélèvement de chaleur dans le sol).

Cette feuille de calcul permet le dimensionnement d'une SGV unique mais aussi d'un champ de SGV suite à une seconde étape tel qu'illustré en Figure 20.



**Figure 20:** Procédure de dimensionnement d'une SGV unique ou d'un champ de SGV en une seconde étape. [30]




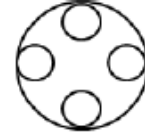
Afin d'illustrer l'utilisation de la feuille de calcul, deux cas d'exemple sont traités dans la feuille modèle de la Figure 20 l'un pour dimensionner une SGV unique en mode chauffage pour une maison individuelle, l'autre pour un champ de SGV pour un bâtiment tertiaire avec des besoins à la fois de chaud et de froid, le dimensionnement étant effectué pour le mode rafraîchissement (besoins de froid plus importants).

#### a. Cas de la SGV unique

Prenons le cas d'une maison individuelle qui a uniquement des besoins de chauffage. La PAC couvre les besoins nominaux du bâtiment et a une puissance de 5.3 kW ; compte tenu de son COP, elle prélève 4 kW au sol dans ses conditions nominales. Les prélèvements  $q_h$ ,  $q_m$  et  $q_v$  ont été pré calculés et sont respectivement de 4 kW (déjà connu), 2 kW et 0.5 kW. Pour les déterminer, on peut utiliser une simulation horaire ou les estimer par la méthode des heures équivalentes à puissance nominale. Dans cet exemple, on considère que durant le mois le plus chargé, la charge du bâtiment est la moitié de la charge nominale ce qui conduit à  $q_m = 2$  kW.

La charge moyenne annuelle est de 1/8 de la charge nominale soit  $q_y = 0.5 \text{ kW}$ . Le sol a des caractéristiques de granit ( $\lambda = 3.4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et  $a = 0.11 \text{ m}^2.\text{jour}^{-1}$ ) et a une température initiale de  $15^\circ\text{C}$ . Le fluide choisi dans cet exemple est de l'eau sans antigel, on veillera donc à ce que le fluide n'atteigne pas une température négative en entrée ou sortie de la pompe à chaleur. Le diamètre de forage est de 150 mm. La résistance thermique du forage  $R_b$  (convection interne, épaisseur du tube, coulis de remplissage) est supposée de  $0.199 \text{ m.K/W}$ , ce qui correspond à une valeur de  $R_b$  typique d'un forage simple U avec un espacement moyen entre les 2 tubes et un coulis de bentonite standard. A titre d'exemple, des valeurs de résistance  $R_b$  pour des configurations de SGV typiques dans des forages de diamètre 150 mm sont données en Tableau 1.

**Tableau 1:** Valeurs typiques de résistance thermique de forage  $R_b$  (forage de 150 mm de diamètre) [30]

Arrangement des tuyaux dans le forage				
Distance centre à centre des tuyaux [cm]	8.3	8.3	11.7	11.7
<i>Matériau de remplissage</i>	<i>Résistance thermique de forage <math>R_b</math> [m.K/W]</i>			
Coulis de bentonite standard	0.199	0.132	0.146	0.071
Coulis amélioré	0.098	0.061	0.088	0.042

Le critère de dimensionnement en mode chauffage porte sur la température minimum d'entrée à l'évaporateur de la pompe à chaleur après mise en régime du sol suivant le scénario défini en Figure 1. On choisit ici une température de  $15^\circ\text{C}$  afin d'éviter que le fluide ne ressorte de la pompe à chaleur à une température négative. Le calcul conduit à une longueur de SGV de **106.3 m**. A titre de comparaison, le ratio de dimensionnement proposé par la VDI 4640 pour ce dimensionnement (sol de type granit et faible taux d'utilisation à pleine charge de la pompe à chaleur) serait de **53 m** (ratio de  $75 \text{ W.m-1}$ ). Cet écart important s'explique essentiellement pour 2 raisons :

- 1) la VDI 4640 n'est pas adaptée aux SGV de type simple U et ne s'applique pas ici ;
- 2) le dimensionnement préconisé par la VDI 4640 prend en compte un fluide de type eau glycolée permettant un fonctionnement à des températures négatives, ce qui autorise une longueur de SGV plus courte que dans l'exemple présent.

Par ailleurs, il est intéressant de remarquer la sensibilité aux différents paramètres. Par exemple, si la température initiale du sol (non perturbé) est de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  au lieu de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la longueur augmente à  $178.3\text{ m}$  (68% de plus). Quant à l'influence de la résistance thermique du forage, si on choisit un matériau de remplissage de type « coulis amélioré » ( $R_b = 0.098\text{ m.K/W}$ ), cela conduit à une longueur de SGV de  $73.6\text{ m}$ , soit une diminution de 31%. La conductivité thermique a également une influence importante sur la longueur de SGV : un sol de faible conductivité thermique,  $1.3\text{ W.m-1.K-1}$ , implique une longueur de SGV nécessaire de  $174.1\text{ m}$  (64% de longueur en plus).

### b. Cas d'un champ de sondes

Dans un second exemple, les données sont issues d'une simulation dynamique d'un bâtiment de bureaux de  $5000\text{ m}^2$ . Le dimensionnement s'effectue également en rafraîchissement, les sollicitations thermiques du sol  $q_h$ ,  $q_m$  et  $q_y$  étant plus élevées en mode rafraîchissement. Les valeurs pour  $q_h$ ,  $q_m$  et  $q_y$  sont ainsi respectivement de  $191\text{ kW}$ ,  $29.4\text{ kW}$  et  $1.5\text{ kW}$ . Les valeurs caractéristiques du sol utilisées pour le calcul correspondent à celles d'un terrain argileux. Le fluide utilisé est un mélange eau - mono propylène-glycol à une teneur volumique de 30%. Le forage a un diamètre de  $160\text{ mm}$ . La résistance thermique du forage  $R_b$  est supposée connue égale à  $0.09\text{ m.K.W}^{-1}$  (obtenue par analyse d'un test de réponse thermique par exemple).

Dans un tel cas de pré-dimensionnement d'un champ de SGV, l'utilisation de la feuille de calcul nécessite une étape de calcul supplémentaire du fait de la pénalité  $T_p$  dans l'Equation 1. Cette valeur, qui traduit les interactions thermiques des différentes SGV du champ, dépend de la profondeur du forage qui est initialement inconnue. La procédure suivante en 2 étapes est alors proposée afin de calculer cette pénalité  $T_p$  et d'affiner le dimensionnement en conséquence :

1) On suppose une valeur de  $T_p = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  comme pour un forage unique. Ceci donne une première approximation de la longueur de sonde. Dans l'exemple présent, cette valeur initiale est de  $1752.9\text{ m}$ .

2) Sur la base de cette première approximation, on entre  $B$  la distance entre sondes,  $NB$  leur nombre et  $A$  le facteur de forme du champ de sondes (rapport de sa longueur sur sa largeur), la morphologie de champ de sondes prise en compte par la feuille de calcul étant à maille carrée. Selon les caractéristiques du sol, on peut choisir une solution plus ou moins compacte.

Dans le cas présent, nous choisissons  $B = 5 \text{ m}$ ,  $NB = 20$ ,  $A = 1.25$  (champ de  $5 \times 4$  sondes espacées de  $5 \text{ m}$ ). Après avoir renseigné ces variables, une seconde série de calculs est réalisée comprenant 5 itérations,  $T_p$  étant réévaluée à chaque itération en fonction de la longueur de sonde précédemment obtenue. Après ces itérations, le calcul converge vers une valeur de **1821.9 m** au total soit des forages de **91.1 m** de profondeur. La pénalité de température  $T_p$  vaut  $0.93^\circ\text{C}$  après 10 ans d'exploitation. Cette valeur assez basse est due au fait que l'interférence entre puits est faible dans ce cas car le bilan net des puissances échangées avec le sol en été et en hiver est presque équilibré dans cet exemple (valeur de  $q_y$  peu élevée).

A titre de comparaison, le dimensionnement du champ de SGV de cet exemple a été effectué avec les mêmes paramètres à l'aide du logiciel GEOEASE développé par M. Bernier et propriété d'EDF R&D. Le logiciel GEOEASE fait partie des logiciels de référence de dimensionnement de champs de SGV et a été validé par confrontation aux autres logiciels disponibles par Spitler et al. [29]. Le calcul effectué à l'aide de ce logiciel GEOEASE donne une longueur totale de **1833 m**, soit seulement une augmentation de  $0.6\%$  par rapport à la longueur totale de sonde donnée par la feuille de calcul EXCEL.

### Conclusion

Un outil de dimensionnement de type feuille de calcul EXCEL, basé sur la méthode de dimensionnement de SGV unique et champ de SGV recommandée en Algérie a été présenté. Deux exemples d'application ont permis d'illustrer sa mise en œuvre dans des cas complémentaires (dimensionnement en chauffage d'une SGV unique et en rafraîchissement d'un champ de SGV).

Cet outil est tout à fait adapté pour dimensionner avec une bonne précision des SGV uniques pour installations typiques de bâtiments résidentiels et permet de s'affranchir de ratios parfois inappropriés, voire de réaliser une étude de sensibilité aux incertitudes (nature du sol, besoins, COP de la pompe à chaleur). En revanche, pour un champ de SGV, cet outil ne permet pas d'effectuer un dimensionnement réel d'installations mais uniquement un pré-dimensionnement permettant une estimation rapide du coût de l'installation. Pour le dimensionnement final de l'installation, il conviendra d'utiliser des logiciels plus évolués permettant des simulations plus fines du fonctionnement des échangeurs géothermiques mais aussi des systèmes et du comportement thermique du bâtiment.

#### Partie IV. Exploitation industrielle de la géothermie

Une seule forme d'énergie géothermique permet de produire de l'électricité : la géothermie moyenne et haute température, à partir de 150 °C, qui permet la production d'électricité, soit directement à partir de gisements de vapeur ou d'eau chaude (centrale de Bouillante en Guadeloupe) ou après injection d'eau en profondeur et récupération de chaleur (dispositif expérimental de Soultz-Sous-Forêts en Alsace)[31]. Les autres formes de géothermie, qui exploitent des températures plus basses, sont exploitées exclusivement pour le chauffage seul ou en association avec la climatisation.

Le développement d'installations géothermiques industrielles nécessite d'abord d'identifier les zones favorables dans lesquelles les phénomènes magmatiques récents produisent des anomalies de flux entraînant la formation de réservoirs superficiels d'eau chaude pressurisée ou de vapeur. Un gisement de géothermie est mis en évidence par des travaux d'exploration, qui visent (sur la base d'études géologiques, géochimiques et géophysiques de terrain) à identifier la source de chaleur magmatique, le réservoir et la couverture.

La géologie permet de déterminer la présence d'une source de chaleur magmatique à partir de l'étude des matériaux volcaniques émis en surface (en fonction de leur âge et de leur composition), de délimiter le gisement et de déterminer les caractéristiques du réservoir (fracturation, formations perméables...) ; l'hydrogéologie et la géochimie des eaux permettent de tracer les circuits d'alimentation et de fuites et de calculer les températures des réservoirs et la composition des fluides profonds.

Diverses méthodes géophysiques (gravimétrie électrique, magnétotellurique, écoute sismique...) permettent de cartographier le gisement profond et notamment de délimiter les réservoirs.

Dans les zones rurales à faible densité de demande, il est possible de procéder au captage de sources d'eau chaude ou de vapeur qui jaillissent spontanément, et de produire de l'électricité au moyen de petites centrales thermodynamiques à fluide binaires (de quelques dizaines à quelques centaines de KWe).

Mais en général, les exploitations géothermiques industrielles (avec des unités de l'ordre du MW) nécessitent de procéder par forage permettant de faire remonter le fluide à la surface avec une température et un débit suffisants. La faisabilité du projet ne peut alors être engagée

qu'après une campagne de forages de reconnaissances permettant d'évaluer les caractéristiques techniques et l'économie du projet. Au stade de la réalisation industrielle, on produit par forages (à une profondeur de 1000 à 3000 mètres) un mélange eau-vapeur (à une température de 150 à 300°C et une pression de quelques bars), dont on sépare la vapeur, ou de la vapeur sèche, qui déchargée dans des turbines, permet de produire de l'électricité à un coût extrêmement compétitif.

La réinjection de l'eau géothermale est indispensable pour protéger l'environnement et aussi pour garantir la pérennité de la ressource. Afin de ne pas refroidir le réservoir, les puits d'exploitation et de réinjection doivent se trouver à une certaine distance les uns des autres, ce qui impose souvent la création de plusieurs plates-formes de forages. Pour éviter les nuisances provoquées par ces différents chantiers, notamment en milieu urbain, ou encore lorsque le terrain manque, ou encore pour des raisons géologiques (pour mieux recouper des failles verticales productrices de vapeur) on peut installer des puits dont la trajectoire dévie dans le sous-sol (puits déviés). Une seule plate-forme de forage permet alors de positionner plusieurs puits de production.

Dans les exploitations de ce type, l'eau se vaporise dans le forage, et un mélange eau - vapeur jaillit en surface. Il arrive même – comme à Larderello en Italie ou aux Geysers en Californie - que le gisement produise naturellement de la vapeur sèche. L'exploitant doit alors réguler la pression en tête de puits pour optimiser les conditions d'exploitation en fonction des caractéristiques du fluide ou de la centrale. La vapeur obtenue est transportée par tuyaux isolés jusqu'à la centrale où elle est utilisée pour actionner une turbine couplée à un alternateur pour produire de l'électricité. On utilise dans la majorité des cas des unités de production à cycle direct où la vapeur actionne une turbine à échappement atmosphérique (cas le plus simple). Mais on peut choisir d'installer une turbine à condenseur (on crée alors un vide à l'échappement de la turbine), comme à Bouillante (Guadeloupe).

Le développement du gisement peut être modulaire (par ajouts successifs d'unités de 10 à 50 MW), ce qui permet d'étaler les investissements et représente un avantage dans les pays en développement.

Alors que l'Italie a été le pays pionnier, suivi de la Nouvelle Zélande et des Etats-Unis, l'Islande, les Philippines, l'Indonésie et le Kenya connaissent ces dernières années le développement le plus rapide. Pour la France, une centrale de 5 MW a été mise en production

en 1983 à Bouillante. A Guadeloupe ; une seconde unité de 10 MW a été mise en service en 2005, et une extension du gisement a été identifiée par le BRGM qui est propice à des développements ultérieurs encore attendus.

A côté de la géothermie haute énergie classique, où la vapeur est produite naturellement à la bonne température pour être envoyée en turbine, deux types d'exploitations peuvent être envisagés, dans des conditions économiques moins favorables mais néanmoins compétitives.

La géothermie de moyenne température ou moyenne enthalpie se présente sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à une température comprise entre 90 et 150°C. Ce type de gisement peut se développer à une profondeur inférieure à 1000 m dans les zones volcaniques ou encore dans des zones à gradient normal dans les bassins sédimentaires, à des profondeurs allant de 2 000 à 4 000 mètres. Pour produire de l'électricité, une technologie nécessitant l'utilisation d'un fluide intermédiaire à bas point d'ébullition (centrale à « fluide binaire », Fig.1) est nécessaire.

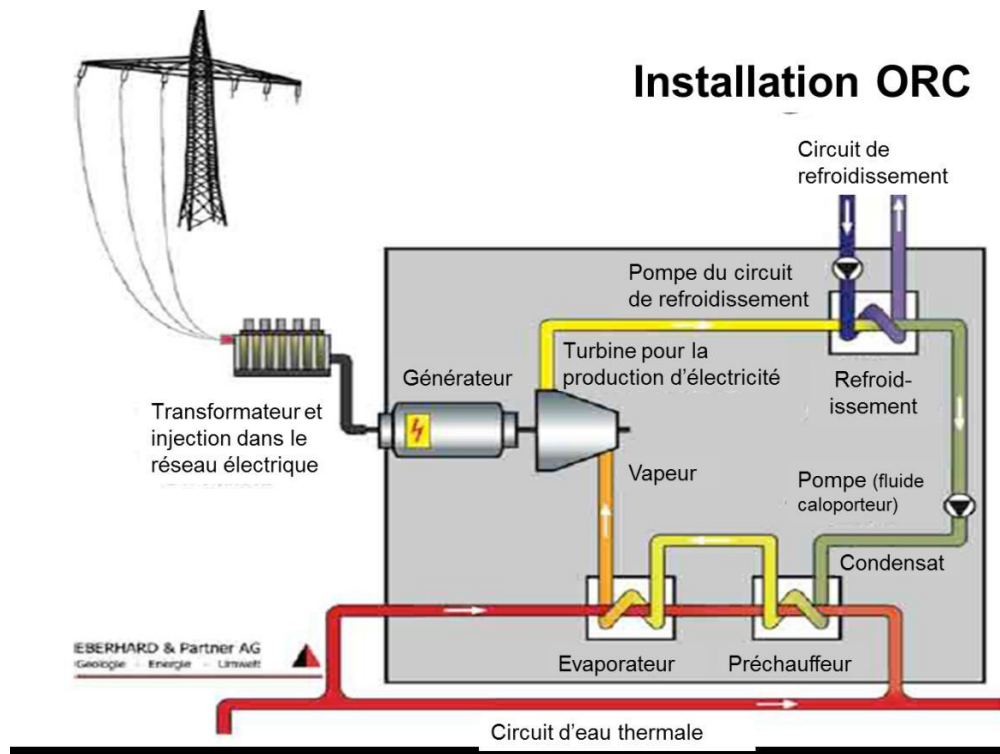
On distingue :

- des unités à cycle binaire où la vapeur turbinée est celle d'un fluide dit "de travail" qui est vaporisé par échange thermique avec le fluide géothermal (cycle de Rankine ou cycle de Kalina) ;
- des unités à cycle combiné qui associent divers types de dispositifs.

#### **4.1. Description du procédé binaire**

Le procédé de récupération de l'énergie dépend de la température de l'eau captée. La production d'électricité devient énergétiquement et économiquement pertinente lorsque la température de l'eau atteint les 100 à 120°C. La chaleur de l'eau souterraine est alors transférée à un fluide caloporteur présentant un point d'ébullition plus bas, afin de former de la vapeur qui est ensuite détendue dans une turbine. Ce procédé est appelé « cycle binaire ». Les installations fonctionnant sur la base d'un cycle organique de Rankine (ORC), c'est-à-dire utilisant un fluide organique comme le butane ou le propane, sont relativement répandues (figure 21). Le choix du fluide dépend de la température de l'eau captée; le taux d'efficacité électrique se situe entre 10 et 15%.

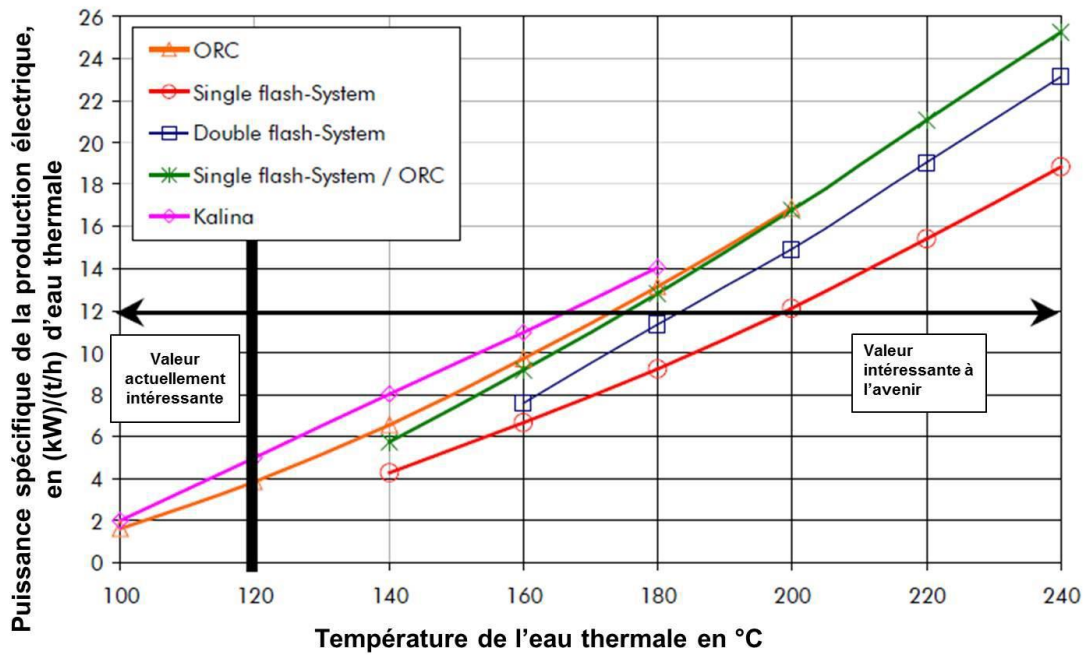




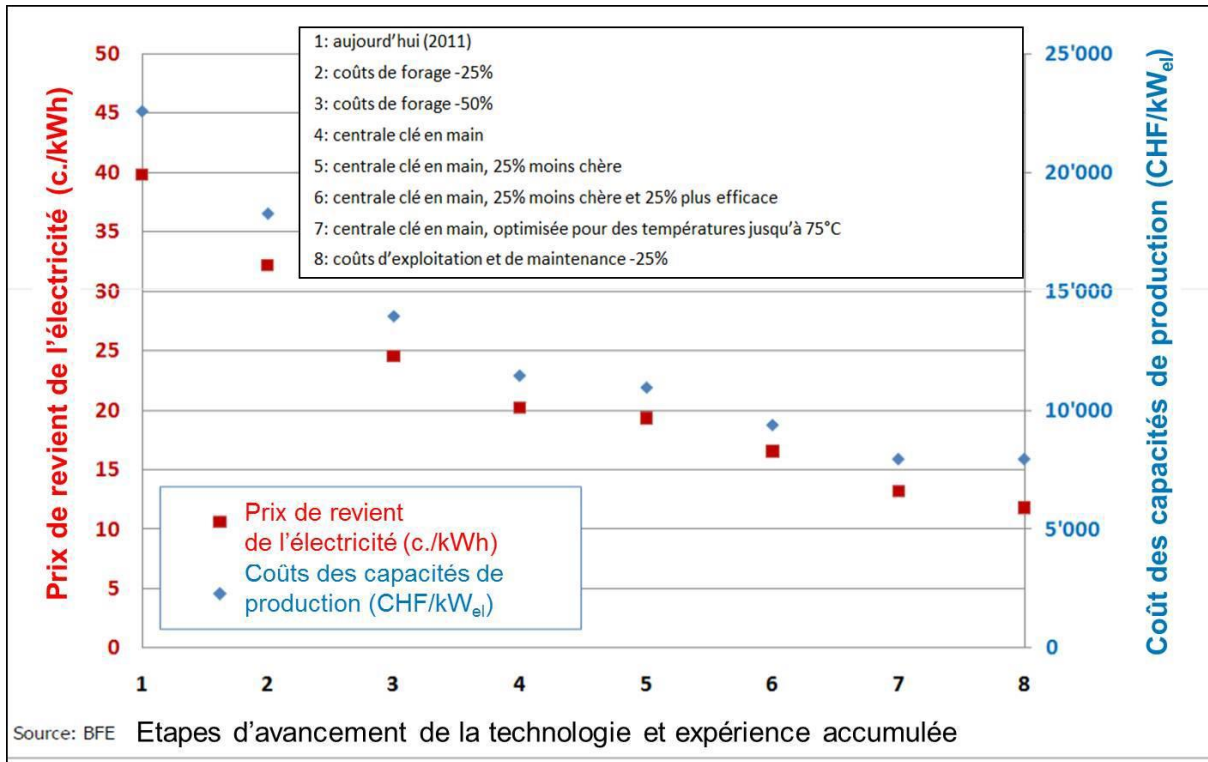
**Figure 21** : Schéma de fonctionnement d'une installation ORC (cycle organique de Rankine) utilisant une eau captée dont la température est comprise entre 100 et 160°C.[32]

Il est également possible d'utiliser une installation fonctionnant sur le principe d'un cycle de Kalina, dans lequel le fluide de travail est un mélange d'eau et d'ammoniaque. Ce dernier présente l'avantage de permettre l'exploitation d'une plus large fourchette de températures dans une installation. Si les installations de type Kalina, plus adaptables, ont tendance à atteindre des taux d'efficacité plus élevés que les installations ORC, le niveau de maturité technique semble pour le moment encore inférieur.

Auparavant, la technique généralement utilisée pour des températures d'eau supérieures à 180°C reposait sur le principe de vapeur de détente (système «flash»). Cette méthode consiste à détendre l'eau très chaude à la surface, en diminuant brusquement la pression pour provoquer sa vaporisation. La vapeur est ensuite directement utilisée pour entraîner une turbine. Avec ses récents progrès, la technologie ORC paraît aujourd'hui plus avantageuse jusqu'à des températures de 200°C (illustration 22). Au-delà, la combinaison des cycles «flash» et ORC semble la solution la plus prometteuse.



**Figure 22** Comparatif des performances de production d'électricité en fonction de la température de l'eau captée et de la puissance électrique qu'il est possible de générer. A des températures supérieures à 200°C, une installation hybride (flash/ORC) offre le meilleur rendement [32].



**Figure 23** Evolution prévue des coûts d'investissement et de revient des centrales géothermiques en fonction du niveau de développement technologique.[32]

Les données recueillies dans les différents projets et les prévisions établies en Allemagne sont relativement proches des futurs coûts suisses. Le montant actuel de l'investissement pour un projet hydrothermal en Allemagne est évalué à environ 12 400 euros par kW, avec une diminution linéaire des coûts à 7300 euros environ par kW en 2050. Les coûts d'exploitation fixes sont estimés à 3,5% des coûts d'investissement. Pour 6000 heures de pleine charge, on aboutit ainsi à un coût de revient de 0,28 euro par kWh. D'ici 2050, on peut tabler sur 6600 heures de pleine charge et un coût de revient d'environ 0,10 euro par kWh.

Le prix de revient de la production d'électricité en Suisse a été calculé avec un taux d'intérêt de 5% et 10%, et une durée de vie de 20 ans. Les résultats figurent dans le tableau 3 ci-dessous. On estime également qu'une partie de la chaleur produite par les futures installations pourra être vendue, et que les nouvelles installations seront si possible exploitées toute l'année.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

La production de l'énergie utilisant les ressources de basse énergie présentes sur plusieurs sites dans le monde, est la principale voie de développement de la géothermie. On peut l'exploiter dans les pompes à chaleur pour l'habitat individuel, le chauffage et climatisation de bâtiments, mini réseaux de chaleur (piscines, serres, applications industrielles), ou grands réseaux de chaleur urbains.

Pour la production électrique, la géothermie profonde à haute énergie a un potentiel énorme. La géothermie pourrait avoir un rôle à jouer dans le captage et le stockage du CO<sub>2</sub>. Des recherches sont menées afin de créer des dispositifs permettant la réinjection du CO<sub>2</sub> dans le sous-sol (aquifères profonds des bassins sédimentaires), en même temps que l'extraction de l'eau chaude géothermale.

Les installations géothermiques décrites dans ce mémoire se prêtent à une exploitation décentralisée (environ 5 MWe). Elles peuvent donc être placées à l'intérieur ou à proximité de zones urbaines, ce qui joue un rôle majeur pour une utilisation efficace de la chaleur. Sur les sites où les conditions géologiques sont réunies, il devrait également être possible à l'avenir d'augmenter la capacité des centrales: plusieurs forages percés dans différentes directions pourraient être exploités sur un même site.

Un outil de dimensionnement de type feuille de calcul EXCEL, basé sur la méthode de dimensionnement de SGV unique et champ de SGV recommandée en Algérie a été présenté. Deux exemples d'application ont permis d'illustrer sa mise en œuvre dans des cas complémentaires (dimensionnement en chauffage d'une SGV unique et en rafraîchissement d'un champ de SGV).

Cet outil est tout à fait adapté pour dimensionner avec une bonne précision des SGV uniques pour installations typiques de bâtiments résidentiels et permet de s'affranchir de ratios parfois inappropriés, voire de réaliser une étude de

sensibilité aux incertitudes (nature du sol, besoins, COP de la pompe à chaleur). En revanche, pour un champ de SGV, cet outil ne permet pas d'effectuer un dimensionnement réel d'installations mais uniquement un pré-dimensionnement permettant une estimation rapide du coût de l'installation. Pour le dimensionnement final de l'installation, il conviendra d'utiliser des logiciels plus évolués permettant des simulations plus fines du fonctionnement des échangeurs géothermiques mais aussi des systèmes et du comportement thermique du bâtiment.

## Bibliographiques

- [1] Bertani R.: World geothermal generation 2001\_2005:state of the art. Proc. World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24\_29 April 2005
- [2] Dickson M. H. & Fanelli M. (eds.): Geothermal energy:utilization and technology. UNESCO Publ., Paris, 205 pp, 2003
- [3] Haering M.: Deep Heat Mining: development of a cogeneration power plant from an enhanced geothermal system in Basel, Switzerland. IGA News\_letter, 58: 4\_6, 2004
- [4] Lemale J. & Jaudin F.: La géothermie, une énergie d'avenir. Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies Ile\_de\_France (ARENE), 1998
- [5] Planète-énergies. [En ligne]. [Consulté le 15 Mai 2009]. Disponiblesur: <http://www.planete-energies.com/contenu/energie/consommation.html>
- [6] Energies nouvelles. [En ligne]. [Consulté le 15 Mai 2009]. Disponiblesur: [www.energiesnouvelles.free.fr/Sources/fossile\\_fissile/nucleaire.html](http://www.energiesnouvelles.free.fr/Sources/fossile_fissile/nucleaire.html).
- [7] Energies nouvelles. [En ligne]. [Consulté le 15 Mai 2009]. Disponiblesur: [http://www.energiesnouvelles.free.fr/Sources/fossile\\_fissile/charbon.html](http://www.energiesnouvelles.free.fr/Sources/fossile_fissile/charbon.html).
- [8] Energies nouvelles. [En ligne]. [Consulté le 15 Mai 2009]. Disponiblesur: [http://www.energiesnouvelles.free.fr/Sources/fossile\\_fissile/gaz\\_naturel.html](http://www.energiesnouvelles.free.fr/Sources/fossile_fissile/gaz_naturel.html)
- [9] L. Abassi, F. Gaglian, A. Manero, J. Rodriguez, M. Sheeran, Projet de deuxième année, Ecole Nationale des ponts et chaussées (2005).
- [10] Environnement Doctissimo. [En ligne]. [Consulté le 15 Mai 2009]. Disponiblesur: [http://environnement.doctissimo.fr/economiser-l-energie/energies\\_renouvelables\\_solaire\\_solution-d-avenir-.html](http://environnement.doctissimo.fr/economiser-l-energie/energies_renouvelables_solaire_solution-d-avenir-.html).
- [11] Centrale géothermique de Nesjavellir en Islande
- [12] Centre d'Information sur l'Energie et l'Environnement, 2005: Les énergies renouvelables, la géothermie. Rapport d'activité 2005. [www.ciel.org](http://www.ciel.org)
- [13] Garneau M. et Fauteux M., 2006 : Geysers et sources thermales.
- [14] Christopher, H., Armstead, H., 1978 : La Géothermie, Exploration - Forage Exploitation. Edition du Moniteur - Paris.
- [15] BRGM, 1978 : La géothermie en France.
- [16] L'encyclopédie Wikipedia, 2006 : Géothermie, retrouvé sur le site [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- [17] Centre d'information sur l'Energie et l'Environnement, 2005 : Les énergies renouvelables, la géothermie. Rapport d'activité 2005.
- [18] BRGM, 1978 : La géothermie en France
- [19] Jay F.K., Richard G.B., Ken F., Dennis G. Elliot Z., 1979: Reservoir development and management .revue Geothermal Resources Council - special report N° 7, pp 3-1,3-36.

[20] **Centre d'Information sur l'Energie et l'Environnement, 2005**: Les énergies renouvelables, la géothermie. Rapport d'activité 2005. [www.ciel.org](http://www.ciel.org)

[21] **EurObserv'ER, août 2003)**

[22] **(Kedaid et al, 1988) ; (Rezig, 1992) ; (Rezig, 1991)**

[23] **VDI Gesellschaft (Verein Deutscher Ingenieure)** : VDI 4640 – Blatt 2, « Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen ». September 2001.

[24] **SIA (Société suisse des ingénieurs et des architectes)** : Norme SN 546384/6 :2010, «Sondes géothermiques ». Janvier 2010.

[25] **S. P. Kavanaugh, K. Rafferty** : “Ground Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings”, Chap. 3, ASHRAE, Atlanta, 1997.

[26] **ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)**: “ASHRAE Handbook – HVAC Applications”, Chap. 32, 2007.

[27] **M. Bernier**: “Closed-loop ground-coupled heat pump systems”. ASHRAE Journal 48(9):12-19, 2006.

[28] **M. Philippe, M. Bernier, D. Marchio**: “Sizing Calculation Spreadsheet – Vertical Geothermal Borefields”. ASHRAE Journal 52(7):20-28, 2010.

[29] **J.D. Spitler, J.R. Cullin, M. Bernier, M. Kummert, P. Cui, X. Liu, E. Lee, D.E. Fisher**: “Preliminary intermodel comparison of ground heat exchanger simulation models”. Effstock Conference, 2009.

[30] **M. Bernier** : Ground-coupled heat pump system simulation. ASHRAE Transactions, 107(1): 605\_616, 2001.

[31] **M. Bernier** : Closed-loop ground-coupled heat pump systems. ASHRAE Journal, 48(9):12\_19,2006.

[32] **Michel Bernier, Patrice Pinel, Richard Labib et Raphaël Paillot** : A multiple load aggregation algorithm for annual hourly simulations of GCHP systems. HVAC&R Research,10(4):471\_487, 2004.



## Résumé

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. C'est donc une énergie fiable et stable dans le temps. Dans ce travail, nous avons traité tous les aspects majeurs de la technologie géothermique à usage domestique. Nous avons aussi discuté le dimensionnement des installations et estimé le coût obtenu avec ces installations qui reste compétitif.

## Summary

Geothermal energy is certainly the energy that presents the largest spectrum of activities: heat production, electricity generation, heat production network, individual heat production. Compared to other renewable energy sources, geothermal energy has the advantage of not depending on atmospheric conditions (sun, rain, wind) or even the availability of a substrate. It is a reliable and stable energy over time. In this work, we treated all major aspects of geothermal technology for domestic use. We also discussed the design of and estimated the cost obtained with these installations which remains competitive.

## ملخص

الطاقة الحرارية الأرضية هي بالتأكيد الطاقة التي تقدم أكبر طيف من الأنشطة: إنتاج الحرارة وتوليد الكهرباء وشبكة إنتاج الحرارة، وإنتاج الحرارة الفردية. بالمقارنة مع غيرها من مصادر الطاقة المتجددة، الطاقة الحرارية الأرضية الاستفادة منها لا يتوقف على الظروف الجوية (الشمس والمطر والرياح) أو حتى توفر الركيزة بل هو طاقة موثوقة ومستقرة على مر الزمن. في هذا العمل، كنا نعالج جميع الجوانب الرئيسية لتكنولوجيا الطاقة الحرارية الأرضية للاستخدام المنزلي. كما ناقشنا تصميم وتقدير تكلفة الحصول على هذه المنشآت التي لا تزال قادرة على المنافسة.