



➤ **GÉOTHERMIE**

➤ **DELIVERABLE 12:  
GUIDE POUR LES INDUSTRIELS**

With the support of:

**Intelligent Energy**  **Europe**

January 2008

**Direction Ile-de-France**  
205, avenue Georges Clemenceau  
92024 NANTERRE Cedex  
Tél. 01 70 92 32 00 – Fax 01 70 92 32 07  
[www.saunier-associes.com](http://www.saunier-associes.com)

 **SAUNIER  
& ASSOCIÉS**

# Index

<b>Index</b> .....	<b>2</b>
<b>1. Introduction</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Détermination des besoins pouvant être couverts par la géothermie</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1. Généralités sur les niveaux de température</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2. Couverture des besoins de chauffage / climatisation de bâtiments</b> .....	<b>6</b>
2.2.1 Bâtiments existants .....	6
2.2.2 Bâtiments futurs.....	6
<b>2.3. Intégration de la géothermie à un procédé industriel</b> .....	<b>8</b>
2.3.1 Stockage de chaleur perdue .....	8
2.3.2 Alimentation en chaleur ou en froid d'un procédé industriel .....	8
2.3.3 Alimentation en froid.....	8
<b>2.4. Bilan</b> .....	<b>8</b>
<b>3. Choix d'une solution technique</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1. Les différents types d'applications géothermales</b> .....	<b>10</b>
3.1.1 Stockages sur aquifère (ATES) .....	10
3.1.2 Sondes verticales (BTES) .....	13
<b>3.2. Dimensionnement</b> .....	<b>13</b>
<b>3.3. Bilan</b> .....	<b>13</b>
<b>4. Evaluation du temps de retour</b> .....	<b>14</b>
<b>4.1. Coût d'investissement</b> .....	<b>14</b>
4.1.1 Géothermie sur nappe .....	14
4.1.2 Géothermie sur sondes.....	15
4.1.3 Coût des pompes à chaleur .....	15
4.1.4 Subventions .....	15
<b>4.2. Coûts d'exploitation</b> .....	<b>15</b>
4.2.1 Solution conventionnelle .....	15
4.2.2 Solution géothermique.....	15
<b>4.3. Estimation du temps de retour sur investissement</b> .....	<b>16</b>
<b>4.4. Considérations environnementales</b> .....	<b>16</b>
<b>5. Conclusions</b> .....	<b>17</b>

## 1. INTRODUCTION

---

L'objectif de ce document est d'apporter aux décisionnaires industriels des outils leur permettant d'appréhender l'intérêt de la géothermie pour leurs applications.

Ce travail s'appuie sur les résultats des études de faisabilité menées sur trois sites industriels (WP3 et WP4) :

- un supermarché standard en Allemagne
- une fonderie en Suède
- un centre commercial en France

Ainsi, même si ce guide se veut général, il s'appliquera préférentiellement à des activités industrielles similaires.

Cette grille d'analyse va permettre aux partenaires du projet de tester la pertinence des applications géothermiques dans leur pays en intégrant des conditions climatiques spécifiques et les caractéristiques de leur tissu industriel.

Ce support permet d'effectuer une première approche d'un projet. Il se veut essentiellement un outil de sensibilisation. Il ne permet pas de valider ou d'invalider définitivement un projet de géothermie.

## **2. DETERMINATION DES BESOINS POUVANT ETRE COUVERTS PAR LA GEOTHERMIE**

---

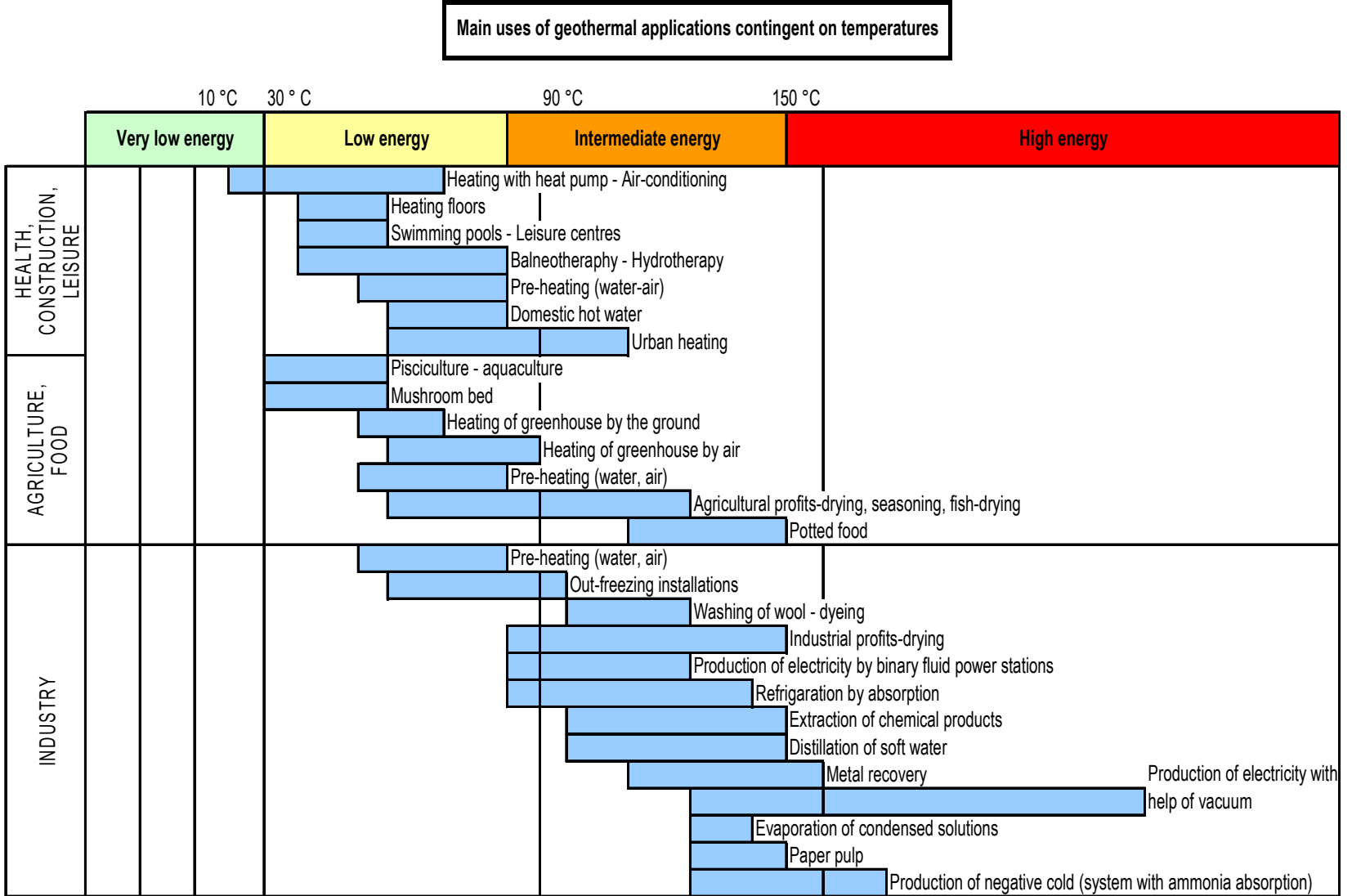
### **2.1. GENERALITES SUR LES NIVEAUX DE TEMPERATURE**

D'une manière générale, la géothermie est limitée en termes de niveaux de température auxquels elle peut délivrer de l'énergie : soit par la température de l'aquifère directement exploité, soit par la température en sortie de pompe à chaleur.

Cette limitation a une incidence quelle que soit l'application : pour le chauffage de bâtiment, les émetteurs de chaleur doivent pouvoir travailler à des températures relativement basses ; pour alimenter un procédé industriel, ce dernier doit nécessairement être consommateur d'énergie à des températures également relativement basses.

**Le premier travail consiste donc à sélectionner les applications qui pourront fonctionner à basse température (inférieure à 70°C).**

Figure 1 - Niveaux de température requis pour différents process industriels (d'après D7 - France)



## 2.2. COUVERTURE DES BESOINS DE CHAUFFAGE / CLIMATISATION DE BATIMENTS

Il est à noter que le système géothermique sera généralement sous-dimensionné par rapport aux besoins totaux du site. Il est en effet important que les équipements géothermiques mis en place aient une durée de fonctionnement annuelle maximale.

### 2.2.1 Bâtiments existants

Pour des projets existant, l'estimation des besoins se fait préférentiellement à partir de la puissance des équipements en place, et de l'examen des factures énergétiques.

Si ces éléments ne sont pas disponibles, ils peuvent être estimés à partir de la méthode décrite au point suivant.

### 2.2.2 Bâtiments futurs

#### 2.2.2.1 Besoin de puissance

Le besoin de puissance d'un bâtiment dépend de la zone climatique dans laquelle ce dernier est implanté, et de la qualité thermique de son enveloppe. Ce besoin peut être approché à partir des ratios suivants, détaillés pays par pays, valable pour des bâtiments de hauteur standard (2,5 m de hauteur).

#### *Besoin de puissance chaud*

Zone	Bâtiment neuf	Bâtiment ancien
Méditerranéenne	40 W/m <sup>2</sup>	70 W/m <sup>2</sup>
Montagneuse	75 W/m <sup>2</sup>	130 W/m <sup>2</sup>
Reste du pays	50 W/m <sup>2</sup>	90 W/m <sup>2</sup>

#### *Besoin de puissance froid*

80 W/m<sup>2</sup> de la zone traitée

#### 2.2.2.2 Besoins énergétiques

Le besoin énergétique du bâtiment dépend du besoin de puissance calculé précédemment, des conditions météorologiques et des différents apports thermiques liés à l'ensoleillement et à l'utilisation du bâtiment (les apports internes, comme l'éclairage et la présence de machines thermodynamiques pour des supermarchés peuvent peser très lourd dans le bilan thermique d'un bâtiment). Ces apports étant de nature très variée, il n'est pas envisageable, dans le cadre de ce document, de fournir des outils pour les quantifier. Selon les cas, les bilans proposés ci-après pourront donc être sensiblement modifiés à cause de ce facteur.

En première approximation, il est proposé de calculer les besoins de chaleur du bâtiment à partir de la formule suivante :

$$\text{Besoin de chaleur (kWh/an)} = 24 * \text{Besoin de puissance chaud (kW)} * \text{DJU (}^{\circ}\text{C.jr)} / 25$$

Avec :

DJU base 18°C : produit de l'écart entre la température extérieure et 18°C, et de la fréquence (exprimée en jours/an) de cette température extérieure

$$\text{Besoin de froid (kWh/an)} = A \times \text{Besoin de puissance froid (kW)} / \text{DJU (}^{\circ}\text{C.jr)}$$

Avec :

A : coefficient dépendant du pays considéré



**Figure 2 – Carte de France des DJU**

En France, on estime  $A = 1\,890\,000$  u.a.

## **2.3. INTEGRATION DE LA GEOTHERMIE A UN PROCEDE INDUSTRIEL**

La géothermie peut être intégrée à un procédé industriel de deux manières : soit comme système de stockage d'énergie dissipée normalement dans l'air extérieur, soit pour alimenter directement un procédé.

Les procédés industriels constituent une cible intéressante pour la géothermie car les besoins de puissance et les durées de fonctionnement sont généralement importantes.

### **2.3.1 Stockage de chaleur perdue**

La majorité des procédés industriels dégagent de la chaleur. Celle-ci est en général évacuée à l'aide de système d'échange énergétique vers l'air extérieur.

L'absence de valorisation énergétique est liée à deux facteurs principaux :

- l'absence de système de récupération d'énergie
- la non simultanéité entre la mise à disposition de l'énergie et son utilisation possible

La géothermie peut être utilisée comme un dispositif permettant de stocker et de restituer à tout moment de l'énergie.

L'énergie stockée peut être restituée directement, ou par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur afin de relever le niveau de température. La valorisation de cette énergie se fait souvent par un réseau de chaleur.

### **2.3.2 Alimentation en chaleur ou en froid d'un procédé industriel**

La géothermie peut alimenter un procédé industriel, soit en extrayant de la chaleur du sol, soit en valorisant de la chaleur stockée précédemment.

Le niveau de température requis pour le procédé est un paramètre clé (cf. Figure 1) et très souvent, un facteur limitant : c'est pourquoi pour beaucoup d'applications, la géothermie ne couvre pas l'intégralité du besoin de chaleur, mais permet de réaliser une étape de préchauffage.

### **2.3.3 Alimentation en froid**

La géothermie est une solution alternative pour la production de froid. Ses intérêts principaux sont :

- Valoriser un stock de froid qui aura pu être créé au cours d'un cycle de production de chaleur.
- Eviter le recours à des tours aéro-réfrigérantes, qui sont une source potentielle de développement de bactéries et qui consomment de l'eau et de l'électricité.

Remarque : l'utilisation de la géothermie pour la production exclusive de froid est limitée car cette technique est alors en compétition avec d'autres solutions consistant à exploiter l'air ambiant (le gain énergétique est alors lié uniquement à la différence de COP entre ces deux solutions).

## **2.4. BILAN**

A l'issue de cette étape, on dispose donc d'une première estimation de la puissance chaud et froid que la géothermie pourrait assurer (pour la climatisation de bureaux, pour des procédés industriels).

La couverture énergétique correspondant peut alors être estimée en prenant en compte la puissance des équipements installés et leur durée d'utilisation.

Six estimations peuvent être effectuées :

- Besoin de puissance chaud (kW)
- Besoin de puissance froid (kW)
  
- Consommation annuelle de chaleur (kWh/an)
- Consommation annuelle de froid (kWh/an)
  
- Capacité de stockage (kW)
- Energie stockée annuellement (kWh/an)

### 3. CHOIX D'UNE SOLUTION TECHNIQUE

#### 3.1. LES DIFFERENTS TYPES D'APPLICATIONS GEOTHERMALES

Deux types d'applications peuvent être distingués: les stockages sur aquifère (ATES) et les sondes géothermiques (BTES).

##### 3.1.1 Stockages sur aquifère (ATES)

Ce type de géothermie est bien adapté aux applications industrielles car il permet de traiter des puissances relativement importantes. Deux types d'aquifères sont à distinguer : les aquifères situés à une profondeur inférieure à 100 m, et les aquifères plus profonds.

La mise en place de cette technique est conditionnée à la présence d'une ressource en eau au droit du site. Cette condition est généralement remplie dans les bassins sédimentaires et les zones d'alluvion.

##### 3.1.1.1 Zones géographiques favorables

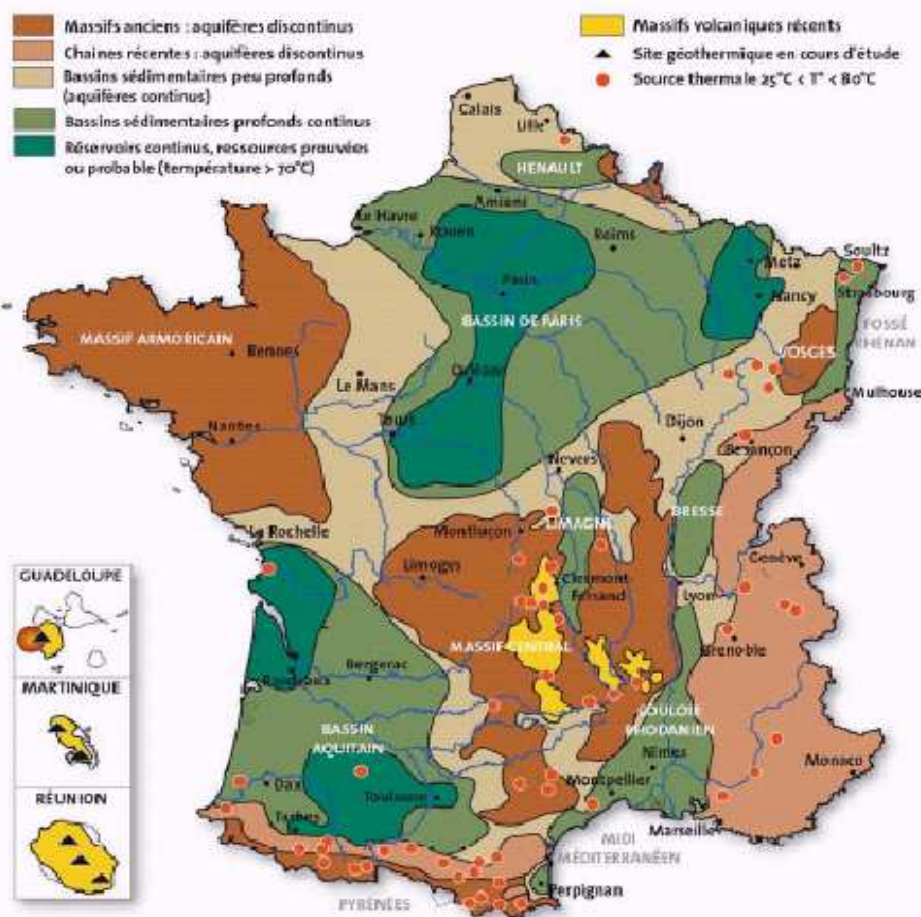


Figure 3- Bassins sédimentaires en France (tiré de D7 – France)

Pour certaines régions, le potentiel hydrogéologique des aquifères superficiels (profondeur inférieure à 100 m) peut être estimé à partir du site internet Géothermie-perspectives. (<http://www.geothermie-perspectives.fr/18-regions/index.html>).

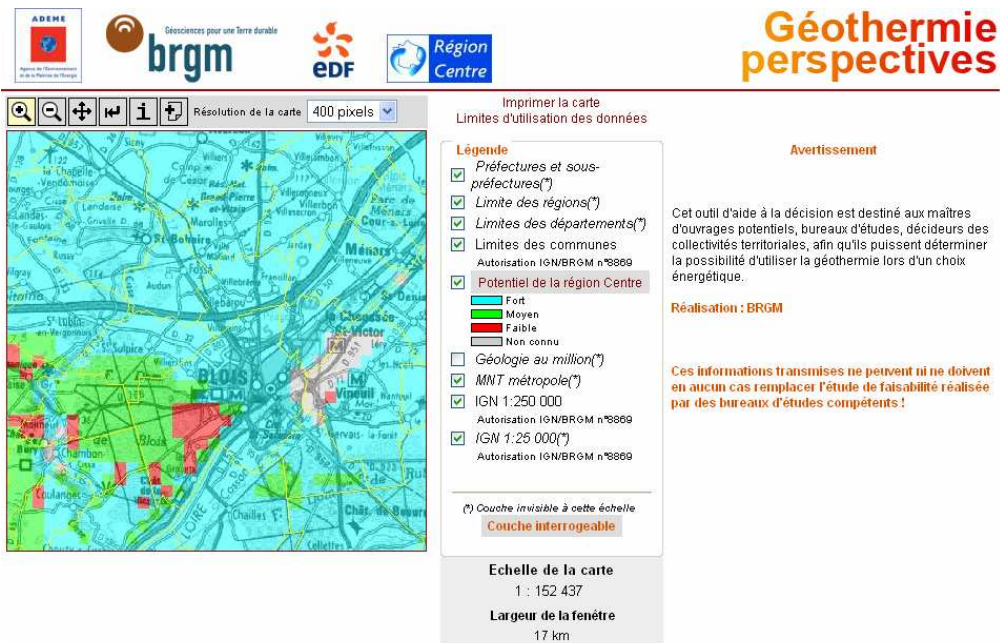


Figure 4 – Exemple d'information disponible sur « géothermie perspectives »

### 3.1.1.2 Puissance disponible

Les température minimales et maximales de réinjection sont contraintes par des considérations physiques et réglementaires. La Figure 5 montre la gamme de valeurs possible en France.

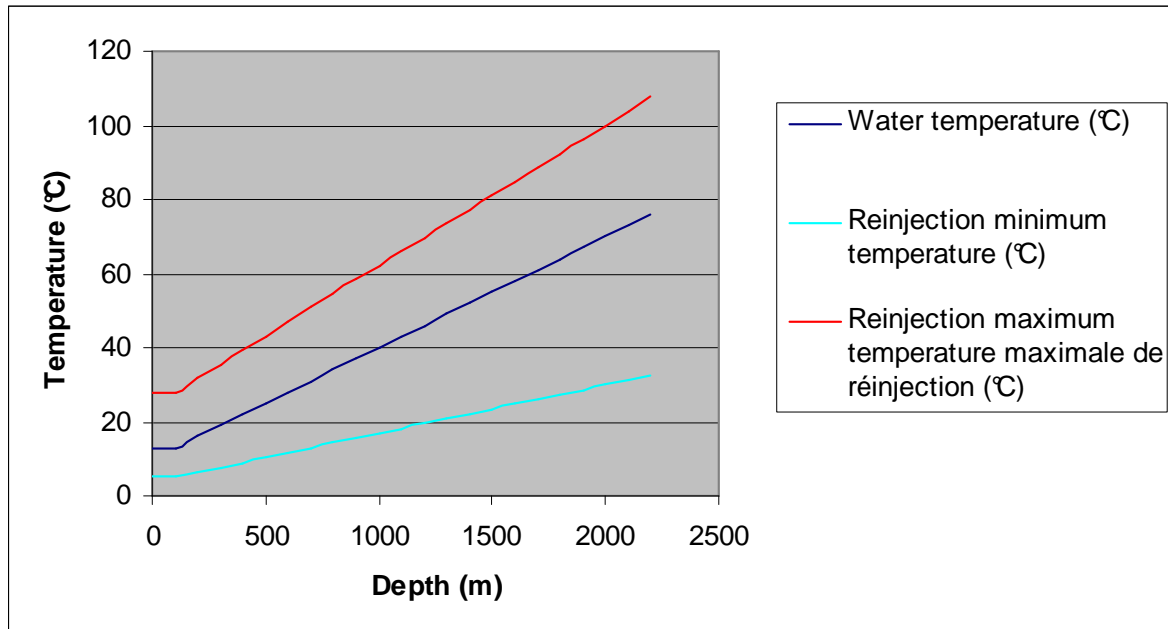


Figure 5 – Température moyenne de l'eau, et températures limites de ré-injection en fonction de la profondeur

Pour schématiser, il a été supposé qu'un doublet de forages permettait de traiter un débit de 100 m<sup>3</sup>/h. La puissance thermique disponible par doublet peut être déduite à partir de cette hypothèse.

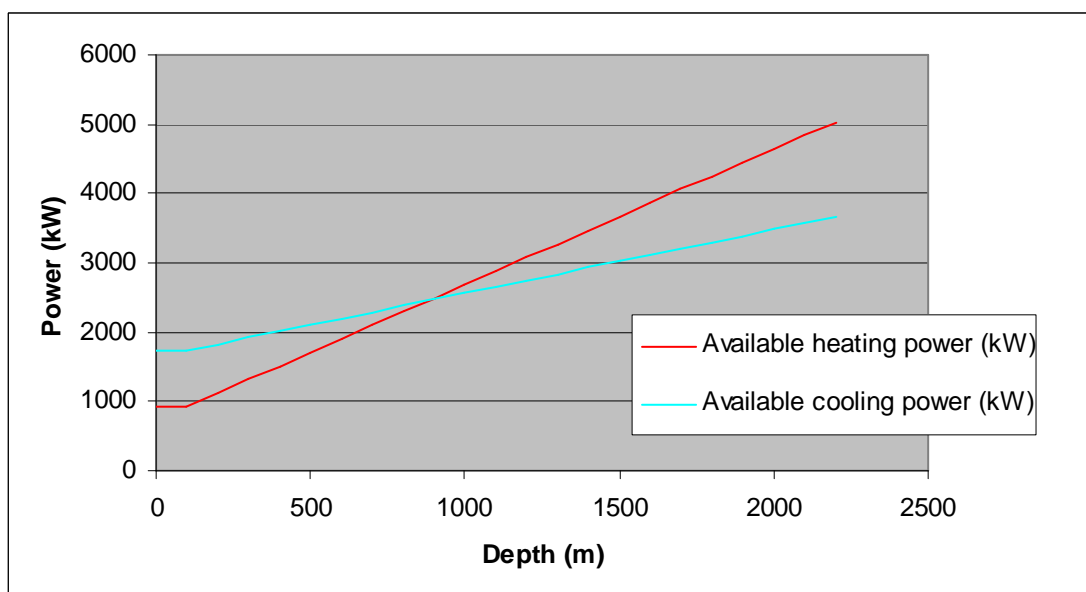


Figure 6 – Puissance thermique disponible ATES à un débit de 100 m<sup>3</sup>/h

La présence d'un aquifère à la profondeur considérée conditionne la validité de ces courbes. Afin d'atteindre la puissance nécessaire, il est possible de réaliser plusieurs doublets ou de solliciter des aquifères à des profondeurs différentes.

### 3.1.2 Sondes verticales (BTES)

S'il n'est pas possible d'exploiter un aquifère, un système de sondes verticales peut être considéré. Le nombre de sondes à implémenter dépend principalement du besoin de puissance.

In France, la profondeur maximale des sondes est de 100 m. La puissance thermique échangeable avec le sous-sol est de l'ordre de 4 kW pour une sonde de 100 m.

### 3.2. DIMENSIONNEMENT

Si une pompe à chaleur intervient, il convient d'intégrer la chaleur produite par le compresseur.

Pour la production de chaleur :

Chaleur produite à la sortie de la pompe = chaleur extraite du sol X 1,25

Pour la production de froid :

Chaleur à évacuer dans le sol = froid produit à la sortie de la machine thermodynamique x 1,25

Si des besoins de chaud et de froid sont couverts, il est généralement optimal d'un point de vue économique, de dimensionner la taille du système géothermal sur les besoins de chaleur.

### 3.3. BILAN

Dans cette partie, la possibilité d'exploiter un aquifère a été envisagée. Quand cela est possible, des règles s'appliquent pour estimer la profondeur théorique des puits, ainsi que le nombre de doublets à créer.

De manière analogue, le besoin de puissance détermine le nombre de sondes verticales à implémenter.

## 4. EVALUATION DU TEMPS DE RETOUR

### 4.1. COÛT D'INVESTISSEMENT

Cette section introduit quelques règles d'estimations des coûts d'investissement pour des systèmes géothermiques.

#### 4.1.1 Géothermie sur nappe

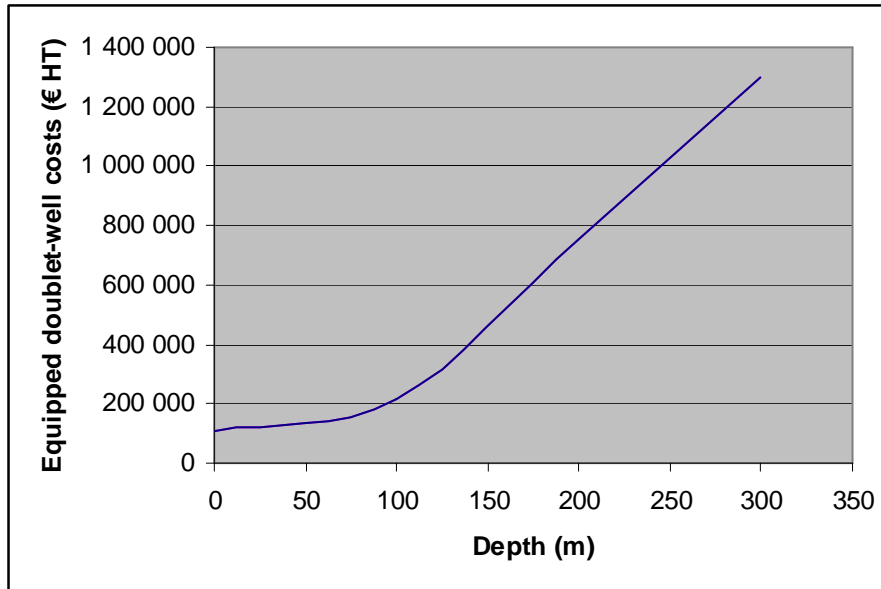


Figure 7 – Coûts d'investissement pour un doublet équipé (1)

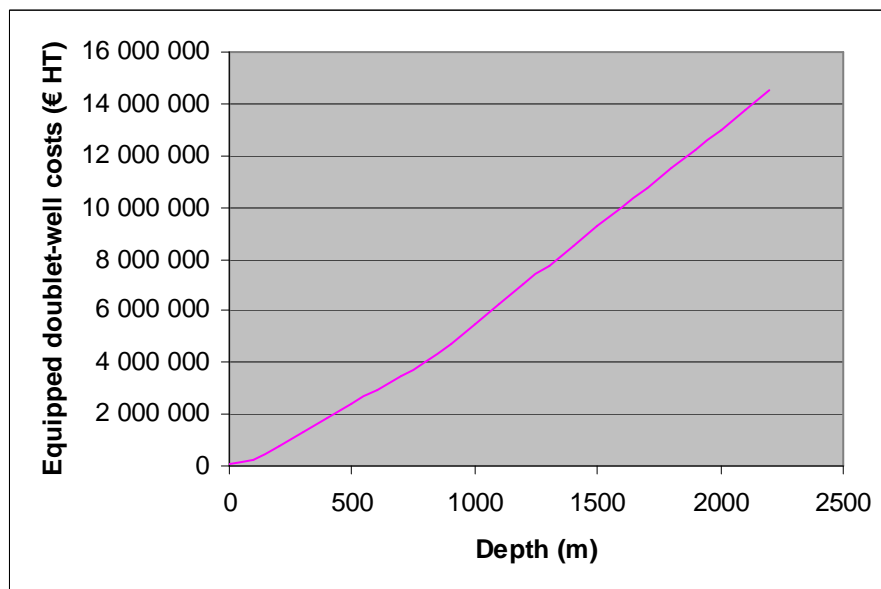


Figure 8 – Coûts d'investissement pour un doublet équipé (2)

#### 4.1.2 Géothermie sur sondes

Les sondes coûtent de l'ordre de 70 € HT par mètre, en incluant les frais de raccordement.

#### 4.1.3 Coût des pompes à chaleur

L'implémentation d'une pompe à chaleur est habituellement estimée à 400 €/kW<sub>thermique</sub>.

#### 4.1.4 Subventions

En général, il existe des systèmes d'aide financière pour ce type d'application. Une description de ces schémas est présentée dans le rapport D11 ("Guide des subventions pour les applications géothermiques au monde industriel").

Connaissant les montants des travaux et des aides, il est possible d'évaluer le coût effectif d'une solution géothermique (€ HT).

Remarque : il est recommandé d'investiguer les deux techniques (ATES et BTES) afin d'intégrer le facteur économique au choix de la technique.

### 4.2. COÛTS D'EXPLOITATION

L'objet de cette partie est d'évaluer les coûts de fonctionnement liés à l'utilisation d'un système géothermique. C'est pourquoi les prix de l'énergie y sont précisés.

Energy type	Average price (€/ kWh)
Gas	0,04
Electricity	0,07
Fuel	0,05

**Tableau 1 – Prix moyens de l'énergie**

#### 4.2.1 Solution conventionnelle

Les performances de la géothermie doivent être comparées à une solution conventionnelle. S'il n'y a pas de réseau de chaleur disponible l'alternative est soit fuel, gaz ou électricité, couplés à un groupe froid.

#### 4.2.2 Solution géothermique

En première approche, la différence de coûts d'entretien et de maintenance entre les solutions n'est pas prise en considération, ni l'énergie consommée par les différentes pompes de circulation qui peuvent intervenir dans chaque application.

Avec ces hypothèses, les dépenses énergétiques liées à la géothermie se résument aux consommations électriques générées par les machines thermodynamiques (le froid ou la chaleur produit sans machine thermodynamique est ainsi considéré comme gratuit).

Les règles suivantes sont proposées pour estimer les consommations d'électricité :

Consommation d'électricité pour la production de chaleur = Besoin de chaleur (kWh/an) / 4

Consommation d'électricité pour la production de froid (kWh/an) = Besoin de froid (kWh/an) / 3

La différence de coût d'exploitation entre les deux solutions donne les économies annuelles (€ HT/an).

#### **4.3. ESTIMATION DU TEMPS DE RETOUR SUR INVESTISSEMENT**

Le temps de retour peut être évalué avec la formule suivante :

Temps de retour (années) = Coûts d'investissement pour l'application géothermale (€ HT) / économie annuelle (€ HT/yr)

Il est à noter que ce résultat suppose implicitement que les coûts de l'énergie rester constant tout au long de la période considérée. L'intégration d'une inflation des prix ferait décroître sensiblement ce temps de retour.

#### **4.4. CONSIDÉRATIONS ENVIRONNEMENTALES**

Les performances environnementales de la géothermie et de la solution de référence sont estimées sur la base de ratios d'émissions de gaz à effet de serre, associées à chaque type d'énergie utilisée.

Energy type	Average emission (g CO <sub>2</sub> / kWh)
Gas	206
Electricity (winter)	180
Electricity (summer)	40
Fuel	270

**Tableau 2 – Greenhouse gases emission ratios (Source: ADEME)**

## 5. CONCLUSIONS

---

En suivant les différentes étapes de ce document, il est donc possible d'établir une première estimation d'une solution géothermique, pour un site donné, en ne faisant intervenir que des notions très simples.

La prise en compte des besoins énergétiques est déterminante pour dimensionner un système géothermique. Les conditions idéales sont :

- des besoins de chaleur et de froid (avec une cyclicité saisonnière) et équilibrés
- des températures de distribution relativement basses pour la chaleur, et hautes pour le froid
- une durée d'utilisation annuelle des capacités installées relativement longue

L'intervention d'un conseil spécialisé reste essentielle pour affiner l'estimation des besoins énergétiques, définir les possibilités d'intégration de la géothermie à un procédé industriel, préciser les conditions géologiques et hydrogéologiques ainsi que pour veiller au respect de la réglementation en vigueur.