

Toutefois, une nouvelle disposition spécifique à la géothermie a été définie. Il s'agit de la disposition 6E-4. Celle-ci prévoit que « les nouveaux forages de géothermie et les échangeurs sur sonde ne doivent pas atteindre ou traverser les NAEP. En particulier, en présence d'une nappe sus-jacente à une NAEP, disponible pour un usage de géothermie :

- Les forages de géothermie ne devront pas atteindre la NAEP,
- Pour les sondes, la profondeur de l'échangeur est limitée à la dernière formation géologique qui précède la NAEP et à la couche géologique imperméable qui la protège lorsqu'elle existe.

En l'absence d'autres nappes ou alternatives, si l'activité géothermique ne peut être réalisée que dans une NAEP (ou en lien avec cette nappe), elle peut être autorisée mais en étant soumise à certaines conditions :

- Le choix du type de géothermie devra permettre de limiter au maximum le nombre de forages ;
- Pour les échangeurs sur sonde, la profondeur des échangeurs devra être limitée à la première formation géologique NAEP.

Les forages devront être réalisés selon les prescriptions techniques réglementaires, notamment en matière de cimentation permettant l'isolement des aquifères traversés. Pour les échangeurs sur nappe, les quantités d'eaux prélevées seront réinjectées dans le même horizon géologique et sans altération de la qualité des eaux. »

**En respectant cette nouvelle disposition, le projet de géothermie sur nappe permet donc de limiter au maximum le nombre de forages (2 forages prévisionnels) et d'exploiter la première NAEP constituée par les calcaires de Beauce (première nappe permettant de répondre aux besoins énergétiques du projet). Une solution géothermique sur sondes verticales ne respecte pas la disposition du SDAGE 6E-4, incitant à opter pour la solution limitant le nombre de forages.**

**En adéquation avec le SDAGE, la solution sur sondes ne semble pas être une solution à envisager dans le cadre du projet.** En effet, la nappe des calcaires de Beauce est productive et il sera nécessaire de créer plus de 80 sondes pour atteindre la même puissance prélevée sur la ressource.

### 6.3.2. Le SAGE « Nappe de Beauce et milieux aquatiques associés »

Le projet est inclus dans le SAGE « Nappe de Beauce et milieux aquatiques associés ». Les objectifs du SAGE sont les suivants :

- Gérer quantitativement la ressource ;
- Assurer durablement la qualité de la ressource ;
- Préserver les milieux naturels ;
- Prévenir et gérer les risques d'inondation et de ruissellement ;
- Partager et appliquer le SAGE.

**Le SAGE autorise la réalisation de forages géothermiques sur nappe.**

L'article 5 du règlement du SAGE de la nappe de Beauce exige seulement que les nouveaux projets faisant appel à la géothermie comprennent un doublet de forages avec réinjection de l'eau dans le même horizon aquifère que celui dans lequel a été effectué le prélèvement.

## 6.4. Synthèse des contraintes environnementales du projet

Type de risque / contraintes	Projet concerné	Commentaires
SDAGE Loire Bretagne 2022-2027	Oui	Compatible mais Disposition 6E-4 à prendre en compte
SAGE (eaux souterraines)	Oui	Nappe de Beauce
ZRE	Oui	Nappe de Beauce et de l'Albien
PPC	Non concerné	Absence de PPC
NAEP	Oui	Calcaire de Beauce sous forêt d'Orléans et Craie du Séno-turonien captive
Cavité	Concerné	La commune est classée en aléa moyen
Retrait / gonflement des argiles	Concerné	Une partie du site est en aléa faible, une large partie est en aléa absent
Inondation	Non concernée	-
Risque de remontée de nappe	Oui	Sensibilité faible à forte

Tableau 10 : Synthèse des contraintes environnementales au droit du projet

La reconnaissance des terrains a permis d'identifier **l'existence de cavités (perte totale) lors de la foration de la sonde test.**

Lorsqu'il s'agit de créer un champ de sondes géothermiques, **la présence de cavités génère un aléa important quant à la qualité de la cimentation et au volume nécessaire pour assurer la cimentation sur toute la hauteur du forage** (possible surcoût/arrêt de chantier prolongé/défaut de cimentation/mauvais contact sol-ciment).

**La présence de cavités peut ainsi entraîner une augmentation tarifaire significative du poste cimentation des sondes géothermiques.**

## 6.5. Sites potentiellement pollués

Un site appartenant à la SAS CODIFRANCE est référencé dans la base de données BASOL à 300 m au nord-ouest du projet. Le diagnostic de pollution (2012) a montré que le terrain présentait d'importantes traces de pollution aux métaux lourds, aux hydrocarbures et aux composés volatils BTEX (Benzène, Toluène, Éthylbenzène et Xylènes).

## 6.6. Patrimoine naturel (Zone Natura 2000, ZNIEFF, ZICO)

Dans le cadre du présent dossier, l'inventaire du patrimoine naturel local a été réalisé aux abords du projet. Cet inventaire concerne les espaces naturels dont l'intérêt réside soit dans l'équilibre et la richesse de l'écosystème, soit dans la présence d'espèces végétales ou animales rares ou menacées.

Le site se trouve en zone urbanisée et n'est inclus dans aucune zone naturelle.

Items	Emprise du Projet
ZNIEFF de type 1	Non concerné / absence
ZNIEFF de type 2	Non concerné / absence
Zone d'Importance pour la protection des Oiseaux	Non concerné / absence
Sites d'importance communautaire – Natura 2000	Non concerné / absence
Arrêté de protection biotope	Non concerné / absence
Parc naturel régional ou national	Non concerné / absence
Réserve naturelle régionale ou nationale	Non concerné / absence
Zone Humide d'Importance Internationale	Non concerné / absence
Zone humide	Le site est concerné par une probabilité très forte à forte concernant l'existence d'un milieu humide (reseau-zones-humides.org)
Site classé et inscrit	Non concerné / absence

Tableau 11 : Récapitulatif Patrimoine Naturel

## 7. Dimensionnement du dispositif sur nappe

### 7.1. Rappel des caractéristiques de l'aquifère ciblé

Les informations géologiques et hydrogéologiques montrent que les calcaires de Beauce constituent l'aquifère le plus intéressant pour la géothermie (cf. parties précédentes). Les caractéristiques de l'aquifère sont les suivantes :

- Débit exploitable hétérogène mais pouvant aller jusqu'à 100 m<sup>3</sup>/h ;
- Débit spécifique plutôt faible autour du projet compris entre 4,5 et 13 m<sup>3</sup>/h/m mais suffisant pour le projet ;
- Niveau statique situé entre 18 et 23 m de profondeur par rapport au sol (moyenne de 20 m/sol) ;
- Une température moyenne de l'eau entre 14,0 et 16,0°C ;
- Une profondeur des calcaires de Beauce situé à 116 m/sol ;
- La qualité de l'eau semblerait compatible avec un usage en géothermie. Il conviendra toutefois d'être vigilant à la détermination des paramètres fer et manganèse. Une analyse d'eau devra être faite.

Ainsi, sur la base de ces éléments, 1 doublet de forage pourrait suffire pour assurer les besoins énergétiques du projet.

### 7.2. Estimation du débit de pompage

Le projet prévoit la mise en place d'une PAC eau/eau de 460 kW pour alimenter en chauffage. Le débit nécessaire pour fournir la puissance demandée est extrapolé à partir de cette équation :

$$P = Q \times 1,16 \times \Delta T$$

Avec P : puissance estimée en kW,  
Q : débit en m<sup>3</sup>/h,  
 $\Delta T$  : différence de température entre le point de prélèvement et le point d'injection en °C,  
1,16 : capacité calorifique volumique de l'eau en (KWh/m<sup>3</sup>\*°C).

Le débit nécessaire au niveau de la ressource est présenté ci-dessous.

	Mode chaud	Mode Froid
<b>Puissance de pointe (kW)</b>	460	89,9
<b>COP/Géocooling (*)</b>	3,6	(*)
<b>Puissance de pointe ressource (kW)</b>	332	89
<b>Delta de température (<math>\Delta T</math> °C) entrée/sortie échangeur</b>	6	6
<b>Débit sur la ressource (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>48 m<sup>3</sup>/h</b>	<b>13 m<sup>3</sup>/h</b>

Tableau 12 : Puissances et débits retenus en mode chaud et froid

Le dimensionnement de l'installation sera basé sur le débit nécessaire pour le mode chauffage.

### 7.3. Implantation prévisionnelle du doublet

L'implantation d'un doublet géothermique doit s'effectuer en considérant plusieurs critères hydrogéologiques afin de minimiser les éventuelles interférences hydrauliques et thermiques entre forages :

- L'axe du doublet doit se confondre au mieux avec le sens d'écoulement de la nappe et le forage de rejet doit être positionné en aval hydraulique du forage de prélèvement,
- La distance entre forage de pompage et forage de rejet doit être maximale afin de minimiser l'éventuel temps de percée et le taux de recyclage thermique.

D'après les cartes piézométriques, l'écoulement de la nappe au droit du projet est globalement orienté de l'Est vers l'Ouest.

L'espacement entre les deux ouvrages est d'environ 195 m. Le linéaire de canalisation serait de l'ordre de 275 m. Cet espacement a été vérifié par une simulation analytique (cf. 7.4.4.2).



Figure 13 : Localisation prévisionnelle des forages de pompage, de réinjection et des canalisations

En phase travaux, il convient de prévoir une surface de l'ordre de 400 m<sup>2</sup> pour les travaux de forage. Une plateforme pourrait être nécessaire en fonction de la stabilité des terrains et de la période d'intervention.

En phase d'exploitation, un accès doit toujours être possible au niveau de chaque tête de puits. Une surface entre 50 et 100 m<sup>2</sup> est suffisante.

## 7.4. Dimensionnement des forages

Les coupes techniques présentées ci-dessous pour le forage de pompage et pour le forage de réinjection sont prévisionnelles. Elles pourront être modifiées en fonction de l'évolution du projet et en fonction des résultats sur le forage de reconnaissance.

### 7.4.1. Forage de pompage

Sachant que les débits spécifiques dans le secteur sont en moyenne de l'ordre de 8 m<sup>3</sup>/h/m, un débit de pompage de 48 m<sup>3</sup>/h devrait induire un rabattement de l'ordre de 6 m, soit une profondeur du niveau dynamique à 28 m/sol environ en condition de moyennes eaux.

La profondeur de l'ouvrage de pompage sera de l'ordre de 50 m. La fluctuation de la nappe est évaluée à 3,65 m par rapport au niveau statique moyen (20 m) et le NPSH de la pompe à 7 m. Par conséquent, la pompe devra être positionnée vers 31 m de profondeur (partie haute de la pompe).

Le diamètre extérieur de la colonne captante INOX 304L sera de 273 mm. Le diamètre de foration associé est de 445 mm d'après la norme NFX 10-999. Afin d'isoler les formations sus-jacentes, un tubage inox 304L de 473 mm de diamètre sera utilisé au droit de ces formations, et cimenté à l'extrados.

Les forages pourront être réalisés par la technique du rotary à la boue. Les diamètres de forage et d'équipement proposés sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Antea Group propose l'utilisation d'acier inoxydable AISI 304, qui présente une bonne résistance à la corrosion et une meilleure caractéristique hydraulique (débit d'entrée par mL).

De (m)	A (m)	Diamètre de foration (mm)
0,0	30,5	610
30,5	50	445

Tableau 13 : Diamètres et profondeurs de foration

De (m)	A (m)	Hauteur (m)	Equipement	Diamètre extérieur (mm)
+0,5	30,5	31,0	Tube plein en acier inoxydable 304L	473
28,0	34,0	6,0	Tube plein inox 304L (porte crépine)	273
34,0	49,0	15,0	Tube crépiné en acier inoxydable 304 L, à fils enroulés, slot de 3 mm	273
49,0	50,0	1,0	Tube plein inox 304L avec bouchon de fond	273

Tableau 14 : Equipement des ouvrages

Pour éviter tout risque de contamination de la pollution présente en latéral hydraulique du projet, il est envisagé d'isoler les sables et argiles de l'Orléanais jusqu'à 20 m de profondeur avant de poursuivre la foration dans les niveaux inférieures.

La complétion des forages sera la suivante :

- cimentation à l'extrados du diamètre 473 mm,

- massif filtrant siliceux type 6-10 mm à l'extrados du diamètre 273 mm.

La mise en place de centreurs tous les 5 m est prévue.

Cette coupe est présentée ci-dessous

**A ce stade, il s'agit d'une coupe prévisionnelle qui pourra être adaptée en fonction des épaisseurs rencontrées lors de la foration.**

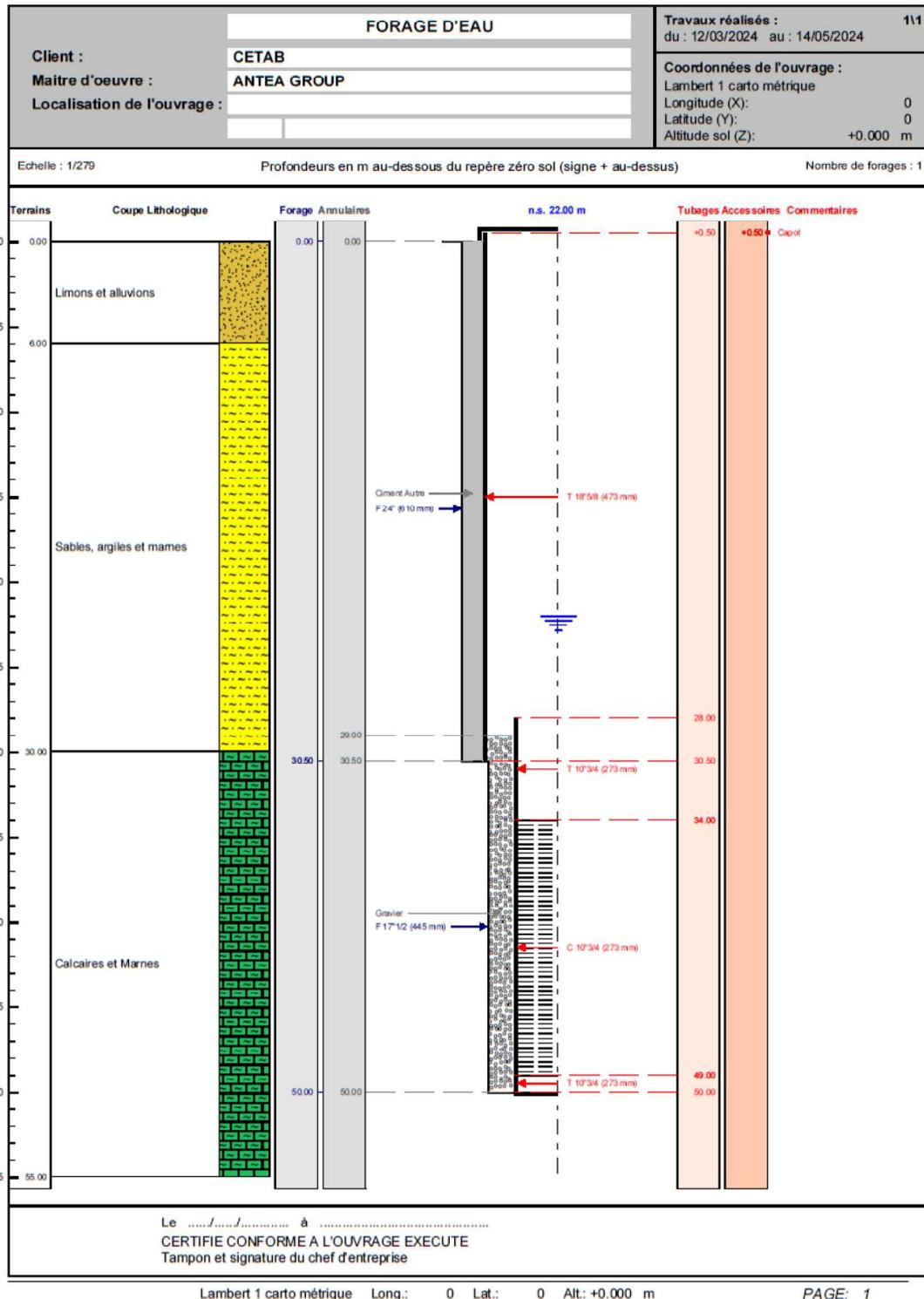


Figure 14 : Coupe géologique et technique prévisionnelle du forage de pompage

## 7.4.2. Forage de réinjection

A ce stade, le forage de réinjection aura les mêmes caractéristiques que le forage de pompage. Ce dimensionnement permettra de mettre en place une pompe de rétrolavage.

## 7.4.3. Développement, nettoyage et essais de pompage

- **Développement et nettoyage**

Il est conseillé de réaliser au minimum un nettoyage à l'air lift pendant 8 h, puis une série de pompages à différents débits pendant 8 h (cycle marche/arrêt).

Une phase de développement de l'ouvrage par acidification (injection d'acide sous pression) permettra ensuite d'augmenter la capacité de production de l'ouvrage. La quantité exacte sera définie en fonction des premiers résultats. Un nettoyage par air lift suivi d'un pompage devra ensuite être effectués jusqu'à l'obtention d'une eau claire et neutralisée.

Il est envisagé de réaliser un développement avec 3 T d'acide chlorhydrique en 2 passes de 1T et 2T.

- **Pompages d'essai à réaliser**

Une fois les forages réalisés, des pompages d'essai devront être effectués pour définir les capacités de production des ouvrages et le comportement de la nappe sur une sollicitation de longue durée. Trois types d'essais seront réalisés :

- Un pompage d'essai par paliers : 4 paliers non enchaînés de 2 h, aux débits de 30, 50, 65 et 80 m<sup>3</sup>/h.
- Un pompage d'essai de longue durée : 24 h à 72h, suivi de 8 h de remontée. L'objectif est de vérifier la productivité de l'aquifère sur le long terme (distance aux limites, recharge), et d'estimer l'incidence du pompage sur les ouvrages environnants,
- Un essai de réinjection des eaux (par palier de débit et de longue durée 24h).

Le pompage de longue durée devra être réalisé après le pompage d'essais par paliers. Un temps de 12 h minimum entre les deux essais devra être respecté. Le débit de l'essai de longue durée sera déterminé d'après les résultats de l'essai par paliers.

### 7.4.3.1. Protection de la tête des forages

La tête des deux forages devra être aménagée de manière à empêcher toute entrée d'eau superficielle, et tout risque de déversement malveillant dans l'ouvrage.

La réglementation recommande que le tubage du forage soit étanche, et scellé correctement dans une dalle bétonnée. Pour la dalle de béton, la réglementation impose une dimension de 3 m<sup>2</sup> minimum et une hauteur minimum de 30 cm au-dessus du terrain naturel. La dalle doit être sans fissure et présenter des faces dont les pentes permettent d'évacuer l'eau de pluie vers l'extérieur du tubage.

La réglementation précise également que la tête de forage soit au moins de 50 cm au-dessus du terrain naturel et que le capot en tête de forage soit constitué d'un bouchon étanche. Le capot de protection doit pouvoir se fermer à clé.

Dans le cas de forage dont la tête est située dans un local : la dalle en béton reste nécessaire et la réhausse de la tête du forage. L'accès au local est cadenassé et doit dépasser d'environ 0,5 m du terrain naturel.

#### 7.4.4. Evaluation simplifiée des impacts du fonctionnement du doublet

**Le but de cette partie est d'estimer de manière simplifiée les impacts du fonctionnement du doublet et d'ajuster l'implantation prévisionnelle des ouvrages.**

Une modélisation numérique devra être réalisée pour intégrer le mode de l'installation et évaluer les incidences hydronymiques et surtout thermiques. Le code minier précise qu'en phase d'exploitation, l'installation d'un échangeur géothermique ouvert ne doit pas causer une variation de température de la nappe d'eau exploitée de plus de 4°C à 200 m des échangeurs géothermiques de production et réinjection. La température maximale de réinjection ne doit pas dépasser 32°C.

##### 7.4.4.1. Influence du pompage sur les niveaux de nappe

Le cône de rabattement induit par le pompage a été évalué par l'approximation de Theis-Jacob. Bien que les lois de l'hydraulique soient théoriquement réversibles, il est en pratique toujours plus difficile de réinjecter l'eau dans un puits que d'en pomper car les pertes de charge sont toujours plus importantes en injection qu'en pompage. Ainsi le facteur limitant pour un dispositif de pompage/réinjection est bien souvent le débit que l'on peut réinjecter dans la nappe. Il a été évalué avec les hypothèses moyennes suivantes :

- Débit prélevé de 50 m<sup>3</sup>/h
- Pompage de 24 h (temps de fonctionnement estimé en pointe) ;
- Transmissivité de 2,8.10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s (valeur estimée à partir du débit spécifique de 8 m<sup>3</sup>/h/m) ;
- Emmagasinement de 5 % (valeur moyenne bibliographique).

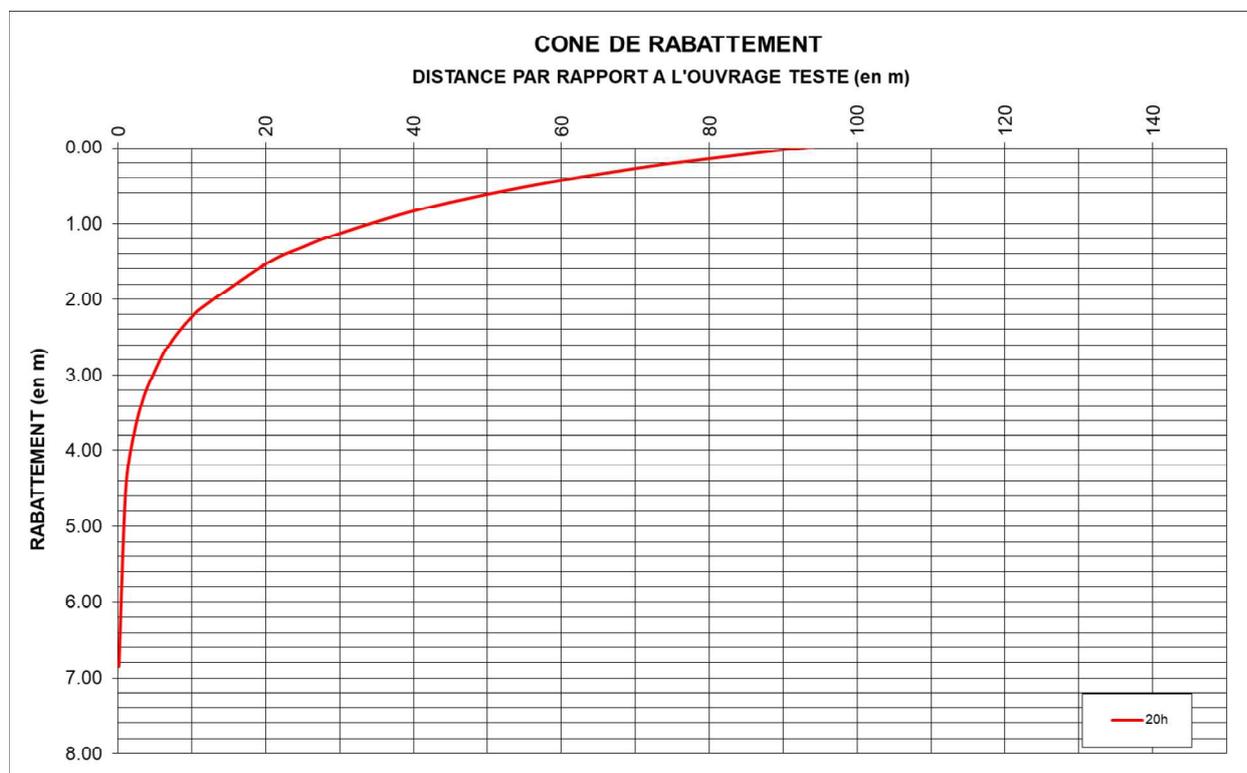


Figure 15 : Cône de rabattement induit par un pompage de 24h dans les calcaires de Beauce au débit de 50 m<sup>3</sup>/h

D'après le calcul réalisé pour un pompage continu de 24 h, l'incidence du pompage sur les niveaux de nappe est quasi nulle à partir d'une distance de 90 m environ (cf. Figure 15). **L'implantation proposée permet d'éviter toute incidence sur les ouvrages existants environnants déclarés.**

Dans un rayon de 100 m autour de la zone d'implantation du forage de pompage, il n'existe pas de points d'eau.

#### 7.4.4.2. Phénomène de recyclage thermique – calcul analytique simplifié

L'importance du recyclage thermique est évaluée en considérant un fonctionnement en mode chaud avec un pompage de pointe sur 20 h/jour. Le débit de pompage est donc de 50 m<sup>3</sup>/h pendant 20h par jour (soit un débit moyen journalier de 40 m<sup>3</sup>/h). On considère les éléments suivants :

Caractéristiques de l'aquifère		
Transmissivité moyenne	2,8.10 <sup>-3</sup>	m <sup>2</sup> /s
Epaisseur de l'aquifère capté	15	m
Gradient hydraulique	0,2.10 <sup>-2</sup>	sans unité
Conditions d'exploitation		
Angle $\alpha$ entre le sens d'écoulement et la droite joignant le captage et le rejet	20	sans unité
Débit moyen de pompage pour 24h de fonctionnement	40	m <sup>3</sup> /h
Température de l'eau pompée – Température initiale	14	°C
Température de l'eau rejetée	8	°C
Distance Captage	195	m
Temps de percée	11,4	mois
Taux de recyclage	49,4	%
Température à stabilisation	11,0	°C

**Tableau 15 : Hypothèses et données hydrodynamiques utilisées pour l'évaluation du recyclage thermique, dans l'hypothèse « maximale » - fonctionnement en chaud**

Les résultats obtenus dans ces conditions sont les suivants :

- Temps de percée (début de l'impact thermique sur le puits de pompage) : 16,4 mois environ ;
- Température stabilisée : 11,0 °C en mode chaud ;
- Taux de recyclage thermique : 49,4 % environ.

Sur la base de ces hypothèses (fonctionnement en régime permanent à 40 m<sup>3</sup>/h), l'implantation proposée engendre une incidence thermique sur le forage de pompage.

**A noter qu'il s'agit d'une première approche qui ne prend pas en compte une possible réversibilité du système en mode chaud/froid et qui suppose un fonctionnement permanent de l'installation. Le résultat est donc très majorant ou sécuritaire.**

**Après arbitrage par le MOA sur le choix du type de géothermie, l'étude de faisabilité devra intégrer une simulation numérique détaillée intégrant le mode de fonctionnement prévu de l'installation de géothermie (débit, durée de fonctionnement, période d'arrêt, mode chaud et mode climatisation).**

## 7.5. Equipement hydraulique du doublet et réseau de transfert

### 7.5.1. Equipements et canalisation

#### 7.5.1.1. Tête de puits

La tête des puits devra être étanche. Elle dépassera de +0,5 m/radier du dernier niveau de sous-sol. La tête des ouvrages sera située dans les locaux techniques. Les locaux techniques seront destinés à recevoir tous les équipements nécessaires au fonctionnement des pompes, à leur protection ainsi que les systèmes de comptage et de prise d'eau brute. En première approche, les locaux techniques seront semi-enterrés avec un accès trou d'homme et un accès à l'aplomb de la tête de puits.

Les têtes de puits seront étanches avec la mise en place d'une bride, d'un joint et d'un capot boulonné. Des entrées/sorties d'air doivent être mises en place afin de gérer les déséquilibres de pression liés aux variations du niveau d'eau : abaissement en pompage ou remontée en injection. Des dispositifs dits « ventouses » permettent cette triple fonction.

L'alimentation électrique devra servir pour l'ensemble des équipements présents (pompe immergée, débitmètre, armoire électrique, etc...).

L'étanchéification entre le radier et le tubage doit être prévu pour garantir l'absence de désordre. Une attention particulière devra être apportée au forage de réinjection en raison d'une réinjection des eaux sous pression (pression non définie à ce stade).

#### 7.5.1.2. Liaison hydraulique entre les forages de pompage et de réinjection

Les liaisons hydrauliques entre les deux puits se feront par la mise en place de canalisation dans le sol. Pour un débit de 50 m<sup>3</sup>/h, la conduite aura un diamètre de l'ordre de 125 mm. Ce diamètre est compatible avec la vitesse de circulation des eaux.

Des fourreaux pour le passage des câbles d'alimentation ou de télégestion devront être prévus vers les forages et en direction de la GTB. Il sera également prévu 1 fourreaux en secours.

### 7.5.2. Equipement hydraulique des forages

Les têtes des puits doivent être équipées de différents piquages et presse-étoupes. La mise en place des presse-étoupes sera conçue de manière à assurer par simple démontage une remontée aisée des différents câbles et capteurs.

Il est prévu de mettre en place une filtration de type filtre auto-nettoyant avec un maillage de 100 µm. La filtration devra être installée entre le forage de pompage et l'échangeur.

Un raccordement par flexible sera à mis à disposition pour raccordement provisoire et manuel au réseau d'assainissement/eaux pluviales lors des phases de maintenance. Ce raccordement s'adaptera à l'un des dispositifs de dérivation en aval de l'échangeur.

### 7.5.3. Equipement hydraulique au droit du puits de pompage

#### Equipement dans le puits de pompage

- Fourniture et mise en place d'une pompe immergée avec un débit maximal de 50 m<sup>3</sup>/h, HMT min = 100 m, crépine d'aspiration de la pompe à – 32 m/repère,
- Une sonde de pression permanente avec compensation barométrique (niveau piézométrique) dont les informations seront transmises à la GTB,
- Installation d'un tube plongeur pour installer la sonde de pression,
- Une sonde de température,
- Une ou des sondes de coupure pour la protection de la pompe.

#### **Canalisation de refoulement de la pompe :**

- Canalisation inox 304L en diamètre DN125 mm,
- Un coude à 90° avec anneau de levage,
- Une dérivation avec vanne d'isolement et raccord pompier (bypass).

#### **Equipements électromécanique :**

- Une canalisation inox à 0,8 m/sol du radier,
- Un manomètre,
- Robinet de prélèvement des eaux brutes à fermeture type vanne papillon.
- Un compteur à impulsion (modèle conventionnel si les longueurs droites amont/aval peuvent être respectées, ou modèle permettant de s'affranchir des longueurs droites amont/aval en cas d'impossibilité),
- Une vanne d'arrêt papillon après le compteur,
- Clapets à membrane anti-retour,
- Un dispositif contre les surpressions (anti-bélier ou autre si nécessaire),
- Un variateur de vitesse de la pompe,
- Une armoire de commande comprenant la télégestion.

### **7.5.4. Equipement hydraulique au droit du puits de réinjection**

#### **Equipement dans le puits de réinjection**

- Une sonde de pression permanente avec compensation barométrique (niveau piézométrique) dont les informations seront transmises à la GTB,
- Installation d'un tube plongeur pour installer la sonde de pression,
- Compteur/débitmètre pour le rejet des eaux,
- Une sonde de température,
- Une ou des sondes de coupure pour la protection de la pompe.

#### **Canalisation de rejet :**

- Un coude à 90° avec anneau de levage,
- Une dérivation avec vanne d'isolement et raccord pompier (bypass).

#### **Système de retrolavage :**

Il mise en place d'une colonne d'exhaure pour la pompe de retrolavage et du tube de réinjection nécessitent a minima 300 mm. Le dimensionnement proposé du forage de réinjection ne permettra pas de mettre en place une double colonne : la première pour la réinjection et des eaux et la seconde pour la pompe de retrolavage. A ce stade, il est donc prévu de mettre un dispositif type HPV pour éviter la mise en place d'un second tubage. **Ce point devra être étudié plus dans le détail.**

L'équipement sera le suivant :

- d'une colonne injection en DN125 en inox (longueur 25 m) avec clapet taré de 0,5 b,

- d'une pompe permettant un débit nominal de 50 m<sup>3</sup>/h,
- d'un clapet anti-retour en tête des colonnes,
- d'un robinet de prélèvement (en aval du clapet),
- la mise en place d'un dispositif de rejet vers l'égout avec compteur,
- la pose de vannes motorisées.

L'armoire de commande devra comprendre le dispositif de gestion du rétrolavage :

- Protection et alimentation de la pompe immergée de rétrolavage,
- alimentation des vannes motorisées,
- relais pour la sécurité des niveaux de nappe,
- alimentation et asservissement des relais.

L'ajout de programmation dans l'armoire sera validé lors de la réception de l'analyse fonctionnelle de l'installation produite par l'entreprise.

### 7.5.5. Equipements électriques

L'équipement électrique devra comprendre :

- **Le système d'alimentation électrique** : l'alimentation sera en basse tension,
- **Le système de commande** et de protection des pompes,
- **Système d'alarme** (contacteur niveau bas, haut, etc.),
- **Le variateur de vitesse** des pompes,
- **La télégestion.**

A ce stade, il est prévu de mettre ces équipements dans les locaux techniques de forages. Il est également possible de mettre ces équipements dans un local commun dédié.

### 7.5.6. Télégestion

La télégestion sera réalisée avec des éléments compatibles entre eux. C'est-à-dire entre les équipements électroniques installés et la GTB.

### 7.5.7. Installation de la ligne

#### Une ligne pilote :

- **Câble armé-blindé** sur forage de pompage et de réinjection,

#### La sécurisation :

- **Contacteurs en série** (4 trappes) avec temporisation et clé (la fourniture et pose),
- **La liaison avec la télégestion.**

#### La télégestion comprendra :

- **la fourniture et le raccordement de la ligne pilote,**
- **la mise en place et la programmation de la télégestion.** Les entrées TOR à prévoir seront :
  - secteur armoire,
  - manque d'eau pompes avec alarme,
  - marche pompe 1 avec comptage du temps de fonctionnement et du nombre de démarrage,
  - marche pompe de rétrolavage avec comptage du temps de fonctionnement et du nombre de démarrage,

- défaut pompe 1 et 2 avec alarme,
- compteur avec comptage du volume d'exhaure et compteur sur le ou les points de rejets,
- accès avec alarme (ouverture des accès),
- les entrées analogiques : le niveau des forages, température, pression du réseau,
- les sorties TOR seront : la commande du pompage (variateur), et deux sorties libres.

## 7.6. Mise en service et essai de la boucle

### 7.6.1. Principe de fonctionnement

Les principes de fonctionnement sont les suivants :

- variation de vitesse sur les forages de pompage, démarrage progressif,
- fonctionnement du système de rétrolavage,
- l'asservissement de la pompe immergée dans le forage s'effectuera directement sur la température du circuit secondaire en sortie d'échangeur,
- toutes les sécurités nécessaires seront prévues (défaut thermique sur les pompes, coupure des pompes en cas de niveau trop bas, coupure de l'injection et donc du système en cas de niveau trop haut/montée en pression, température de rejet trop élevée etc.),
- en cas d'anomalies de fonctionnement, la remise en route ne pourra se faire qu'après acquittement des défauts à partir de l'armoire de commande du local PAC ;
- les paramètres suivants devront être enregistrés sur l'automate et remontés en GTB : niveaux d'eau, températures, pression, alertes, etc.

**L'analyse fonctionnelle sera soumise au maître d'œuvre.**

### 7.6.2. Essais de bon fonctionnement et mise en service

En vue de vérifier le bon fonctionnement de l'installation, il sera effectué en fin de travaux un essai de mise en service avec les installations en place. Il consistera en 24 h d'essai à débit continu, et 16h d'essai de marche/arrêt (tests des différents défauts, et des équipements hydrauliques et électriques de l'ensemble des forages). Au préalable à cet essai de mise en service, il est demandé de réaliser des cycles d'arrêt/marche sur le forage de pompage avec un rejet direct au réseau d'assainissement.

En particulier, les contrôles lors de la mise en service porteront sur :

- l'efficacité de la variation de vitesse sur la variation du débit et la progressivité des arrêts / démarrages de la pompe ;
- l'absence de phénomènes transitoires tels que coups de bélier lors du démarrage ou de l'arrêt du pompage ;
- le débit réellement pompé et injecté,
- le fonctionnement du système de rétrolavage,
- le maintien en pression des canalisations de raccordement des forages.

Un dossier des ouvrages exécutés sera établi par l'entreprise.

### 7.6.3. Nature des équipements

A ce stade, la qualité des eaux au droit du projet n'est pas connue. Toutefois, en raison de la présence de fer ou de manganèse, il est préconisé de mettre en place un système de filtration en amont de l'échangeur et de prévoir un système de retrolavage (pompe immergée) sur le forage de réinjection.

La boucle d'eau devra être totalement étanche afin d'éviter les entrées d'air. Une mise en pression a minima de 0,5 bar sera demandée.

## 7.7. Evaluation financière d'un doublet sur nappe

Les prix indiqués comprennent les éléments suivants :

- Un forage de reconnaissance (qui servira de puits de pompage) ;
- Un deuxième forage (qui servira de puits de réinjection) ;
- Le matériel de pompage et de canalisations jusqu'à l'échangeur non compris ;
- Petits équipements hydrauliques ;
- Les liaisons hydrauliques et électriques entre forages (base de 275 mL) ;
- Le système de retrolavage et de filtration ;
- Les regards de tête des puits (pour un doublet de forage).

Les prix indiqués sont estimatifs, ils ne prennent pas en compte la pompe à chaleur et l'échangeur. Les prix pourront varier en fonction de différents critères (profondeur des ouvrages, diamètre, nature des équipements, linéaire de canalisations, etc...). **Il s'agit donc d'une première enveloppe budgétaire au stade APD.**

### 7.7.1. Enveloppe prévisionnelle des travaux

L'estimation des coûts du projet d'utilisation d'une géothermie sur nappe pour des ouvrages de 80 m de profondeur environ est donnée dans le tableau suivant :

Désignation	Prix d'un doublet (€ HT)
Forage de reconnaissance et essais (Tubage INOX 304L, développement et essais de pompage)	112 800
2 ième forage et essais Forage de reconnaissance et essais (Tubage INOX 304L, développement, essais de pompage et essai en boucle)	122 800
Equipements (pompe d'exploitation, filtre à pot/cartouche, canalisations d'exhaure et de réinjection, petits équipements) (en fonction des contraintes du site <u>et chemin d'accès/plateforme</u> )	111 600
Liaison hydraulique entre le doublet (base de 275 mL) (en fonction des contraintes du site <u>et chemin d'accès/plateforme</u> )	96 250

Bâtiment technique ou local technique enterré pour les deux forages	30 000
<b>Option</b> : Système de rétrolavage, inertage et filtre auto-nettoyant (en fonction de la qualité des eaux et du risque de colmatage)	77 220
<b>Total prévisionnel (€ HT) – SANS AIDE FINANCIERE et SANS OPTION</b>	<b>473 450</b>
<b>Total prévisionnel (€ HT) – SANS AIDE FINANCIERE et AVEC OPTION</b>	<b>550 670</b>

Tableau 16 : Estimation des coûts de l'installation géothermique partie sous-sol uniquement pour 1 doublet

L'estimation globale d'un doublet géothermique exploitant la nappe des calcaires de Beauce est de l'ordre de 555 670 € HT avec option et hors aides et subventions. Cette estimation est prévisionnelle, elle devra être précisée suite à l'étude de faisabilité. Cette enveloppe est valable pour un doublet avec utilisation de forage de reconnaissance et pour un accès aux sites d'implantation sans contrainte d'accès (hors aménagement d'un accès, plateforme, etc...).

Une part variable de ce chiffrage, concerne notamment : les conditions particulières d'amenée/repli de matériel, l'aléa géologique (variation possible des horizons géologiques pouvant faire varier la profondeur des forages), les opérations de développement qui seront nécessaires pour améliorer la productivité des forages, la nécessité d'approvisionner de l'énergie et de l'eau pour le fonctionnement du chantier ou encore l'éventuel montant de cotisation à la garantie Aquapac.

**Une partie de cet aléa ne peut être appréhendée à ce stade. Dans le contexte actuel, les fournitures tels que les matériaux INOX subissent une augmentation de leur coût (+10 à +20 %). Les enveloppes affichées sont par conséquent susceptibles d'augmenter.**

### 7.7.2. Coût d'exploitation, maintenance et remplacement

La maintenance comprend l'entretien et le remplacement du matériel. Des visites seront à prévoir pour vérifier les équipements. Il est nécessaire d'envisager de confier à une société spécialisée en forage et géothermie un contrat annuel de maintenance pour l'inspection « routinière » des installations.

Désignation	Prix moyen/an – solution sur nappe (€ HT)
P1 – Pompes des forages (estimation de 64 MWh/an pour les pompes de circulation)	5 800 euros /an
P2 – Contrat de maintenance annuel (prix moyen sur 10 ans)	4 000 euros / an
P3 – Régénération et remplacement (hors PAC)	5 000 euros /an
<b>Total prévisionnel (€ HT) du cout d'exploitation et maintenance</b>	<b>14 800 euros / an</b>

**Le montant du fonctionnement, de la maintenance/entretien et des provisions (hors PAC) serait de l'ordre de 14 800 €/an.** Cette gamme de prix ne tient pas compte de la partie PAC et distribution.

Un suivi d'exploitation par un bureau d'études spécialisé en hydrogéologie est également recommandé, en particulier durant les premières années de mise en service de l'installation. Il comprendra l'analyse des données d'exploitation (volumes et débits prélevés et réinjectés, niveaux statiques et dynamiques, température et paramètres physico-chimiques et bactériologiques de la nappe, etc.) afin de contrôler le comportement de l'installation, en optimiser son fonctionnement (modification des consignes de régulation si nécessaire) et d'anticiper toute perte éventuelle de productivité des forages.

Le coût pour le suivi de l'installation (partie sous-sol) peut être évalué à 4 000 €/an en fonction du nombre de visite (à minima 3 visites). Il est conseillé de suivre plus finement l'installation les 3 premières années ; ensuite le suivi peut être plus espacé dans le temps.

Le budget prévoit une inspection vidéo tous les 10 ans.

Pour le remplacement du matériel, il convient de budgétiser 5 000 €/an (hors coût de maintenance de la PAC). Ce montant permettra le remplacement d'une pompe au bout de 10 ans, des inspections endoscopiques et le remplacement des petits équipements si nécessaire. Ce budget permet également de réaliser des opérations de nettoyage 1 fois tous les 15 ans.

Dans notre estimation, il n'a pas été prévu de provision pour le remplacement des forages.

## 8. Etude de la solution sur sonde

### 8.1. Choix de la profondeur des échangeurs fermés

Sur la base des éléments vues dans les parties précédentes, il serait possible de créer des sondes jusqu'à **une profondeur unitaire de l'ordre de 110 m environ** et qui s'arrêteront au toit de la craie. En effet, il n'est pas autorisé de recouper 2 nappes classées en NAEP.

### 8.2. Conductivité thermique des roches traversées

Les caractéristiques thermiques du sous-sol dans l'intervalle de profondeur mobilisé par les sondes sont déduites de la coupe géologique prévisionnelle des terrains au droit du projet.

La conductivité thermique des roches traversées de 0 à 110 m de profondeur a été estimée à partir de leurs caractéristiques et de leur degré de saturation en eau (sec, humide, saturé). Le tableau suivant présente les résultats obtenus. Il s'agit de valeurs moyennes qui pourront être validées par un TRT.

Profondeur verticale (m/sol) du toit et du mur de la formation	Epaisseur moyenne (m)	Lithologie / étage géologique	Conductivité thermique moyenne (W/m.K)	Capacité thermique volumique moyenne (MJ/m <sup>3</sup> .K)
0 à 20,0 m	20	Sables et argiles	2,40	2,50
20,0 à 110,0 m	90	Marnes et Calcaires	2,10	2,30
<b>Moyenne</b>			<b>2,15</b>	<b>2,34</b>

**Tableau 17 : Conductivité thermique et capacité thermique volumique des roches traversées jusqu'à 110 m**

Les résultats obtenus sont les suivants :

- conductivité thermique moyenne de 2,15 W/m.K (gamme entre 1,75 et 3,74 W/m.K),
- capacité thermique volumique moyenne de 2,34 MJ/m<sup>3</sup>.K (gamme de 2,04 à 2,62 MJ/m<sup>3</sup>.K),
- flux géothermique, évalué à 0,10 W/m<sup>2</sup>.

Un TRT a été réalisé pour évaluer précisément les paramètres thermiques du sous-sol. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous. Ces données sont celles qui seront utilisées pour le dimensionnement.

Température initiale moyenne du terrain T0	Resistance équivalente de la Sonde Rb (K/W.m <sup>-1</sup> )	Conductivité thermique moyenne (W/m.K)	Capacité thermique volumique moyenne (MJ/m <sup>3</sup> .K)
13,27	0,093	1,76	2,35

**Tableau 18 : Résultat du test de réponse thermique (TRT)**

**La température initiale du sous-sol est de 13,27 °C d'après le TRT.**

## 8.3. Modélisation du champ de sondes

### 8.3.1. Modèle utilisée

Les simulations ont été menées à l'aide du logiciel EED pour un fonctionnement sur 50 ans. Le logiciel EED permet de définir le dimensionnement d'un champ de sondes (le nombre de sondes, la géométrie du champ de sondes et la profondeur) en fonction des données énergétiques mensuelles, les puissances installées et les demandes en pointe.

Le logiciel donne l'évolution de la température au niveau des sondes en fonction du temps. Deux graphiques sont fournis représentant :

- l'évolution maximum et minimum de la température au niveau des sondes pour chaque année,
- l'évolution mensuelle de ces mêmes températures uniquement pour la 25<sup>ème</sup> année.

Le champ de sondes modélisé comporte des unités en polyéthylène de type « Double U » (cf. Figure 16). Le champ de sondes est dimensionné pour respecter la température minimum de  $-3^{\circ}\text{C}$  avec de l'eau glycolée et au maximum de  $+40^{\circ}\text{C}$ .

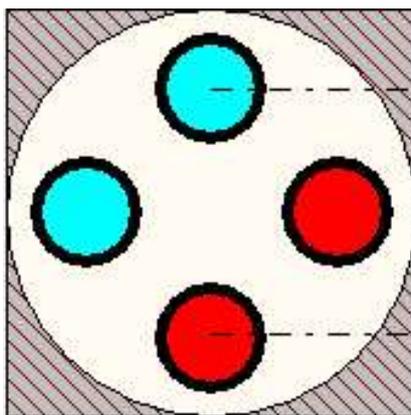


Figure 16 : Sonde verticale en Double U

*Remarque : le logiciel EED estime une température moyenne entre l'entrée et la sortie de la pompe à chaleur. Pour en déduire la température maximale effective atteinte, il convient d'ajouter  $2^{\circ}\text{C}$  environ à la température maximale renseignée sur les graphiques présentés. La température limite du champ de sonde modélisée par EED devient alors  $-1^{\circ}\text{C}$ .*

### 8.3.2. Hypothèses utilisées pour la modélisation

#### 8.3.2.1. Données énergétiques

Les puissances fournies par la STD ont été traitées afin de déterminer les énergies mensuelles et prendre en compte le COP de la PAC. Pour ce dimensionnement, il n'a pas été considéré de coefficient de rendement des besoins énergétiques calculés par la STD (pertes liées à la distribution par exemple).

En mode chaud, les puissances supérieures à 460 kW ne sont pas traitées par la géothermie. Le bilan énergétique en mode chaud intègre uniquement les besoins de puissances jusqu'à 460 kW.

Un COP moyen de 3,6 sera pris en compte. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Mois	Energie mensuelle (MWh) - chaud	Puissance de pointes (KW) - chaud	Heures cumulées de pointes (h) en mode chaud	Energie mensuelle (MWh) - Froid	Puissance de pointes (KW) - Froid	Heures cumulées de pointes (h) en mode Froid
Janvier	178,25	332	8	0	0	0
Février	104,34	332	6	0	0	0
Mars	133,62	332	4	0	0	0
Avril	26,79	0	0	0	0	0
Mai	20,61	0	0	0,73	89	4
Juin	6,23	0	0	4,26	89	6
Juillet	1,29	0	0	1,47	89	8
Août	0	0	0	0	0	0
Septembre	7,37	0	0	1,23	89	4
Octobre	6,17	0	0	0,13	0	0
Novembre	122,91	332	4	0	0	0
Décembre	125,65	332	8	0	0	0
<b>Total</b>	<b>733,21</b>	-	<b>30</b>	<b>7,83</b>	-	<b>22</b>

Tableau 19 : Hypothèses énergétiques et de puissance utilisée dans le modèle

Note : on suppose que les besoins mensuels sont similaires pour chaque année de la simulation.

### 8.3.2.2. Caractéristiques du sous-sol

Les principales hypothèses retenues pour les simulations thermiques sous EED sont présentées dans le Tableau 20.

Paramètre	Choix du paramètre
Profondeur maximale des sondes	108 m
Diamètre de foration	152 mm
Diamètre des tubes PEHD	32 mm
Flux géothermique	0,10 W/m <sup>2</sup>
Température initiale du sous-sol	13,27 °C
Conductivité thermique moyenne du sous-sol	1,76 W/m.K
Chaleur spécifique volumique du sous-sol	2,35 MJ/m <sup>3</sup> .K
Conductivité de la cimentation	2,0 W/m.K
Résistance équivalente de la sonde R <sub>b</sub>	0,093 K/W/m
COP de la PAC en production de chaleur	COP de 3,6
Fluide caloporteur	Eau glycolée

Tableau 20 : Principales hypothèses pour la simulation du champ de sondes sèches

### 8.3.3. Résultats de la modélisation

En se basant sur le scénario présenté précédemment, la température limite dans le champ de sondes citée précédemment (-1 °C soit - 3°C en sortie d'évaporateur) est vérifiée avec :

- Un champ de sondes de 92 unités de 108 m de profondeur,
- Espacement de 13 mètres,
- Un linéaire de sonde total de **9936 mètres**.

La Figure 17 présente l'évolution de la température du fluide dans les sondes pour 50 années de fonctionnement.

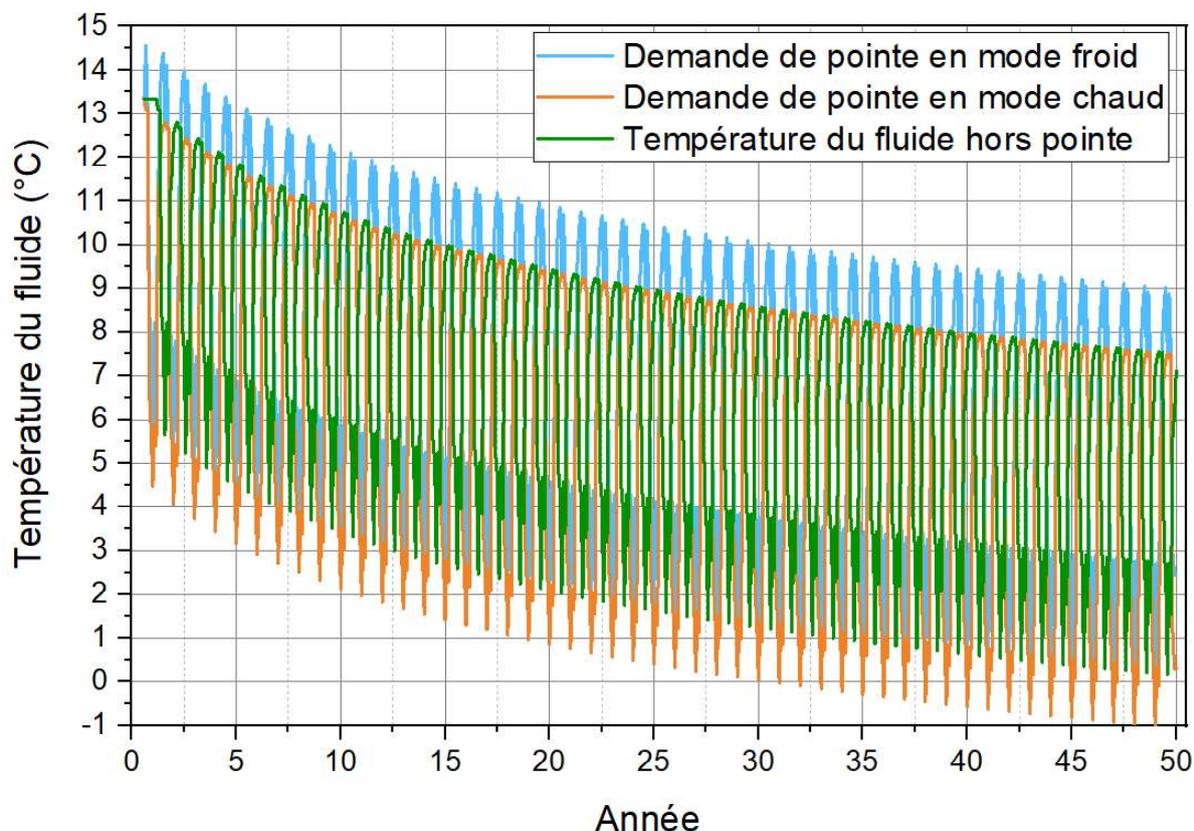


Figure 17 : Evolution de la température moyenne et de pointe dans les sondes

La température du fluide caloporteur est au minimum de -1 °C et au maximum de 14,6 °C, ce qui est conforme aux prescriptions réglementaires et dans la gamme d'usage des sondes géothermiques (gamme -3 / 40 °C). La dernière année de simulation, la température du fluide est comprise entre -1 et 8,9 °C.

La durée de stabilisation de la température du fluide est longue. Ce phénomène s'explique par le très faible besoin de froid qui ne permet pas au champ de sondes de se « recharger ».

Le débit de circulation de pointe par sonde sera de l'ordre de 0,55 m<sup>3</sup>/h, soit un débit total de 50,6 m<sup>3</sup>/h pour un delta T de 6 °C. Avec ce delta T, le débit unitaire par sonde est faible, généralement il est recommandé un débit de 0,8 m<sup>3</sup>/h à 1 m<sup>3</sup>/h.

### 8.3.4. Implantation prévisionnelle des sondes

Le projet de sondes géothermiques est tenu de respecter les prescriptions générales listées dans l'arrêté du 25 juin 2015, notamment celles qui concernent les conditions d'implantation des sondes (cf. 6.1.2). Les sondes étant cimentées sur toute leur hauteur, les risques de transferts seront inexistantes.

Paramètre	Distance des sondes
Distance entre les sondes (d'après la modélisation)	13 m
Limites de propriétés	5 m
Arbres	3 à 5 m
Fondations (préconisation BRGM)	3 m
Réseau assainissement	5 m
Conduite hydraulique	1,5 m

Tableau 21 : Distance à respecter pour l'implantation des sondes

Les sondes ont été implantées en respectant un espacement de 13 m. La Figure 18 présente l'implantation potentielle pour le scénario simulé. Il s'agit d'une implantation prévisionnelle au stade APD. Cette implantation tient compte des contraintes environnementales du site.

**Cette proposition d'implantation n'est pas définitive. L'implantation définitive devra être validée lors des phases ultérieures de conception et en fonction des contraintes ou des évolutions du projet.**

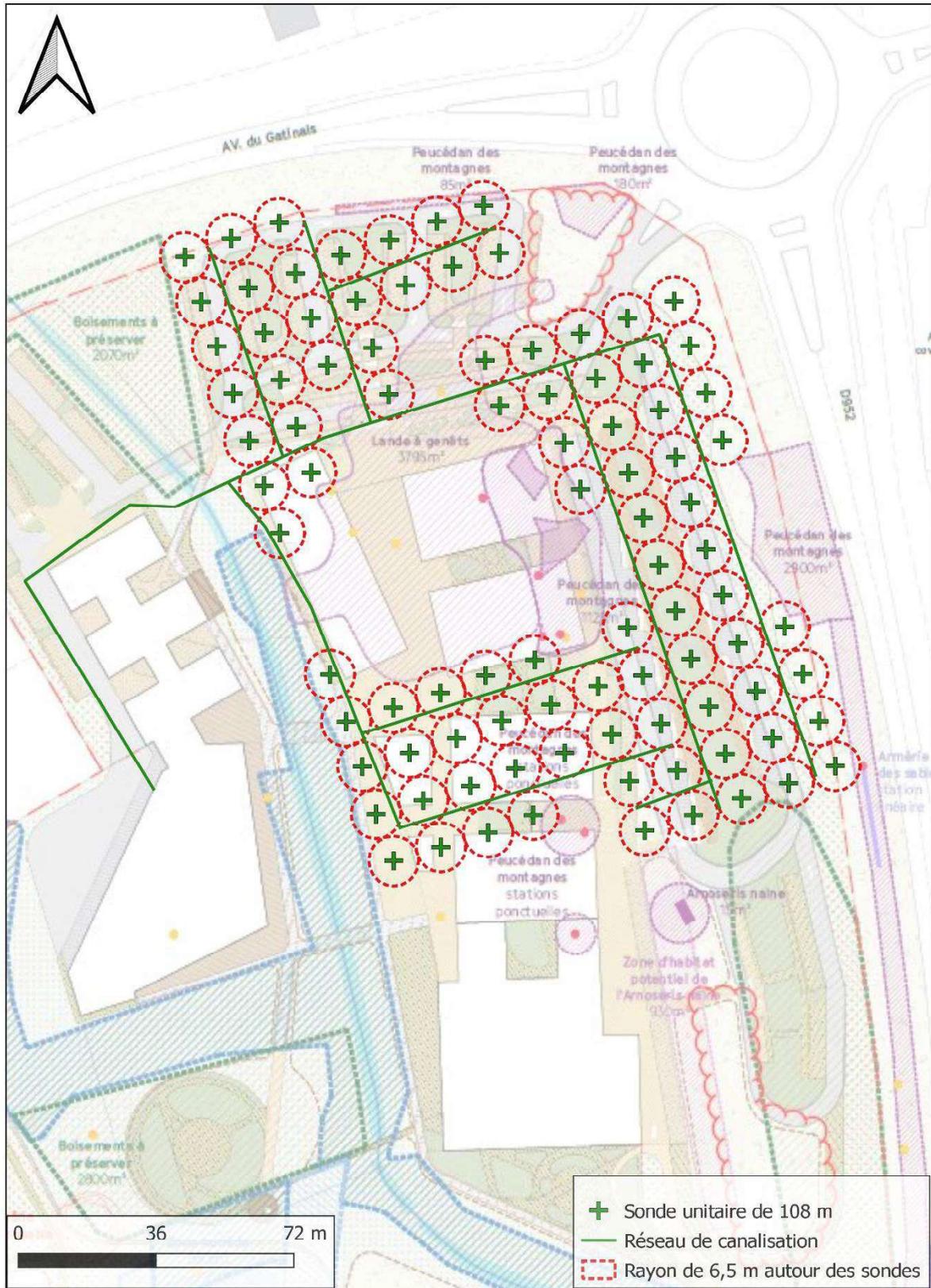


Figure 18 : Proposition d'Implantation des 92 sondes géothermiques verticales (SGV)

## 8.4. Estimation budgétaire du projet de géothermie

### 8.4.1. Enveloppe budgétaire

Le budget au stade APD ne comprend pas les volumes de ciment supplémentaire qui pourraient être nécessaire en cas de cavités importantes. Des pertes lors de la foration de la sonde TEST ont été notées par l'entreprise. Le budget ne tient pas compte de la réutilisation de la sonde TEST.

Le tableau suivant permet de détailler l'enveloppe budgétaire :

Désignation – 92 sondes de 108 m, soit 9936 mL	Prix (€ HT)
Réalisation de la sonde TEST et du TRT	Déjà réalisée
Installation du chantier pour les travaux définitif (hors aménagement spécifique ou plateforme de travaux)	39 100
Travaux du champ de sondes, cimentation y compris essais de pression	918 120
Raccordement du champ de sondes y compris de la sonde TEST (en fonction des contraintes du site, hors gestion des enrobés amianté, chemin d'accès et à valider en fonction de l'implantation retenue) – base de 1000 mL	384 000
Equipement, collecteur, raccordement collecteur, remplissage fluide caloporteur, et essai de mise en service	40 000
<b>Total prévisionnel (€ HT) – <u>SANS AIDE FINANCIERE</u></b>	<b>1 381 220</b>

**Pour un linéaire de 9936 m, le coût de la création d'un champ de sonde serait de l'ordre de 1 381 220 euros HT hors ingénierie.**

Ces éléments de chiffrage supposent :

- un accès libre aux sites de forage,
- la fourniture d'eau pour les essais de pression,
- un terrain nu (absence de bitume) et sans réfection de parking,
- l'absence de dévoiements de réseaux,
- sans présence d'amiante et HAP dans les enrobés.

Les installations géothermales de surface (PAC, échangeur de chaleur et autres) ne sont pas prises en compte dans cette estimation.

En fonction des accès et des spécificités du projet, il est possible d'avoir des variations de prix de plus ou moins 10 %. Ce montant peut également fortement varier en fonction du marché local.

### 8.4.2. Coût d'exploitation

La maintenance de ce type d'installation est très limitée. Il convient uniquement de vérifier le niveau de glycol (fluide caloporteur circulant dans les sondes et la PAC) et le bon fonctionnement des pompes de circulation. Il est possible de prévoir un budget de fonctionnement pour le remplacement des petits équipements.

Désignation	Prix moyen/an – solution sur sonde
P1 – Circulateur sondes (estimation de 14,5 MWh/an pour les pompes de circulation)	1 600 euros /an
P2 – Contrat de maintenance annuel	1 000 euros / an
P3 – Régénération et remplacement (hors PAC)	2 000 euros /an
<b>Total prévisionnel (€ HT) du cout d'exploitation et maintenance</b>	<b>4 600 euros / an</b>

**Le montant du fonctionnement, de la maintenance/entretien et des provisions (hors PAC) serait de l'ordre de 4 600 €/an.** Cette gamme de prix ne tient pas compte de la partie PAC et distribution.

## 9. Bilan économique des solutions

### 9.1. Demande de subvention auprès de l'ADEME

Il est possible d'obtenir une aide de l'ADEME « Fonds Chaleur Renouvelable ». Celle-ci a pour but de soutenir la production de chaleur à partir de sources d'énergies renouvelables et de récupération. Elle concerne l'habitat collectif, le tertiaire, l'industrie et l'agriculture.

L'obtention d'une subvention est possible pour des besoins en chaud, en froid et en Géocooling. Cette aide impliquera pour le demandeur de mettre en place un suivi et une évaluation des performances de l'installation ainsi que la souscription d'un contrat d'entretien de l'ensemble des installations.

Les parties suivantes présentent les aides forfaitaires pour les installations de PAC produisant de la chaleur ou du froid sur nappe ou sur sonde à une profondeur < 200 m.

#### 9.1.1. Géothermie sur nappe pour la production de chaud et de froid

Technologie	Production de CHAUD	Production de FROID
	Aide forfaitaire en €/MWh EnR/an (sur 20 ans)	Aide forfaitaire en €/MWh EnR/an (sur 20 ans)
PAC sur nappe et géostructures énergétiques	25 €/MWh EnR	13 €/MWh EnR

Tableau 22 : Montant de l'aide ADEME pour une PAC sur nappe (ADEME)

Les conditions d'éligibilité sont les suivantes pour la PAC sur nappe (< 200 m) :

- Production de l'installation comprise entre 25 MWh EnR/an ;
- Respect de la réglementation relative au sous-sol et aux milieux naturels ;
- Respect des normes pour les forages d'eau et de géothermie (NFX 10-999) ;
- Evaluation préalable du potentiel de la nappe et étude d'impact thermique sur la ressource,
- Réinjection du fluide géothermal extrait dans l'aquifère d'origine ;
- Pour les PAC destinées au chauffage ou au chauffage et à la production d'ECS :
  - COP machine égal ou supérieur à 4 pour les PAC « électriques » (mesuré pour les conditions de température prévues selon la norme européenne EN 14511-2 en régimes de températures 0/-3 °C et 30/35°C) ;
  - SCOP global annuel minimum de 3 dans les conditions d'application du projet ;
- Mise en place de compteurs thermiques et électrique.

#### 9.1.2. Géothermie sur sondes pour la production de chaud et de froid

Technologie	Production de CHAUD	Production de FROID
	Aide forfaitaire en €/MWh EnR/an (sur 20 ans)	Aide forfaitaire en €/MWh EnR/an (sur 20 ans)
PAC sur sondes et géostructures énergétiques	50 €/MWh EnR	13 €/MWh EnR

Tableau 23 : Montant de l'aide ADEME pour une PAC sur sondes (ADEME)

Les conditions d'éligibilité sont les suivantes pour la PAC sur nappe (< 200 m) :

- Production minimum de l'installation 25 MWh EnR/an ;
- Respect de la réglementation relative au sous-sol (Qualiforage Module Sonde) ;
- Respect des normes NFX 10-960-1, 10-960-2, 10-960-3, 10-960-4, et 10-970 relatives à la mise en place de sondes géothermiques ;
- Pour les PAC destinées au chauffage ou au chauffage et à la production d'ECS :
  - COP machine égal ou supérieur à 4 pour les PAC « électriques » (mesuré pour les conditions de température prévues selon la norme européenne EN 14511-2 en régimes de températures 0/-3 °C et 30/35°C) ;
  - SCOP global annuel minimum de 3 dans les conditions d'application du projet ;
- Pour les PAC destinées à la production de froid :
  - EER machine égal ou supérieur à 3,6 pour les PAC « électriques » (mesuré pour les conditions de température prévues selon la norme européenne EN 14511-2 en régimes de températures 17/7 °C et 30/35°C) ;
  - SEER global annuel minimum de 3,3 dans les conditions d'application du projet ;
- Pour les projets avec une longueur cumulée de 1000 m, l'obligation de réaliser une sonde test et un test de réponse thermique (TRT). Si la production reste inférieure ou égale à 50 MWh EnR/an, la réalisation d'un TRT et d'une géomodélisation n'est pas obligatoire ;
- Mise en place de compteurs thermiques et électrique.

### 9.1.3. Rafrâichissement par Géocooling

Les opérations de géocooling sont également accompagnées par des aides forfaitaires pour une production de rafraîchissement inférieure à 2000 MWh EnR/an.

Technologie	Aide forfaitaire en €/MWh EnR/an (sur 20 ans)
< 2000 MWh EnR/an	13 €/MWh EnR
> 2000 MWh EnR/an	10 €/MWh EnR

**Tableau 24 : Montant de l'aide ADEME pour une PAC géothermique produisant du rafraîchissement par géocooling (ADEME)**

### 9.1.4. Evaluation de l'aide

Si le projet de géothermie respecte les critères d'éligibilités, une subvention de l'ADEME pourrait être demandée.

En supposant une énergie annuelle ENR de 530 MWh/an en chaud uniquement, **l'aide forfaitaire pourrait être de l'ordre de :**

- **260 000 euros pour une solution sur nappe,**
- **530 000 euros pour une solution sur sonde.**

**Le rafraîchissement par géocooling permettrait d'obtenir une aide de 2000 euros.**

Les montants indiqués permettent juste de comparer économiquement les solutions et d'avoir un ordre de grandeur. L'aide ADEME sera différente et il n'est pas possible de connaître le montant exact avant d'avoir réalisé le dossier de demande de subvention.

## 9.2. Synthèse des coûts de création des solutions

### 9.2.1. Comparatif de l'investissement et des coûts d'exploitation

Désignation	Champ de sondes de 9936 m Prix (€ HT)	Doublet sur nappe (2 forages) Prix (€ HT)
Investissement – création de la solution de géothermie (partie sous-sol)	1 381 220	550 670
P1 – Circulateur du fluide (pompe de circulation ou pompes immergées)	1 600	5 800
P2 – Contrat de maintenance annuel	1 000	4 000
P3 – Régénération et remplacement (hors PAC)	2 000	5 000
<b>Total prévisionnel au bout d'1 an de fonctionnement (€ HT) – SANS AIDE FINANCIERE</b>	<b>1 385 820</b>	<b>565 470</b>
<b>Total prévisionnel au bout d'1 an de fonctionnement (€ HT) – AVEC AIDE FINANCIERE</b>	<b>855 850</b>	<b>305 470</b>

Tableau 25 : Comparaison de l'investissement et des coûts d'exploitation des deux solutions de géothermie

### 9.2.2. Estimation du coût total au bout de 50 ans

Désignation	Champ de sondes de 9936 m Prix (€ HT)	Doublet sur nappe (2 forages) Prix (€ HT)
10 ans <u>avec aide ADEME</u>	897 220	448 670
30 ans <u>avec aide ADEME</u>	989 220	744 670
50 ans <u>avec aide ADEME</u>	1 081 220	1 040 670

Tableau 26 : Estimation du coût d'investissement et d'exploitation au bout de 50 ans

Au bout de 50 ans, le coût d'investissement et d'exploitation est très proche pour les deux solutions.

### 9.3. Garantie AQUAPAC

Il est possible de souscrire une assurance couvrant les aléas hydrogéologiques préalablement à la réalisation des travaux de forages (géothermie sur aquifère). Cette garantie s'applique en faveur des installations utilisant des pompes à chaleur d'une puissance supérieure à 30 kW, ce qui est bien le cas ici.

Elle permet, sous réserve de l'acceptation du dossier, de couvrir les travaux de forages selon des modalités ainsi que la pérennité de l'installation pour une période de 10 ans.

**En raison de l'hétérogénéité de la capacité de production des calcaires de Beauce dans le secteur, il est recommandé de souscrire à cette aide pour vérifier le potentiel de l'aquifère (réalisation d'un forage de reconnaissance).**

En cas de non découverte du débit escompté, le maître d'ouvrage est remboursé partiellement des dépenses engagées pour les forages moyennant le versement d'une prime d'assurance de 5% du montant des travaux de forages pour la garantie recherche, et de 4% pour la garantie pérennité.

Concernant la garantie recherche, les modalités de remboursement sont les suivantes :

- En cas d'échec total (débit trouvé inférieur à la moitié du débit contractuel) : la totalité du montant garanti est versée ;
- En cas d'échec partiel (débit trouvé compris entre la moitié du débit contractuel et le débit contractuel) : le montant de l'indemnité est proportionnel au déficit en eau sur le débit initial garanti. Le maître d'ouvrage peut exploiter la ressource et bénéficier alors de la garantie pérennité, en redéfinissant la nouvelle valeur du débit exploitable.

En cas de succès (débit trouvé supérieur ou égal au débit contractuel), le demandeur souscrit alors à la garantie de pérennité, accordée pour 10 ans.

**A noter que si le Maître d'Ouvrage veut souscrire une garantie AQUAPAC pour le forage de reconnaissance, le dossier de demande doit être réalisé avant la création du forage de reconnaissance. Le délai d'instruction des dossiers par AQUAPAC est de l'ordre de 4 à 5 semaines après la réunion du comité (BRGM, ADEME, EDF assisté de la SAF-Environnement).**

## 10. Déroulement et procédures

Antea Group rappelle que les résultats de cette étude proviennent de données bibliographiques et documentaires. Les délais estimatifs pour une solution sur aquifère ou sur sondes sont présentés ci-dessous.

### ➤ Solution sur sonde

Une sonde TEST a déjà été réalisée. Le dimensionnement proposé dans ce dossier tient compte de ces résultats.

### ➤ Solution sur nappe

Il conviendra de réaliser une étude de faisabilité couplée à la réalisation d'un forage de reconnaissance qui sera équipé en forage définitif pour lever les incertitudes et préciser certains éléments, à savoir :

- La géologie au droit du site ;
- La profondeur de la nappe, la température, la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau ;
- Les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe (transmissivité, emmagasinement, productivité),
- Le débit d'exploitation possible des ouvrages définitifs ;
- Le dimensionnement des ouvrages définitifs (diamètre, ouverture des crépines, ...)
- Les incidences du projet (modélisation hydrodynamique et thermique).

### ➤ Délai et procédure

Phase	Etape	Délai étude ou travaux	Délai administratif
Etude /Conception	Dossier ADEME (demande de subvention pour le forage de reconnaissance ou de la sonde TEST) et dossier AQUAPAC si souhaité par le MOA	3 à 4 semaines	1 à 2 mois
	Télédéclaration GMI	2 à 4 semaines	-
	Etude de faisabilité (PRO) et réalisation du forage de reconnaissance	1 à 2 mois	-
Travaux	Dossier ADEME (demande de subvention pour les travaux)	5 à 8 semaines	2 à 4 mois
	Maîtrise d'œuvre de la boucle primaire Préparation des travaux, consultation des entreprises	2 à 4 mois	-
	Création de la boucle primaire géothermale (forage et réseau et équipement ou sondes et réseau) – hors PAC (secondaire)	2 à 4 mois	Déclaration au code minier (1 semaine)
	Rapport de fin de travaux / DOE	1 à 2 mois	-

Tableau 27 : Délais estimatifs de la solution sur nappe ou sur sonde – cas d'un projet en GMI

## 11. Conclusion

Les besoins de puissance et énergétiques du projet ont fortement évolué depuis la réalisation de la sonde test et du TRT. A ce stade, la demande de l'équipe de conception indique un besoin de puissance de 460 kW en mode chaud et 89 kW en mode froid. En mode chaud, la géothermie couvrira 85 % des besoins énergétiques et 100 % des besoins de froid en géocooling.

L'examen du contexte géologique, hydrogéologique, environnemental et réglementaire au droit du projet montre qu'**une solution de géothermie sur nappe ou sonde est possible.**

**Concernant la solution sur nappe**, l'exploitation du potentiel géothermique pourra se faire par l'intermédiaire de 2 ouvrages (un puits de pompage et un puits de réinjection) d'environ 50 m de profondeur. L'étude de faisabilité permettra de statuer sur le nombre exact d'ouvrages nécessaires. L'implantation est prévisionnelle et elle est fonction du sens d'écoulement de la nappe et des contraintes environnementales au droit du projet. L'espacement entre les forages est de 195 m environ. Il conviendra également d'être vigilant sur l'impact de la réinjection des eaux, qui devra également être étudié de manière plus approfondie afin d'anticiper les désordres constructifs (remontée de nappe, étanchéification du radier du dernier niveau de sous-sol, etc.). Les analyses d'eau disponibles aux captages AEP de Châteauneuf-sur-Loire indiquent un contexte hydrochimique favorable à l'usage d'une géothermie sur nappe. Toutefois, une analyse d'eau devra être réalisée en phase de faisabilité pour vérifier ce point et prévoir, si nécessaire, les mesures de protection et de limitation de ce risque. Le dimensionnement proposé prévoit déjà la mise en place d'un système de filtration et de rétrolavage pour limiter ce risque.

**Concernant la solution sur sonde**, le dimensionnement proposé tient compte des résultats de TRT. Il est proposé de mettre en place 92 sondes de 108 m, soit un linéaire total 9936 m. Les contraintes environnementales entraînent une implantation couvrant une grande partie du secteur Nord du projet. **La présence des sondes et des tranchées va entraîner une forte contrainte pour la phase de travaux de construction.**

La solution sur nappe est économiquement la plus intéressante en termes d'investissement. Le budget est estimé à 550 650 euros HT pour une solution sur nappe (2 forages de 50 m, équipements et réseau) contre 1 381 220 euros HT pour une solution sur sonde (92 sondes de 108 m). Par contre, en intégrant les coûts d'exploitation et les aides du fond chaleur, la différence n'est plus aussi nette. En effet, les budgets sont quasi similaires avec toutefois un coût légèrement moins important pour la solution sur nappe.

**La solution sur sondes n'est pas compatible avec la disposition du SDAGE 6E-4.** Le code minier et en particulier la GMI indique que le projet doit être compatible avec les documents de planification (SAGE, SDAGE). Cette solution nécessite la création de 92 forages alors que la solution sur nappe n'entraîne que 2 forages. **La solution de géothermie à retenir est donc la solution sur nappe.** La capacité de production de la nappe devra toutefois être vérifiée avec la réalisation d'un forage de reconnaissance.

Enfin, le projet est situé dans une zone classée « orange » dans la cartographie des zones relatives à la géothermie minimale importance prévue à l'article 22-6 du décret 2006-649 du 2 juin 2006. Malgré l'avis existant de Téliosia étudiant la solution sur sonde, un second avis d'expert pourrait être demandé pour l'implantation d'un forage de géothermie sur nappe en zone orange. Antea Group est qualifié pour faire cet avis.



# ANNEXE

## Annexe 1 : Equations utilisées pour évaluer le taux de recyclage thermique

Le taux de recyclage thermique est fonction de la vitesse d'écoulement régionale de la nappe et de l'orientation de l'axe du doublet par rapport à cet écoulement. Ainsi, la vitesse de Darcy est calculée telle que :

$$V_D = \frac{T}{e} i$$

et le débit réduit, proportionnel au rapport du flux induit par un doublet sur le flux résultant de l'écoulement régional, est calculé tel que :

$$Q_r = 2 \frac{Q}{V_D \cdot D \cdot e}$$

Ainsi à partir de l'angle  $\alpha$  et du débit réduit  $Q_r$ , le taux de recyclage thermique est déduit sur l'abaque  $I = f(\alpha, Q_r)$  tirée du rapport du BRGM 82-SGN-023-EAU (Ausseur et al. 1982).

La température de stabilisation peut être calculée à partir du taux de recyclage telle que :

$$\theta_s = \theta_p + \frac{I}{100} (\theta_r - \theta_p)$$

*Influence de l'écoulement régional sur le taux de recyclage thermique (en fonction de  $Q_r$  et de  $\alpha$ )*

