
Communauté d'agglomération de Lisieux Normandie

Réalisation d'une étude de faisabilité pour la mise en place d'une pompe à chaleur sur aquifère superficiel pour le centre aquatique de Saint-Pierre-en-Auge (14)

Modélisation mathématique des potentialités d'exploitation géothermiques

 ECOME Ingénierie 10, rue de Chevreul 92150 Suresnes Tél. : 09.81.71.06.02	 Lisieux Normandie Communauté D'agglomération 11 rue au Char CS 26020 14106 Lisieux CEDEX Tél. : 02.31.61.66.00
--	---

Phase	Date	Version	Révision	Réalisé par	Revu par	Validé par
PROG	11/09/2018	A		LLB	QS	BG

SOMMAIRE

1	Préambule.....	3
2	Résumé.....	3
3	Présentation du projet	3
3.1	Besoins thermiques et besoins en eau.....	3
3.2	Pompe à chaleur sur nappe.....	4
4	Emplacement du projet.....	5
5	Contexte hydrogéologique.....	6
6	Modélisation mathématique.....	7
6.1	Code de calcul.....	7
6.2	Données utilisées	7
6.3	Lacunes d'informations et limites de la modélisation	7
6.4	Géométrie du modèle	8
6.5	Maillage	9
6.6	Caractéristiques hydrodynamiques.....	10
6.7	Caractéristiques thermiques	10
6.8	Conditions aux limites	11
6.8.1	Hydraulique	11
6.8.2	Températures	11
6.9	Piézométrie d'équilibre	12
6.10	Simulation de l'impact thermique du projet.....	12
6.10.1	Evolution temporelle.....	13
6.10.2	Evolution spatiale	14
6.10.3	Conclusions - Incertitudes	15

1 Préambule

La communauté d'agglomération Lisieux-Normandie souhaite créer un équipement aquatique sur le territoire de Saint Pierre en Auge.

A cet effet, il a été demandé à la société ECOME d'analyser les potentialités géothermiques du site.

Les besoins annuels en chauffage devant être couverts par la géothermie sont proches de 1 500 MWh/an, considérant un COP de 4,1, l'énergie nécessaire en entrée de pompe à chaleur sera proche de 1 200 MWh/an. Aussi, considérant un delta de température de 6 °C avec une puissance instantanée de 350 kW (entrée de PAC) et 460 kW (sortie de PAC), un débit de 50 m³/h et un volume d'eau de nappe proche de 170 000 m³/an seront nécessaires à ce projet.

Le présent document constitue la modélisation mathématique des futures installations géothermiques. Elle permet ainsi de vérifier la compatibilité des besoins du projet au regard des capacités hydrogéologiques et thermiques de la nappe.

2 Résumé

Le modèle mathématique représentant les écoulements souterrains dans le calcaires bathoniens a permis de mieux dimensionner les caractéristiques d'un doublet géothermique.

La simulation montre la quasi absence de recyclage thermique, il est d'environ oscille entre - **0,3°C** sur 20 ans d'exploitation. Ceci pouvant générer une **diminution de la puissance instantanée en sortie de PAC de 6,0%** à 20 ans.

Par contre il est noté que la température simulée à 200m en aval du point de rejet, pourrait baisser de 4,6°C, alors que le réglementation limite cette baisse à 4°C à 200m. Il conviendrait donc de diminuer le delta de température entre entrée et sortie de PAC, ceci engendrera une augmentation potentielle du débit de pompage pour obtenir la même puissance de chauffage

Même si le résultat est engageant, des incertitudes demeurent sur le gradient d'écoulement précis de la nappe, ceci introduit des incertitudes dans les résultats du modèle. L'information optimale serait obtenue par la réalisation de forages de reconnaissance, de façon à obtenir une information précise sur le sens d'écoulement et sur le gradient hydraulique.

Fort de ces mesures, une modélisation complémentaire pourrait alors être réalisée permettant de calculer avec précision le potentiel recyclage thermique entre le forage de rejet et le forage de pompage.

3 Présentation du projet

3.1 Besoins thermiques et besoins en eau

L'eau souterraine sera utilisée pour les besoins en chauffage uniquement.

Concernant les besoins en chaleur (Tableau 1), ceux-ci sont de 1 200 MWh par an (besoins avant prise en compte du COP de la pompe à chaleur) et de 1 564 MWh en sortie de PAC (avec un COP de 4,1).

Il a été considéré un pompage moyen de 50 m³/h, avec un delta de température de 6°C. La température initiale de la nappe étant estimée à 12°C, le rejet est effectué à 6 °C. Ceci permet de fournir une puissance instantanée de 460 kW en sortie de PAC.

Ceci nécessite le pompage de 170 000 m³/an d'eaux souterraines.

Tableau 1 – Energies et volumes pompés

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Total
Heures pompage/ jour :	18.07	15.87	13.17	9.07	5.43	3.74	2.75	2.93	4.74	6.42	13.09	16.64	
Volume pompé (m ³ /mois):	28009	22615	20414	13605	8417	5610	4263	4542	7110	9951	19635	25792	169960
Energ. extrait nappe (MWh)	194.9	157.4	142.1	94.7	58.6	39.0	29.7	31.6	49.5	69.3	136.7	179.5	1182.9

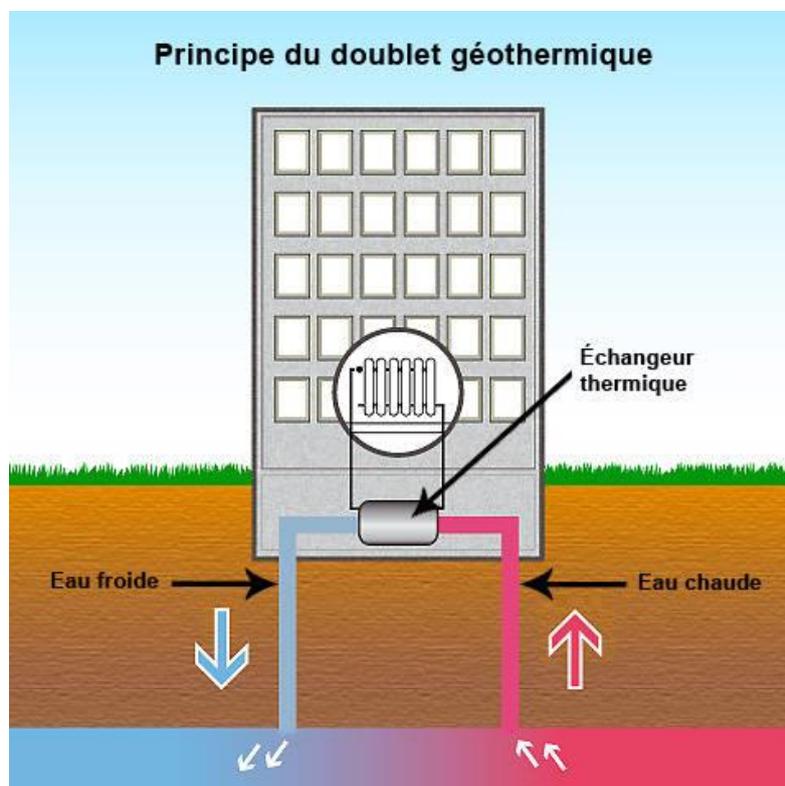
3.2 Pompe à chaleur sur nappe

Le procédé utilisé est celui de la géothermie très basse énergie. Pour cela, des doublets géothermiques sont utilisés, comprenant :

- un forage de pompage de l'eau ;
- un ou plusieurs forages de rejet de l'eau dans lesquelles des calories ont été extraites (cas d'un chauffage de locaux) ou bien ajoutées (cas d'un refroidissement de locaux).

Dans le cas du chauffage (Figure 1), un forage de production amène de l'eau chaude à la surface au moyen d'une pompe immergée, un échangeur de chaleur ainsi qu'une pompe à chaleur disposée en aval permettent d'obtenir la température de chauffage désirée. Le circuit de chauffage alimente le consommateur par une conduite de chauffage à distance. L'eau refroidie est restituée à l'aquifère par un forage d'injection.

Figure 1 – Schéma de principe d'utilisation de la chaleur des eaux souterraines



4 Emplacement du projet

Le site est localisé sur la commune de Saint Pierre sur Auge, au sud-est du centre-ville (Figure 3). Le site est localisé autour de la cote +45 m NGF. Les coordonnées moyennes du site (Lambert II étendu) sont : X= 426992m et Y= 2 448968m.

Figure 2 – Localisation du projet sur fond de plan aérien

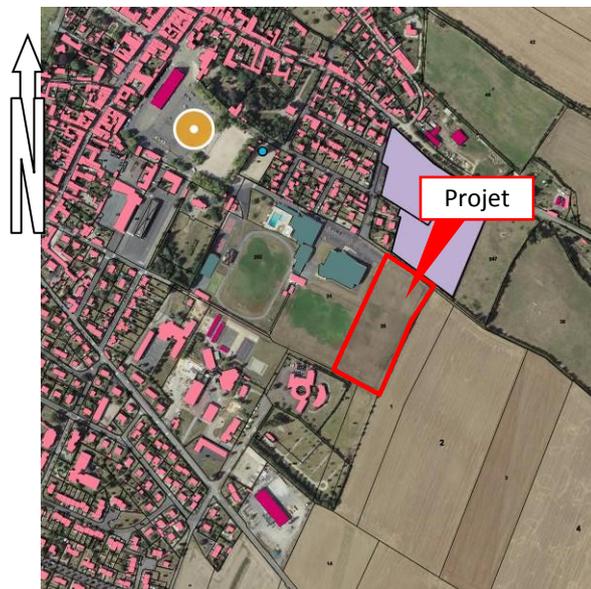
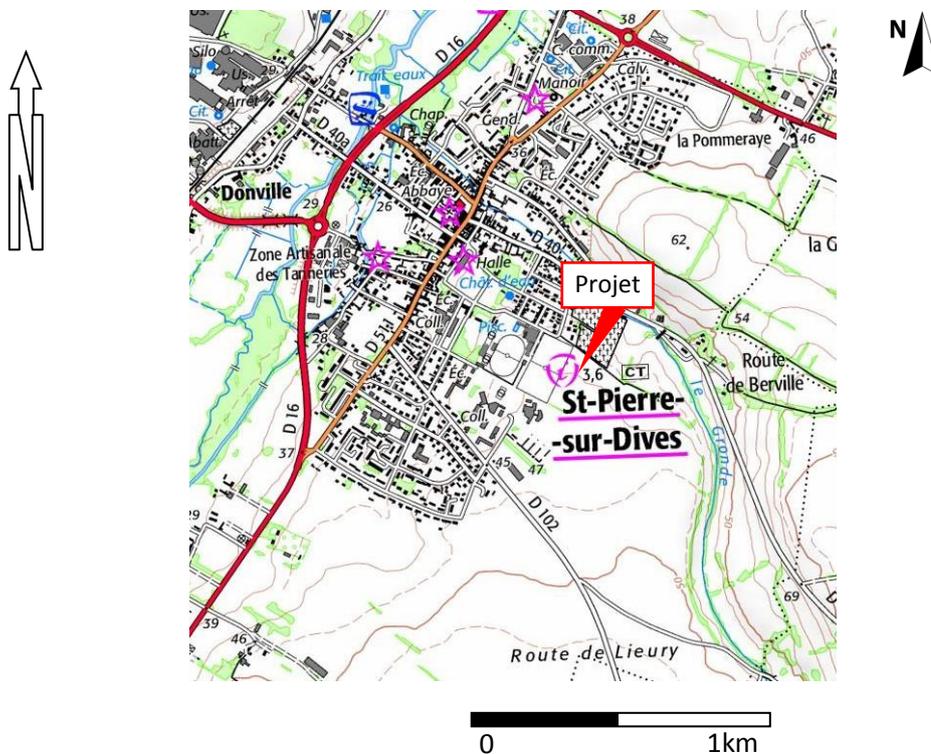
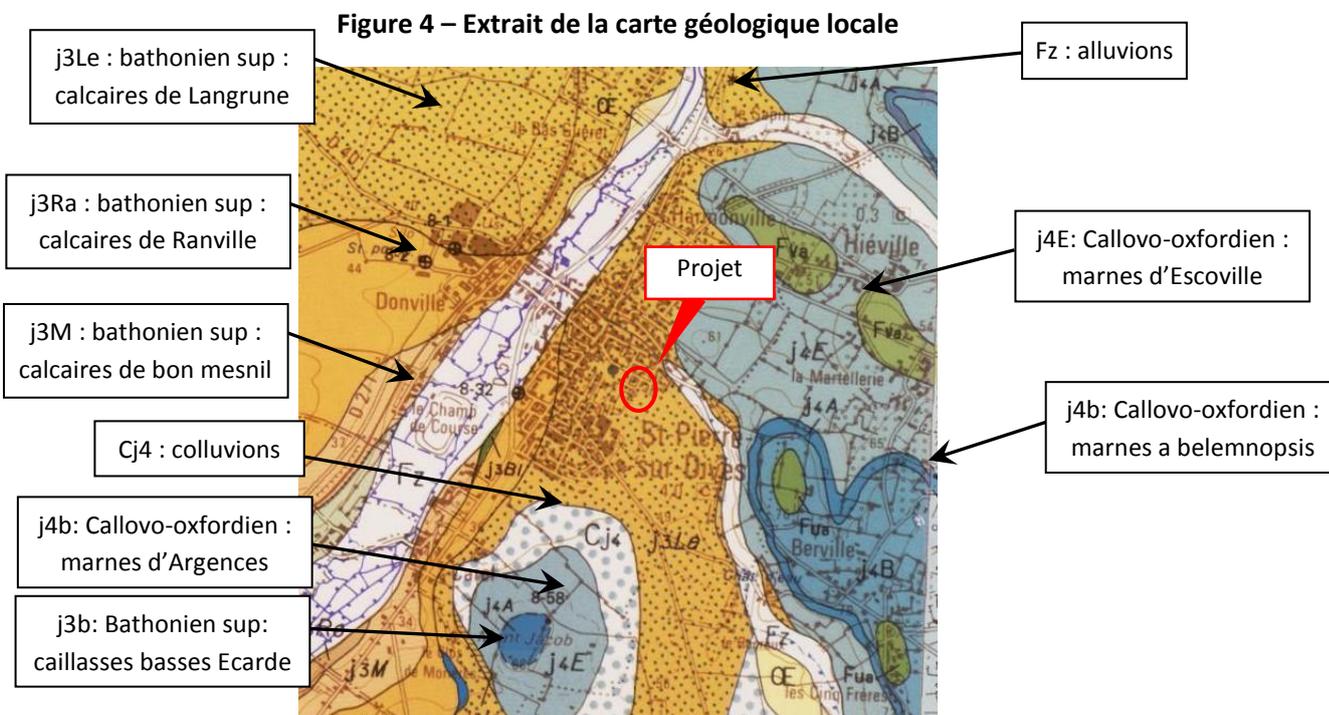


Figure 3 – Localisation du site sur fond de carte IGN



5 Contexte hydrogéologique

La carte géologique au 1/50 000^{ème} de la zone montre que le projet est inclus dans les formations des calcaires de Langrune (j3Le).



D'après la carte géologique au 1/50000^{ème} ed. BRGM

En fonction des données des forages proches, il est possible de déterminer la coupe géologique :

- 42 – 28 mNGF (0 – 14m) : calcaires de Langrune (Bathonien supérieur) ;
- 28 – 26 mNGF (14 – 16m) : caillasses de la basse Ecarde (Bathonien supérieur) ;
- 26 – 18 mNGF (16 – 24m) : calcaires de Ranville (Bathonien supérieur) ;
- 18 – 4 mNGF (24 – 38m) : calcaires de Blainville (Bathonien moyen) ;
- 4 – <-10 mNGF (38 – >52m) : calcaires de Rouvres (Bathonien moyen).

Une incertitude persiste sur les épaisseurs réelles de chacune des formations, des variations locales sont possibles au gré des perturbations géologiques

Aussi, le présent modèle sera axé sur la reconstitution des écoulements souterrains dans les calcaires Bathoniens.

6 Modélisation mathématique

L'objectif est de représenter les écoulements souterrains au droit du site, et ensuite de simuler l'exploitation d'un doublet géothermique (pompage + rejet d'eaux dans la même nappe).

Le critère limitant est l'importance du recyclage thermique qui se traduit par le retour des eaux rejetées vers le forage de pompage, induisant une perturbation progressive de sa température, rendant moins efficace la pompe à chaleur associée au doublet géothermique.

6.1 Code de calcul

Le code de calcul utilisé pour la présente modélisation est FEFLOW (version 6.0), utilisé sous environnement Windows et développé par la société WASY.

Ce code travaille en éléments finis et permet la modélisation des écoulements souterrains en zone saturée et non saturée avec prise en compte de polluants divers et de phénomènes d'adsorption/retard et de dégradation.

Les calculs hydrodynamiques et thermiques ont été réalisés en méthode numérique convergente.

6.2 Données utilisées

Les données utilisées dans le modèle sont :

- extrait des cartes topographiques locales au 1/25000^{ème} ;
- extrait des cartes géologiques locales au 1/50000^{ème} ;
- coupes géologiques des forages existants dans un rayon de 2 km autour du projet ;
- niveau supposé de la Dives et de son affluent ;
- données de consommation prévues sur le site pour la géothermie.

6.3 Lacunes d'informations et limites de la modélisation

La précision et la représentativité de la modélisation mathématique dépendent de la précision de la connaissance du contexte géologique, hydrologique, hydrogéologique. A ce stade bibliographique des études, des données affectant le réalisme de la modélisation, sont manquantes ou imprécises :

- les paramètres hydrodynamiques et hydrodispersifs de l'ensemble des formations géologiques prises en compte ne sont pas connus au droit du site mais à proximité. D'autre part, les données sur la porosité cinématique, la porosité totale et l'emmagasinement captif sont très parcellaires. Enfin les paramètres liés à la dispersion longitudinale et latérale ne sont pas du tout appréhendés ;
- les données piézométriques ne sont pas complètes. En effet, aucune information actualisée n'est existante sur la position de la nappe. Des doutes subsistent sur le sens d'écoulement précis de la nappe au droit du site et surtout sur son gradient ;
- les cotes topographiques sont seulement connues selon la précision de la carte IGN au 1/25000^{ème}, ainsi des erreurs d'approximation de l'altitude sont possibles en des endroits sensibles telles que les fonds de vallée, où des relations nappe-rivière sont présentes ;
- les changements de faciès des roches sous-jacentes sont de type lenticulaire ; des changements latéraux et verticaux de faciès sont probablement présents. De même, le degré

de fracturation des roches saines engendre des variations locales de comportement hydraulique. Ce sont donc autant de variations possibles des paramètres hydrodynamiques ;

- Enfin, les relations hydrauliques entre la nappe et la Dives peuvent être partiellement limitées par la présence de formations plus ou moins argileuses dans les alluvions.

Malgré l'aspect lacunaire de certaines informations, la modélisation a été réalisée de façon à être la plus représentative possible des conditions locales et elle reconstitue les mouvements de l'eau autour des potentiels ouvrages d'exploitation.

6.4 Géométrie du modèle

Le modèle a été étendu de façon à rencontrer en partie des limites hydrogéologiques naturelles et surtout afin que les pompages qui vont être simulés au droit du projet ne soient pas affectés par les bordures imposées du modèle.

Ainsi, il est limité à l'ouest par le cours de la Dives, au nord et à l'est par le cours de la Gronde. La partie sud est limitée par une ligne piézométrique.

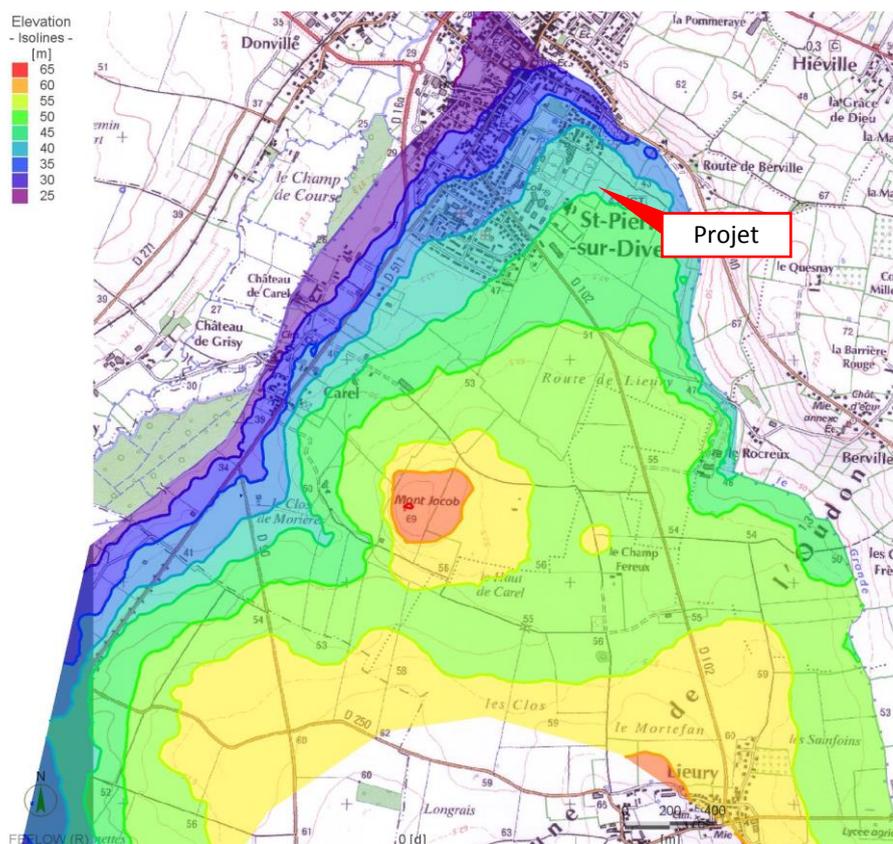
Le modèle contient les interfaces numériques (interfaces de calcul) suivantes, de haut en bas :

- interface 1 : cote du sol ;
- interface 2 : base théorique des formations bathoniennes donc l'épaisseur a été artificiellement fixée à 70m sous le sol.

Ceci détermine une couche de terrain : les calcaires bathoniens intégrant les minces couches de marnes et caillasses, ceci supposé former un ensemble homogène.

La cote du sol a été déduite des données topographiques.

Figure 5 – Cotes du sol entrées dans le modèle



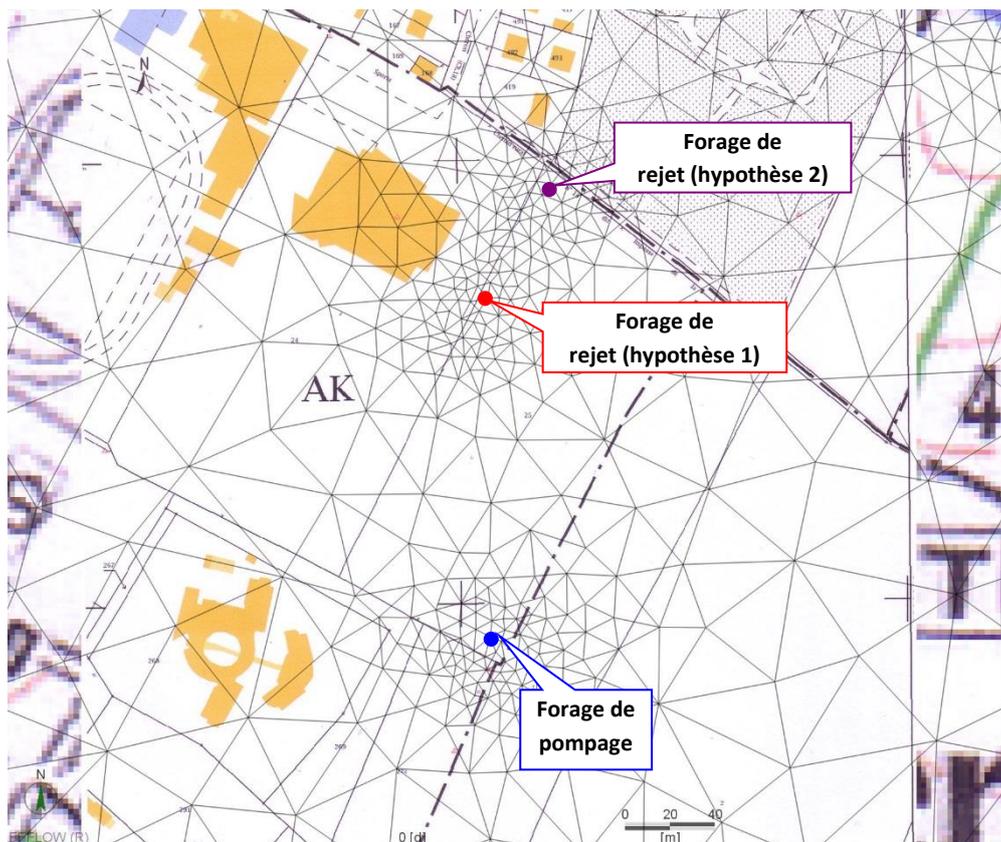
6.5 Maillage

Le code de calcul utilise la méthode des éléments finis. Le maillage est de type triangulaire et les informations sont calculées au droit du centre des nœuds des triangles. Cette méthode autorise plus de souplesse dans l'adaptation du maillage selon les différents endroits du modèle.

Le maillage est généré automatiquement selon la méthode Triangle©, en fonction des contraintes géométriques imposées (limites du modèle, position des hypothétiques ouvrages d'exploitation, réseau hydrographique interne et externe).

Dans le présent modèle, dans son utilisation pour le calcul hydrodynamique, le nombre de nœuds est 45 750 pour 50 218 éléments (triangles) de calcul. Les mailles les plus petites font 5m de côté et sont situées autour des supposés forages de pompage et de rejet et dans le sens de cheminement supposé de la nappe.

Figure 6 - Maillage du modèle autour du projet



6.6 Caractéristiques hydrodynamiques

Les caractéristiques hydrodynamiques sont toutes supposées sur la base des connaissances bibliographiques locales. Elles sont consignées dans le Tableau 2.

L'examen des données de forage montre des transmissivités de $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (forage BSS000KZVQ), $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (forage BSS000KZVI) et $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (forage BSS000KZVM).

Tableau 2 – Caractéristiques hydrodynamiques du granite

Transmissivité	Perméabilité	Porosité cinématique	Emmagasinement captif*
$10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,70^{-4} \text{ m/s}$ pour épaisseur de 60m	5 %	$1,6 \cdot 10^{-6} / \text{m}$

* valeur exprimée par mètre de couche géologique

6.7 Caractéristiques thermiques

La caractérisation des impacts thermiques du projet nécessite l'entrée des caractéristiques thermiques des couches concernées. Aucune donnée n'est disponible sur les ouvrages proches, aussi les données sont déterminées sur la base des connaissances bibliographiques locales et régionales¹.

¹ Pour l'eau la conductivité thermique est de $0,65 \text{ J/m/s/K}$ avec une chaleur spécifique (capacité calorifique) de $4,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3/\text{K}$

Tableau 3 – Caractéristiques thermiques des formations modélisées

Capacité calorifique	Conductivité thermique	Porosité totale	Dispersivité longitudinale	Dispersivité transversale
$2,20 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3/\text{k}$	$3,5 \text{ J/m/s/K}$	10 %	80 m	8 m

Plus la valeur de la dispersivité est grande, plus le panache « s'étale » longitudinalement et latéralement. Ces données sont bibliographiques, usuellement, il est établi que la dispersivité longitudinale est dix fois plus importante que la dispersivité transversale. Dans le cas présent, les valeurs ont été légèrement surévaluées par mesure conservatoire pour le calcul et les résultats.

6.8 Conditions aux limites

6.8.1 Hydraulique

D'après les informations sur les niveaux de nappe sur le secteur, il a été supposé que la nappe s'écoulait vers le nord-nord-ouest en direction de la Dives. En effet, il paraît probable que la nappe soit localement drainées par ce cours d'eau d'importance régionale.

Aussi, une condition de niveau imposée a été appliquée le long de la Dives en limite Est du modèle, correspondant aux cotes de sol, mais ceci également sur les limites nord et est (ruisseau du Gronde) du modèle correspondant aux cotes du drainage de ce ruisseau.

En partie amont (sud) du modèle, la cote de nappe a été définie à +48 m NGF, correspondant à une ligne piézométrique.

6.8.2 Températures

Tous les calculs qui suivent sont présentés sur la base d'une température initiale de nappe de 12,0°C.

Toutefois ces calculs ne doivent pas être interprétés selon une température absolue, mais en température relative ; il est ainsi de nécessaire de bien comparer la température finale de simulation par rapport à la température initiale, c'est donc l'écart de température qui est à observer, notamment sur le forage de pompage, ce qui permettra de définir la présence ou non d'un recyclage thermique dans les eaux souterraines.

Le recyclage thermique est le fait que les eaux « chaudes » réinjectées dans le forage de rejet viennent contaminer le forage de pompage, augmentant progressivement sa température, et donc diminuant le rendement énergétique de l'installation géothermique.

L'importance de recyclage thermique augmente selon plusieurs facteurs qui sont notamment :

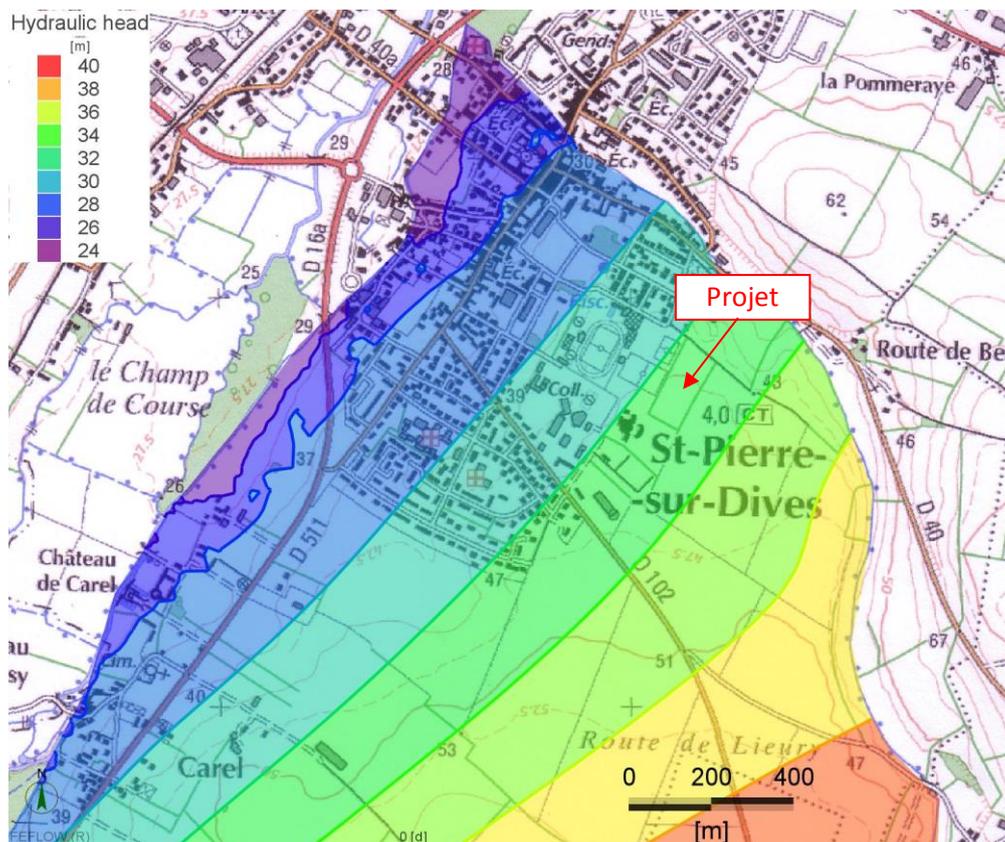
- la position des forages entre eux, le forage de pompage doit être à l'amont hydraulique du forage de rejet, ou à minima perpendiculaire à l'écoulement ;
- la trop grande proximité des forages de pompage et de rejet ;
- un débit d'exploitation, et donc de rejet, trop important ;
- une nappe trop peu productive ;
- un gradient d'écoulement de nappe, trop faible.

6.9 Piézométrie d'équilibre

L'équilibrage piézométrique résultant des opérations de calage, et résultant de l'imposition des conditions aux limites précédemment décrites permet de reconstituer la piézométrie moyenne de la nappe (Figure 7).

Ainsi, on constate que l'écoulement au droit du site est bien dirigé vers la Dives

Figure 7 – Piézométrie d'équilibre de la nappe



6.10 Simulation de l'impact thermique du projet

Les effets du projet ont été calculés afin de vérifier l'absence de recyclage thermique entre l'ouvrage de pompage (dont deux positions potentielles étant prévues : cf Figure 6) et l'ouvrage de rejet. La modélisation montre que l'hypothèse n° 1 de positionnement de point de rejet est suffisante pour le fonctionnement du doublet géothermique.

Pour la simulation, les volumes appliqués sur le pompage sont consignés dans le Tableau 1. Le forage de rejet subit les mêmes volumes.

Le pompage est supposé être réalisé sur l'ensemble de la couche calcaire (interface 1 et 2 du modèle). Concernant les températures de rejet, considérant la température de départ de nappe de 12°C, l'évolution de la température de rejet est de 6 °C.

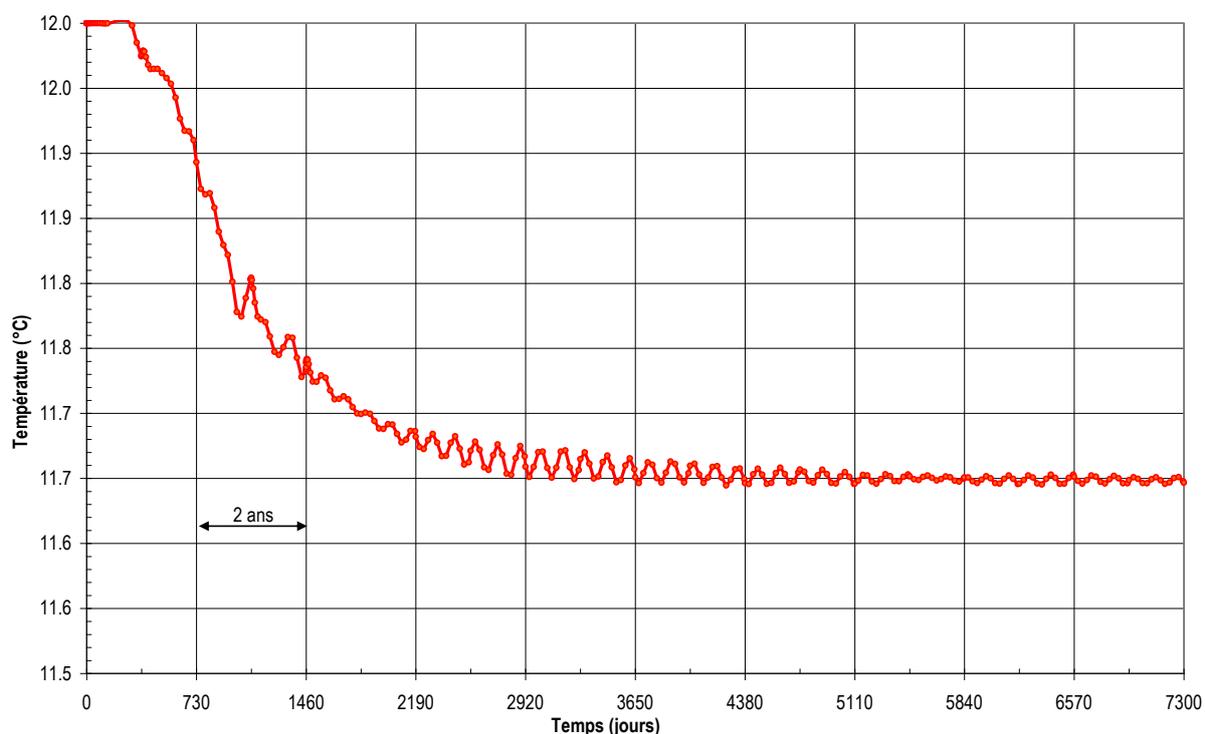
Enfin, tous les calculs ont été menés sur une période de 7 300 jours (20 ans).

6.10.1 Evolution temporelle

L'évolution de la température au niveau du point de pompage a été calculée par le modèle, la Figure 8 consigne l'évolution des températures sur le point de pompage. Il s'agit d'une moyenne des températures calculées sur les deux interfaces du modèle (haut et base du calcaire à 70m).

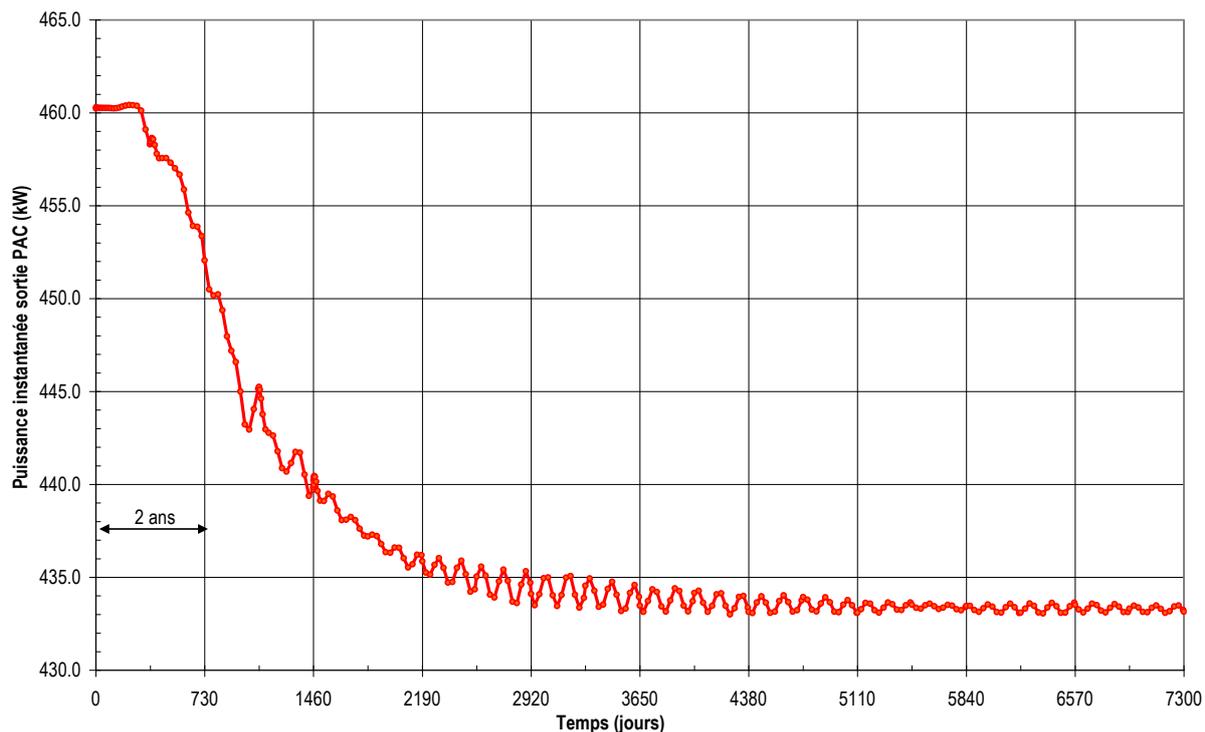
Les courbes de températures calculées montrent des oscillations saisonnières engendrées par l'alternance des périodes d'utilisation. Globalement, la moyenne de ces oscillations permet de mettre en évidence la présence d'un recyclage thermique au niveau du point de pompage, en effet, la température diminue au maximum, d'environ **-0,3 °C en 20 années**, et la température est stabilisée. Selon ces hypothèses de calcul, il apparaît qu'un risque négligeable de recyclage thermique est présent.

Figure 8 – Température au point de pompage



Diminution de la puissance instantanée : Le recyclage thermique fait diminuer la température du forage de pompage. La puissance instantanée requise en sortie de PAC est de 460 kW, considérant un COP de 4,1 et un delta de température de 6°C entre le forage de pompage et le forage de rejet. Aussi la diminution de la température du forage de pompage engendre une diminution de la puissance instantanée en sortie de PAC (Figure 9), celle-ci passe de **460 kW à 433 kW à 20 ans**.

Figure 9 – Puissance instantanée en sortie de PAC

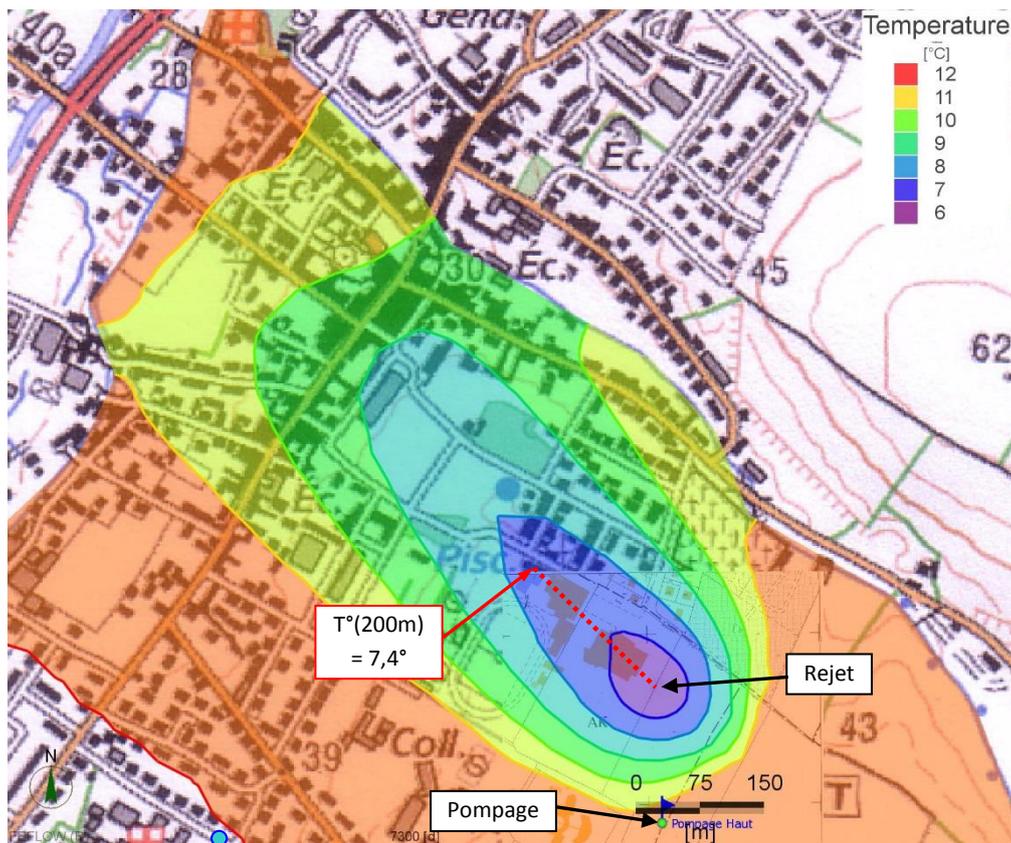


6.10.2 Evolution spatiale

La Figure 10 consigne la répartition des températures moyennes sur la hauteur du granite après 20 ans d'exploitation. La figure montre clairement que le forage de pompage n'est pas « contaminé » par les eaux froides du forage de rejet.

Par ailleurs, il est constaté que la baisse de température à 200m en aval du point de rejet est de $-4,6^{\circ}\text{C}$ ($T^{\circ} = 7,4^{\circ}\text{C}$), le projet est donc **non-conforme** avec les prescriptions de l'arrêté du 25 juin 2015 qui autorise une différence maximale de 4°C à 200m. Il serait nécessaire pour conformité à la réglementation de diminuer le delta de température entre entrée et sortie de PAC, ceci engendre une augmentation potentielle du débit de pompage nécessaire à l'obtention de la même puissance de chauffage.

Figure 10 – Répartition des températures à 20 ans



6.10.3 Conclusions - Incertitudes

La modélisation mathématique, notamment en géothermie, fait appel à un certain nombre de paramètres plus ou moins influents et dont la connaissance est seulement, pour certains, bibliographique.

L'incertitude principale de ce projet est générée par le gradient hydraulique moyen de la nappe et le sens d'écoulement qui ne sont pas parfaitement connus à ce stade de l'étude. En fonction des hypothèses choisies un recyclage thermique plus ou moins important est observé sur le forage de pompage, et ce recyclage peut être potentiellement augmenté en fonction des conditions hydrogéologiques. En tout état de cause, la distance maximale entre pompage et rejet doit être choisie (soit 190m : Figure 6).

La réalisation du forage de reconnaissance (futur forage de pompage) permettra de connaître la perméabilité des terrains après pompage d'essai. La réalisation du forage de rejet permettra après nivellement précis des deux ouvrages et prise de niveaux, d'obtenir l'information sur le sens réel de la nappe et de son gradient hydraulique. Ceci permettra la remise à jour du modèle et la validation définitive éventuelle du projet géothermique.

Remarque : un seul forage de rejet a été simulé dans ce dossier, en pratique il est d'usage de prévoir deux forages de rejets car les capacités d'absorption des terrains sont souvent moins fortes que les capacités d'extraction par pompage.