

# SERMET

— groupe M A N E R G Y

# STRATEGEO

## Etude de faisabilité géothermique de sous-sol Hôtel du Châtelet – 28/02/2023

Cette étude fait partie d'un dossier complet regroupant une étude de faisabilité Géothermique de surface (rapport v4 du 27/02/2023), une étude de faisabilité Géothermique de sous-sol (rapport version 1 du 28-02-2023 et une note de synthèse.

Rémi Delprat (SERMET)

Jean-Loup Lacroix (STRATEGEO)

Tony Sonza (SERMET)

Loïc Bouffel (STRATEGEO)

Margaux Degonde (STRATEGEO)



**MINISTÈRE  
DU TRAVAIL,  
DU PLEIN EMPLOI  
ET DE L'INSERTION**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



## **Ministères sociaux**

Etude de faisabilité géothermique

Rénovation de l'Hôtel de Châtelet

127 Rue de Grenelle - Paris 7 (75)

Rapport n°A22093 V1 – 28/02/2023






**StratGéO Conseil SAS**

26, rue des Carriers italiens – 91350 GRIGNY

Tél : 01 75 30 25 20 – Fax : 01 69 06 08 64

Capital social de 10 000 € - RCS EVRY 823253885

SIRET : 823 253 885 00029 – APE : 7112B – N°TVA Intracom : FR47 823 253 885

<b>Ministères sociaux</b>  Rénovation de l'Hôtel de Châtelet  127 Rue de Grenelle - Paris 7 (75)  Dossier n° A22093 - Etude de faisabilité géothermique									
N° d'affaire	Date	Chargé d'affaire	Visa	Contrôlé par	Visa	Validé par	Visa	Contenu	Version
A22093	28/02/2023	M. DEGONDE		L. BOUFFEL		JL. LACROIX		58 pages	V1

**Conditions contractuelles :**

- Le présent rapport et ses annexes constituent un tout indissociable. La mauvaise utilisation qui pourrait être faite suite à une communication ou reproduction partielle ne saurait engager StratéGéO Conseil.
- Les résultats du rapport sont valides pour une définition d'ouvrage, un site et une zone d'influence hydrogéologique spécifique définis au moment de notre prestation.
- La présente étude est fondée sur des reconnaissances de sol ponctuelles ne permettant pas d'identifier l'ensemble des aléas potentiels (hétérogénéités locales). Des adaptations lors de la phase d'exécution pourront être nécessaire. Il conviendra à l'entreprise de réaliser les études nécessaires afin de limiter cet aléa et d'adapter les dispositions en conséquence.
- A compter du paiement intégral de la mission, le client devient libre d'utiliser le contenu du rapport et de le diffuser dans la limite des conditions contractuelles du contrat.



## SOMMAIRE

<b>1 GENERALITES .....</b>	<b>6</b>
<b>2 PRESENTATION DU PROJET .....</b>	<b>8</b>
2.1 DESCRIPTION DU PROJET ET DE L'ETUDE .....	8
2.2 PLANS ARCHITECTURAUX DU PROJET .....	9
2.3 BESOINS ENERGETIQUES DU PROJET ET SCENARII GEOTHERMIQUES .....	10
<b>3 CONTEXTE GEOLOGIQUE DU SITE .....</b>	<b>12</b>
3.1 CONTEXTE GEOLOGIQUE GENERAL .....	12
3.2 SUCCESSION LITHOLOGIQUE AU DROIT DU PROJET .....	13
<b>4 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DU SITE .....</b>	<b>14</b>
4.1 PRESENTATION DES NAPPES EN PRESENCE .....	14
4.2 PIEZOMETRIE ET SENS D'ECOLEMENT .....	14
4.3 PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES ET PRODUCTIVITE .....	17
4.3.1 Nappe du Lutétien .....	17
4.3.2 Nappe de l'Yprésien .....	18
4.4 QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE GENERALE DE LA NAPPE .....	20
<b>5 CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET ADMINISTRATIF .....</b>	<b>22</b>
5.1 LE CODE CIVIL .....	22
5.2 LE CODE MINIER .....	22
5.3 LE CODE DE L'ENVIRONNEMENT .....	24
5.4 LES PERIMETRES DE PROTECTION .....	24
5.5 LE SCHEMA DIRECTEUR D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX (SDAGE) .....	24
5.6 SCHEMA D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX (SAGE) .....	26
5.7 LES ZONES NATURELLES .....	26
5.8 PLAN DE PREVENTION DES RISQUES NATURELS (PPRN) .....	27
5.8.1 Risque d'inondations .....	27
5.8.2 Risque Mouvement de terrain .....	27
5.8.3 Risque cavités souterraines .....	27
5.8.4 Risque pollution des sols, SIS et anciens sites industriels .....	27
<b>6 DIMENSIONNEMENT D'UN DISPOSITIF DE GEOTHERMIE SUR NAPPE .....</b>	<b>28</b>
6.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT .....	28
6.2 DEFINITION DE LA FAISABILITE D'UN DISPOSITIF DE GEOTHERMIE SUR NAPPE .....	28
6.2.1 Fonctionnement thermique et hydrodynamique du futur dispositif de géothermie .....	29
6.2.2 Exploitations voisines .....	29
6.3 DEFINITION DES DIFFERENTS SCENARII ET IMPLANTATION DES FORAGES .....	30





6.4	CONSTRUCTION DU MODELE.....	31
6.4.1	Structure du modèle .....	31
6.4.2	Paramétrage et calage hydrodynamique et thermique du modèle .....	32
6.5	RESULTATS DE LA MODELISATION .....	34
6.6	IMPACT DU PROJET SUR SON ENVIRONNEMENT .....	36
6.7	POSSIBILITE D'IMPLANTER LES FORAGES SUR SITE.....	36
6.8	FACTEUR D'INJECTIVITE DE LA NAPPE.....	38
6.8.1	Présentation des phénomènes.....	38
6.8.2	Capacité de réinjection d'un forage.....	38
6.9	CONTRAINTES DE MISE EN ŒUVRE ET D'EXPLOITATION D'UNE INSTALLATION DE GEOTHERMIE SUR NAPPE	39
6.9.1	Réinjection de l'eau pompée dans la même nappe .....	39
6.9.2	Régulation de l'exploitation .....	39
6.9.3	Maintenance de l'installation .....	40
<b>7</b>	<b>DESCRIPTION DES INSTALLATIONS GEOTHERMIQUES ENVISAGEES .....</b>	<b>42</b>
7.1	GEOTHERMIE SUR NAPPE .....	42
7.2	PHASE DE RECONNAISSANCE.....	45
<b>8</b>	<b>ASSURANCE EN TERMES DE GEOTHERMIE .....</b>	<b>47</b>
<b>9</b>	<b>EVALUATION DE L'ENVELOPPE BUDGETAIRE D'INVESTISSEMENT.....</b>	<b>48</b>
<b>10</b>	<b>ESTIMATION DES COUTS D'EXPLOITATION.....</b>	<b>49</b>
<b>11</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>50</b>
	<b>ANNEXE 1 : CLASSES D'ALTERATION ET VALEURS SEUIL DU SEQ RELATIF A L'USAGE ENERGIE .....</b>	<b>52</b>
	<b>ANNEXE 2 : COUPES TECHNIQUES PREVISIONNELLES DES FORAGES .....</b>	<b>56</b>
	<b>ANNEXE 3 : SYNOPTIQUE DU DISPOSITIF DE GEOTHERMIE (EXEMPLE) .....</b>	<b>57</b>
	<b>ANNEXE 4 : IMPACT SONORE DE LA REALISATION DES FORAGES (SIXENSE) .....</b>	<b>58</b>

## Table des illustrations

(1)	Localisation du projet sur fond de carte topographique (Openstreet Map).....	6
(2)	Localisation du projet sur fond de carte orthophotographique (IGN) .....	7
(3)	Plan de masse du bâtiment (Cairn architectes – septembre 2021) .....	9
(4)	Plan du sous-sol (Cairn architectes – septembre 2021) .....	9
(5)	Besoins énergétiques totaux du projet (SERMET) .....	10
(6)	Estimation des couvertures énergétiques du scénario retenu – géothermie sur nappe.....	10



(7) Localisation du site sur fond de carte géologique (BRGM).....	12
(8) Succession lithologique attendue au droit du site .....	13
(9) Carte piézométrique de la nappe du Lutétien (Lamé, 2010).....	15
(10) Carte piézométrique de la nappe de l'Yprésien (Lamé, 2010).....	15
(11) Carte des prélèvements d'eau de nappe à Paris, issue de la thèse de Lamé (2014) .....	16
(12) Carte des points de données hydrodynamique du Lutétien issus de la BSS .....	17
(13) Synthèse des caractéristiques hydrogéologiques de la nappe du Lutétien .....	17
(14) Tableau de calcul du facteur de dissymétrie .....	18
(15) Synthèse des caractéristiques hydrogéologiques de la nappe de l'Yprésien .....	18
(16) Carte des points de données hydrodynamique du Yprésien issus de la BSS .....	19
(17) Tableau de calcul du facteur de dissymétrie .....	19
(18) Définition des classes d'indice de qualité du SEQ eaux souterraines pour l'usage énergie .....	20
(19) Synthèse des paramètres chimiques de la nappe du Lutétien et de l'Yprésien .....	21
(20) Extrait de la cartographie de la GMI – Boucle ouverte.....	23
(21) Synthèse des orientations et dispositions concernant le projet .....	25
(22) Localisation des zones naturelles aux alentours du site d'étude .....	26
(23) Schéma du principe de la géothermie sur aquifère (BRGM, 2012) .....	28
(24) Ouvrages géothermiques aux alentours du projet .....	30
(25) Maillage du modèle réalisé sous logiciel FEFLOW .....	31
(26) Succession lithologiques modélisée par couches .....	32
(27) Tableau de répartition des paramètres hydrothermiques des couches géologiques .....	33
(28) Calage piézométrique du modèle FEFLOW.....	33
(29) Scénario de couverture énergétique modélisé.....	34
(30) Evolution de la température modélisée au droit des forages .....	34
(31) Extension du panache thermique après 30 ans d'exploitation, .....	35
(32) Proposition d'implantation des forages géothermiques sur fond de plan du jardin du projet .....	37
(33) Schéma de principe de colmatage de pores d'un aquifère par précipitation (BRGM) .....	38
(34) Atelier de forage de 22 tonnes .....	43
(35) Crépine inox en fil enroulé.....	43
(36) Chambre de forage avec regard carrossable de type Fibrelite .....	44
(37) Equipements spécifiques pour la géothermie en local chaufferie .....	44
(38) Essai de pompage dans un forage de reconnaissance .....	45
(39) Interprétation d'un essai de pompage .....	45
(40) Evaluation des coûts d'investissement pour le projet .....	48
(41) Conclusion : Besoins énergétiques totaux du projet (SERMET) .....	50
(42) Estimation des couvertures énergétiques du scénario retenu – géothermie sur nappe .....	50
(43) Coupe technique prévisionnelle des forages à la nappe de l'Yprésien .....	56



## 1 Généralités

**Client** : Ministères sociaux

**Projet** : Rénovation de l'Hôtel de Châtelet – Etude de faisabilité géothermique

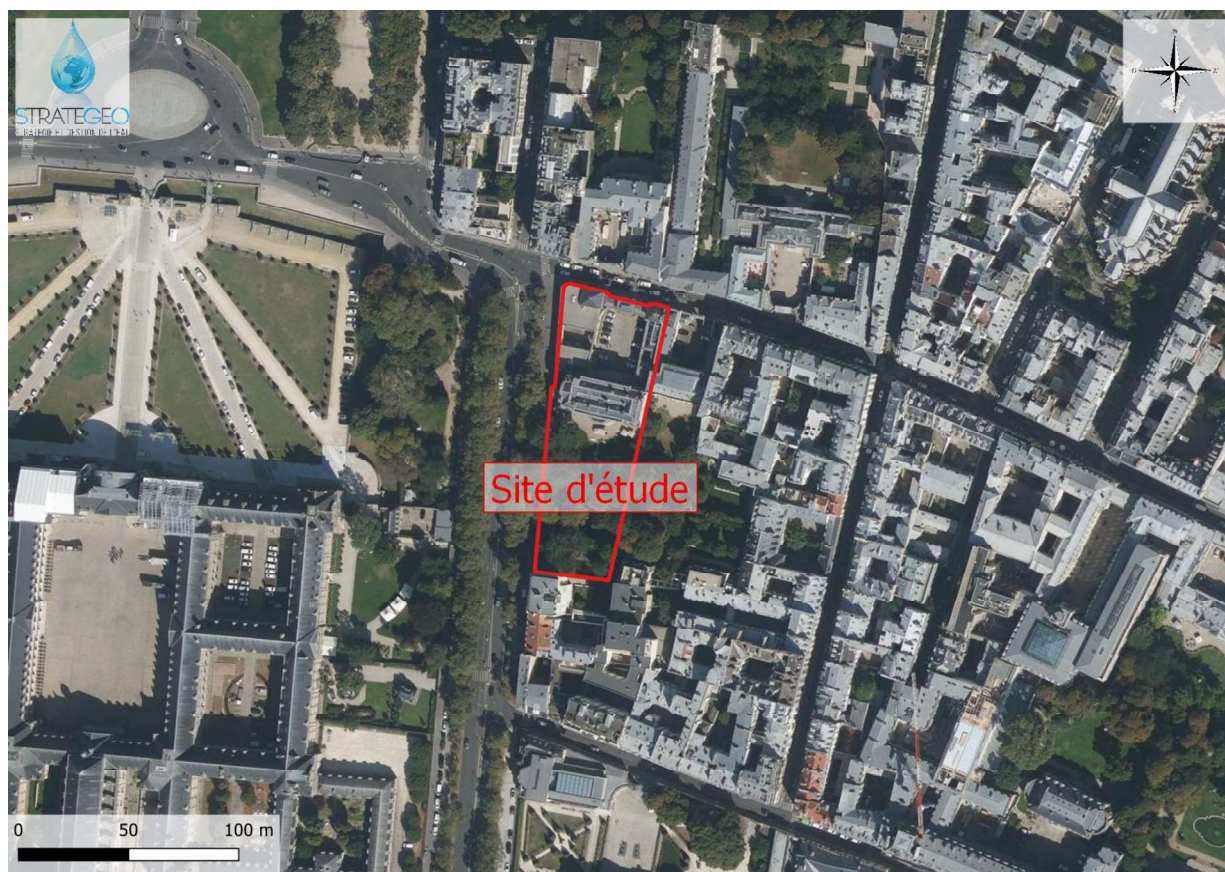
**Adresse du chantier** : 127 Rue de Grenelle - Paris 7 (75)

Le projet de rénovation de l'Hôtel de Châtelet, qui abrite le Ministère du Travail, du Plein Emploi et de l'Insertion, se situe dans le VII<sup>e</sup> arrondissement de Paris, au 127 rue de Grenelle, et culmine à une altimétrie d'environ +35 m NGF. Il se situe sur la parcelle n°0001 de la section AY, d'une superficie d'environ 5 000 m<sup>2</sup>.



(1) Localisation du projet sur fond de carte topographique (Openstreet Map)





(2) Localisation du projet sur fond de carte orthophotographique (IGN)

## 2 Présentation du projet

### 2.1 Description du projet et de l'étude

Dans le cadre du projet de rénovation de l'Hôtel de Châtelet, rue Grenelle dans le 7<sup>ème</sup> arrondissement de Paris, le Maître d'Ouvrage, les Ministères sociaux, souhaite étudier la possibilité de recourir à une solution de géothermie très basse énergie afin d'alimenter en chauffage et climatisation le bâtiment.

Aussi, le Maître d'Ouvrage s'est attaché les services du bureau d'étude StratéGéO Conseil pour l'assister dans la conception d'une solution énergétique de type géothermie.

Conformément aux recommandations de l'ADEME, la première phase du projet est de réaliser une étude de faisabilité géothermique, afin de pouvoir définir le potentiel géothermique du site et de pré-dimensionner une solution technique pérenne et pertinente vis-à-vis des besoins énergétiques du projet.

L'étude s'articulera autour des spécificités suivantes :

- 💧 *Définition des contextes géologique, hydrogéologique et thermique du site,*
- 💧 *Caractérisation hydrodynamique de la nappe d'eau souterraine,*
- 💧 *Préfiguration d'une solution de géothermie sur nappe,*
- 💧 *Préconisations de réalisation et d'exploitation d'une solution de géothermie,*
- 💧 *Présentation du contexte réglementaire de la solution,*
- 💧 *Présentation des subventions et assurances,*
- 💧 *Estimation de l'enveloppe budgétaire de la solution technique.*

#### **Remarque :**

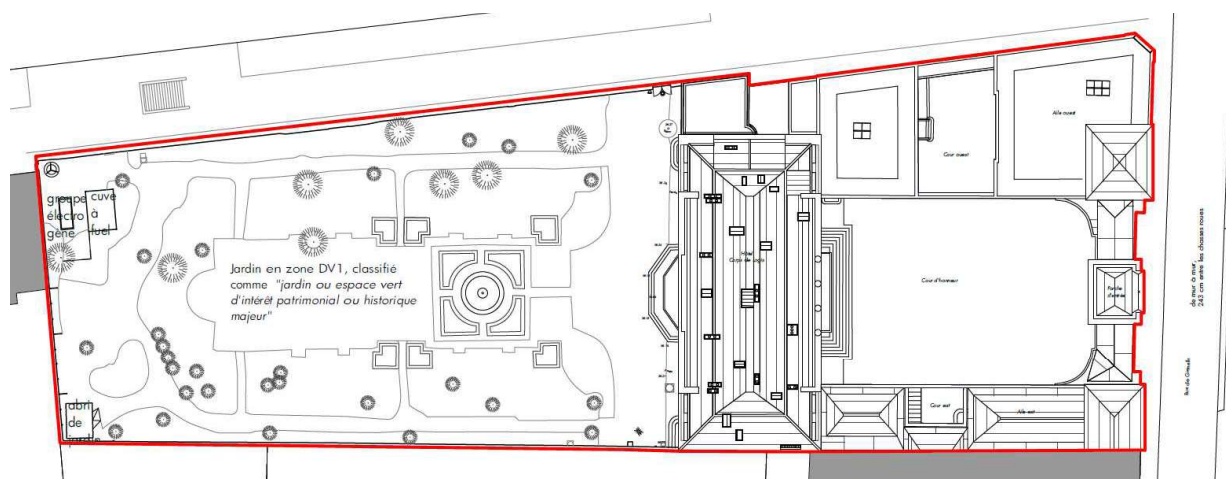
*L'étude de préfaisabilité réalisée par StratéGéO Conseil est fondée sur des données énergétiques et architecturales transmises au stade actuel du projet. Les éléments présentés devront être validés lors des phases ultérieures de conception.*

***Etant donné le peu de place libre disponible sur ce site, la présente étude de faisabilité géothermique s'intéressera uniquement au dimensionnement d'un dispositif de géothermie sur nappe (impossibilité d'implanter un champ de plusieurs sondes géothermiques verticales sur ce site déjà bâti et contraint).***

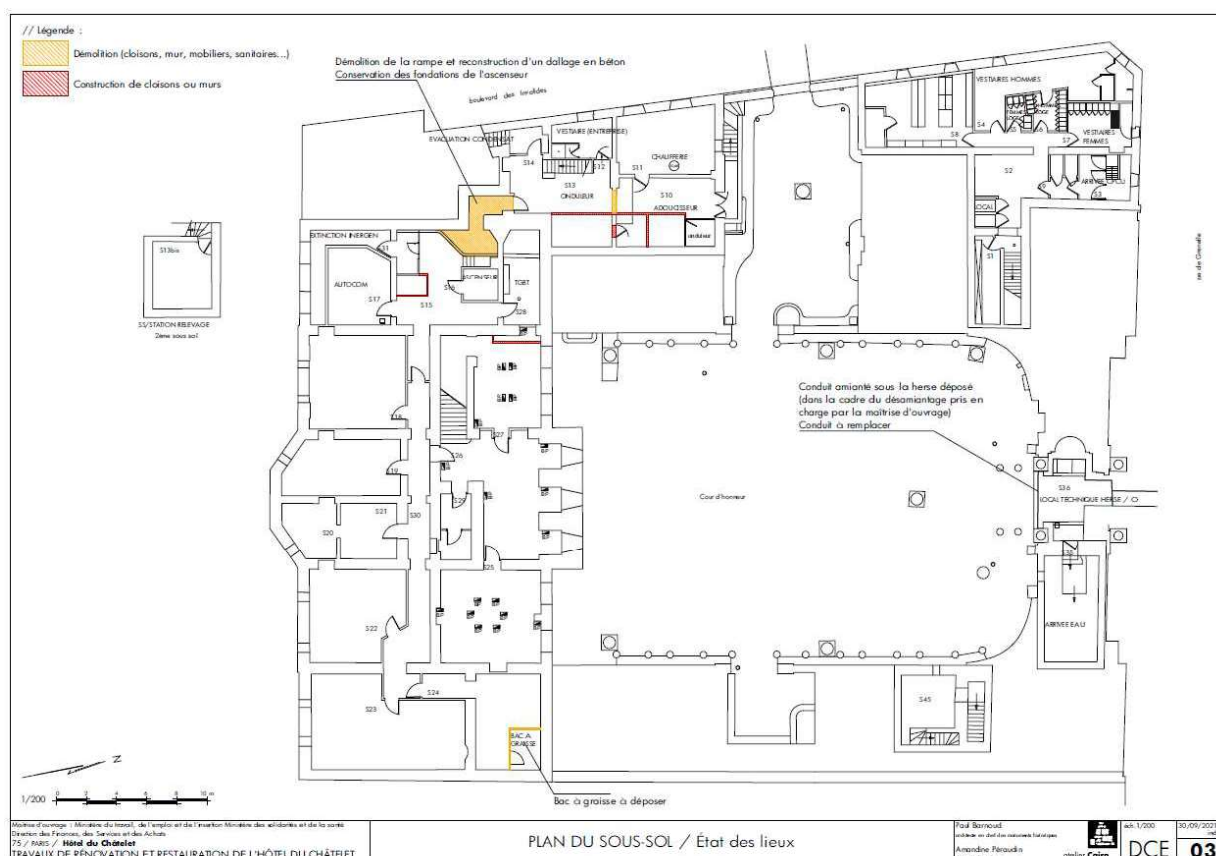


## 2.2 Plans architecturaux du projet

Les plans du rez-de-chaussée et du sous-sol du projet, disponibles au stade actuel du projet, sont présentés en figures suivantes.



(3) *Plan de masse du bâtiment (Cairn architectes – septembre 2021)*



(4) *Plan du sous-sol (Cairn architectes – septembre 2021)*



## 2.3 Besoins énergétiques du projet et scénarii géothermiques

Au stade actuel du projet, les besoins énergétiques sont présentés dans le tableau suivant. Les puissances d'appel du bâtiment et les énergies annuelles ont été estimées par SERMET.

(5) *Besoins énergétiques totaux du projet (SERMET).*

Mode	Puissance d'appel du bâtiment	Energie annuelle E <sub>bâtiment</sub>
Chauffage	187 kW	443 MWh/an
Climatisation	220 kW	300 MWh/an*

\* Estimation des besoins énergétiques en Froid car non-connue à ce jour

Etant donné l'analyse géologique et hydrogéologique présentée dans les paragraphes suivants, et compte tenu des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères du Lutétien et de l'Yprésien, il semblerait que le débit probablement disponible s'élève à environ 20-25 m<sup>3</sup>/h. A ce stade et sur la base du potentiel géothermique identifié, le scénario géothermique retenu est le suivant :

(6) *Estimation des couvertures énergétiques du scénario retenu – géothermie sur nappe*

Mode	Côté bâtiment		Côté sous-sol		Delta de température	Débit de pointe sur nappe
	Puissance P bâtiment	Energie E bâtiment	Puissance P géothermique	Energie E géothermique		
Chauffage	110 kW (59%)	347 MWh (78%)	83 kW	260 MWh	-5°C	14 m <sup>3</sup> /h
Climatisation	132 kW (60%)	240 MWh (80%)	161 kW	293 MWh	+7°C	20 m <sup>3</sup> /h

Ce scénario de couverture énergétique permettrait, sur la base de nos calculs, de couvrir la totalité de l'énergie de chauffage et la quasi-totalité de l'énergie de climatisation.




Les puissances et les énergies côté sous-sol, ainsi que les débits d'exploitation pour la géothermie sur nappe, ont été calculés à partir des formules suivantes :

$$P_{\text{Géothermique}} = P_{\text{Calorifique}} \times \left(1 - \frac{1}{\text{COP}}\right)$$

$$P_{\text{Géothermique}} = P_{\text{Frigorifique}} \times \left(1 + \frac{1}{\text{EER}}\right)$$

$$Q = \frac{P_{\text{Géothermique}}}{1,16 \times \Delta T}$$

Avec :

-   $P_{\text{géothermique}}$ , la puissance maximale coté sous-sol en kW ;
-   $P_{\text{calorifique}}$ , la puissance maximale de la PAC en mode chauffage en kW ;
-   $P_{\text{frigorifique}}$ , la puissance maximale de la PAC en mode climatisation en kW ;



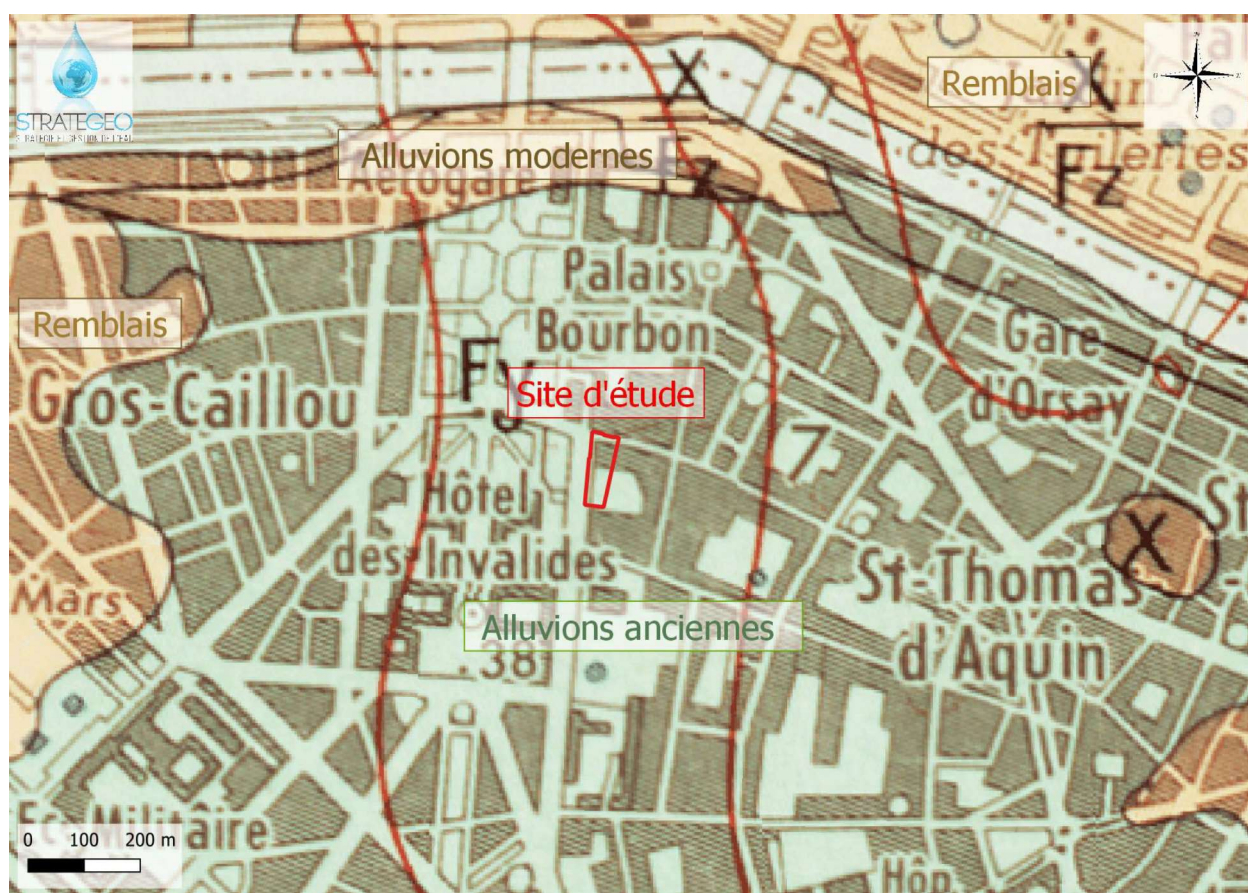
- *COP, le coefficient de performance théorique en mode chauffage (retenu à 4) ;*
- *EER, le coefficient de performance théorique en mode climatisation (retenu à 4,5) ;*
- *Q, le débit d'exploitation de pointe (en m<sup>3</sup>/h) ;*
- *$\Delta T$ , la variation de température de l'eau entre le pompage et le rejet.*



### 3 Contexte géologique du site

#### 3.1 Contexte géologique général

Le site d'étude se trouve au cœur du Bassin de Paris, vaste ensemble sédimentaire disposé en couches de terrains calcaires, argileux, sableux datant des ères secondaire et tertiaire (dépôts allant du Trias jusqu'au Quaternaire). Localement, le projet est situé sur un contexte d'ancienne terrasse alluviale de la Seine, dont les alluvions ont été aujourd'hui remplacés par des remblais sur une épaisseur importante.



(7) Localisation du site sur fond de carte géologique (BRGM)

### 3.2 Succession lithologique au droit du projet

A l'aide des données bibliographiques dans le secteur d'étude, il est possible de définir une coupe géologique prévisionnelle, présentée dans le tableau suivant :

(8) *Succession lithologique attendue au droit du site*

Age	Formation	Lithologie	Profondeur toit (m)	Altitude toit (m NGF)	Épaisseur (m)
Holocène	Remblais	Remblais	0	~ +35,5	2
Quaternaire	Alluvions	Alluvions sableux	2	+33,5	5,5
Lutétien	Calcaire Grossier Inférieur	Calcaire sableux compact, et fossilifère et glauconieux à la base	7,5	+28	10
Yprésien (Cuisien)	Sables du Soissonnais	Sable quartzeux puis sable argileux	17,5	+18	6
Yprésien (Sparnacien)	Fausses glaises du Vexin	Argile brune ou noire	23,5	+12	4
	Sables d'Auteuil	Sable fin à moyen, légèrement argileux	27,5	+8	8
	Argile plastique	Argile grise, dure, plastique	35,5	+0	10
Campanien	Craie du sénonien	Craie	45,5	-10	>10



## 4 Contexte hydrogéologique du site

---

### 4.1 Présentation des nappes en présence

L'analyse du contexte géologique proposé au paragraphe précédent permet d'identifier les horizons aquifères suivants au droit du site étudié :

- 💧 **La nappe du Lutétien** contenue dans les Marnes et Caillasses et Calcaires Grossiers, reposant sur les niveaux sableux de l'Yprésien ;
- 💧 **La nappe de l'Yprésien** contenue dans les sables du Soissonnais, reposant sur le niveau argileux des Fausses glaises du Vexin de l'Yprésien supérieur (Cuisien).

Les nappes du Lutétien et de l'Yprésien supérieur ne sont séparées par aucune couche imperméable au droit du site. Il y a donc connexion hydraulique entre elles. Cependant, ces nappes sont considérées distinctes car les lithologies et paramètres hydrodynamiques de ces aquifères voire, potentiellement, la chimie de l'eau qu'ils contiennent, sont différents.

### 4.2 Piézométrie et sens d'écoulement

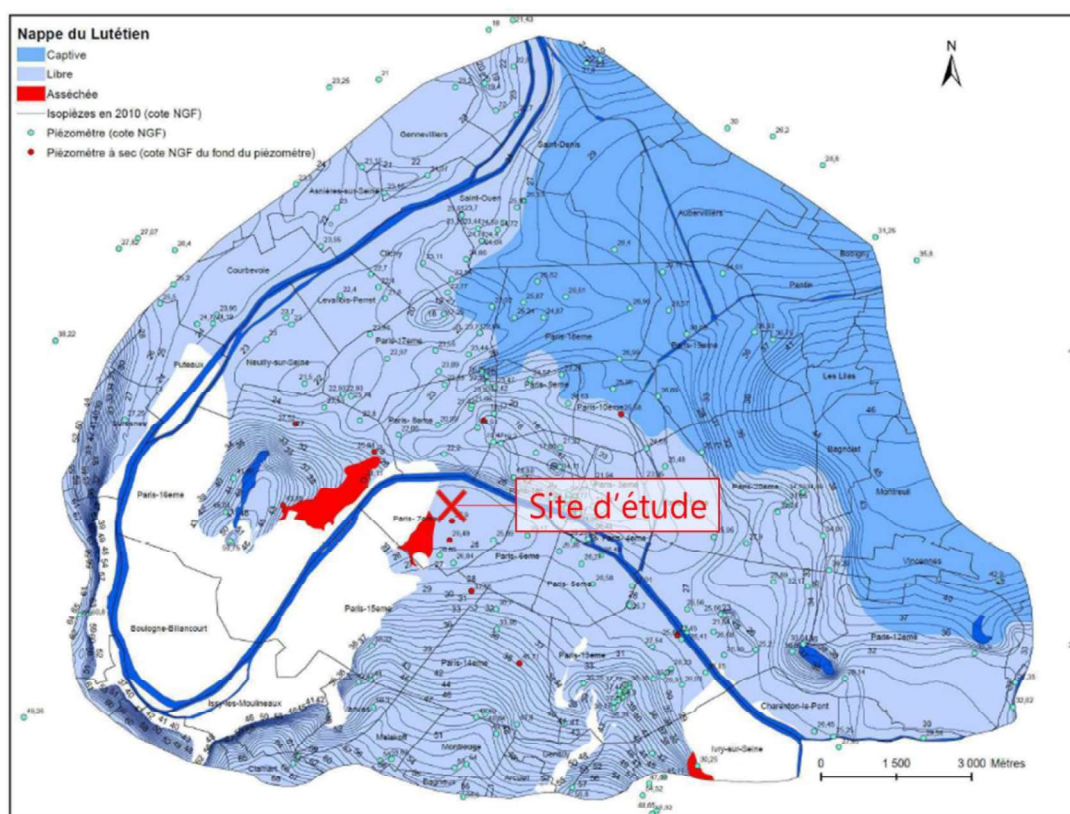
La piézométrie de la nappe de l'Eocène Moyen et Inférieur a été estimée à partir des cartes piézométriques de la nappe du Lutétien et de l'Yprésien inférieur de 2010 issue de la thèse de A. LAME, des ouvrages IGC du secteur ainsi que des projets géothermiques localisés dans le secteur d'études identifiés dans la base de données de STRATEGEO (rue de Grenelle et rue de Talleyrand).

D'après la carte piézométrique de Lamé de 2010, la surface piézométrique de l'aquifère au droit du projet s'établit vers la cote +25 m NGF. Ce niveau piézométrique reste perturbé par des prélèvements sur nappe localisés dans le secteur de Halles (voir figure 11 ci-dessous).

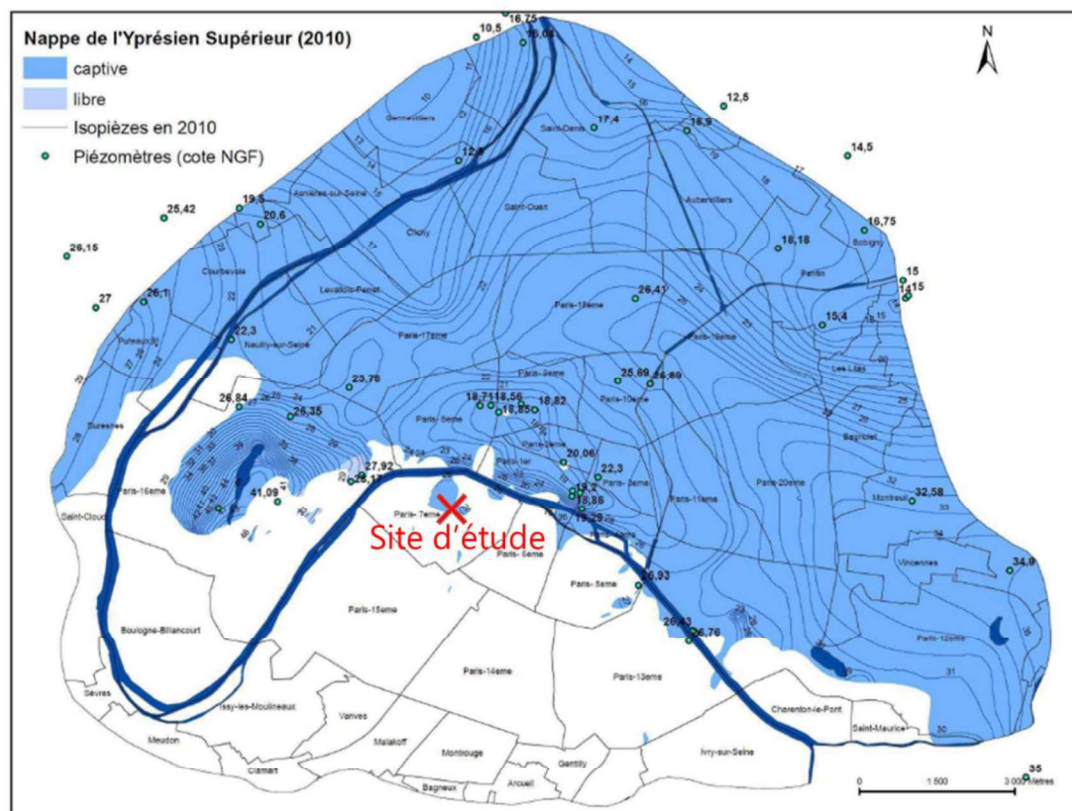
Selon ces cartes piézométriques, le sens d'écoulement de la nappe serait dirigé globalement vers le Sud-Ouest mais le gradient hydraulique reste difficile à déterminer puisqu'il semblerait qu'il soit subhorizontal.







(9) Carte piézométrique de la nappe du Lutétien (Lamé, 2010)

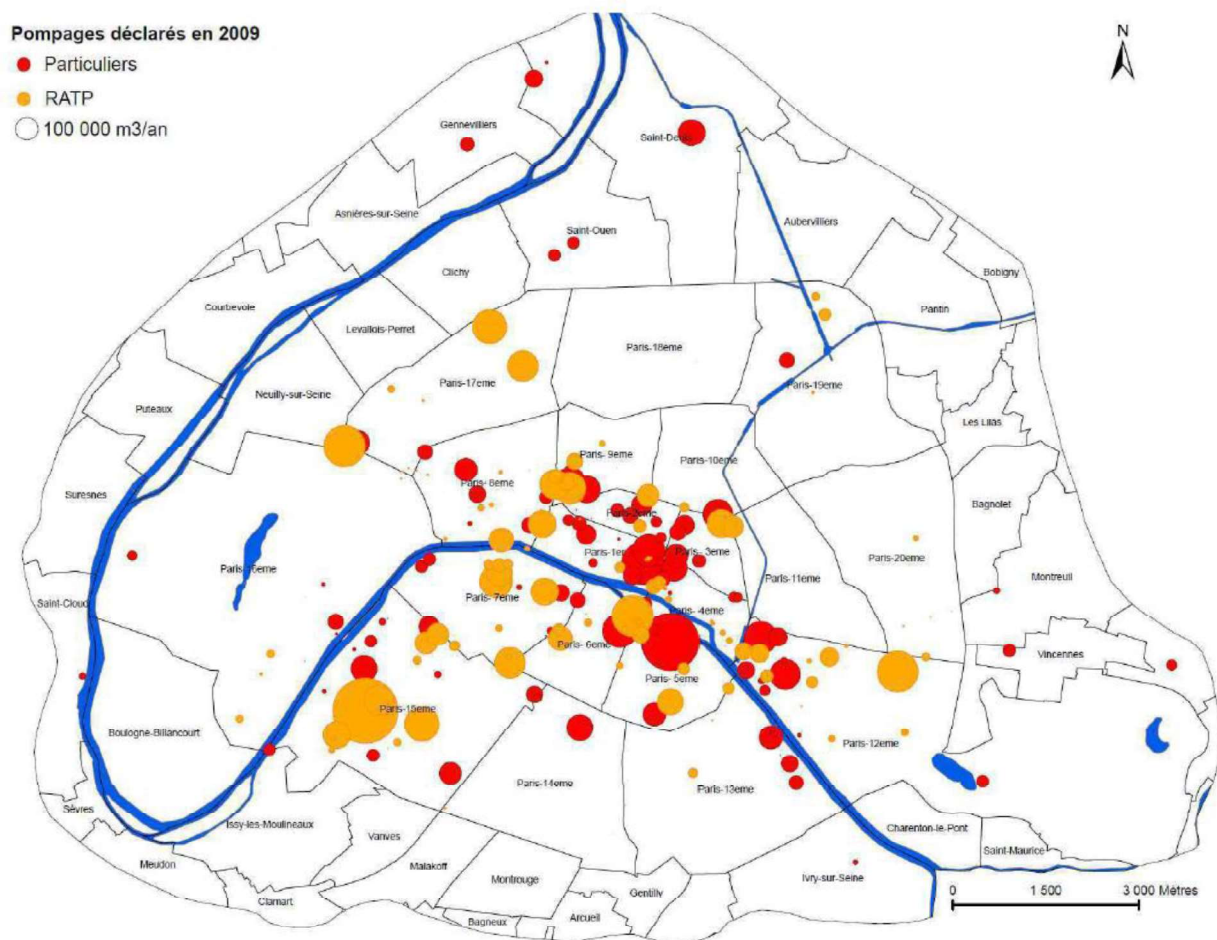


(10) Carte piézométrique de la nappe de l'Yprésien (Lamé, 2010)



De plus, la carte des prélèvements d'eau de nappe de Lamé (2014) permet d'apporter des précisions sur le sens d'écoulement local des nappes. En effet, il est observé un prélèvement très important au Nord-Ouest, proche du projet, qui pourrait localement influencer le sens d'écoulement. C'est dans cette direction que l'écoulement sera donc supposé.

Enfin, les données des piézomètres IGC du secteur permettent d'estimer le gradient hydraulique de la zone d'étude à environ 0,3%.



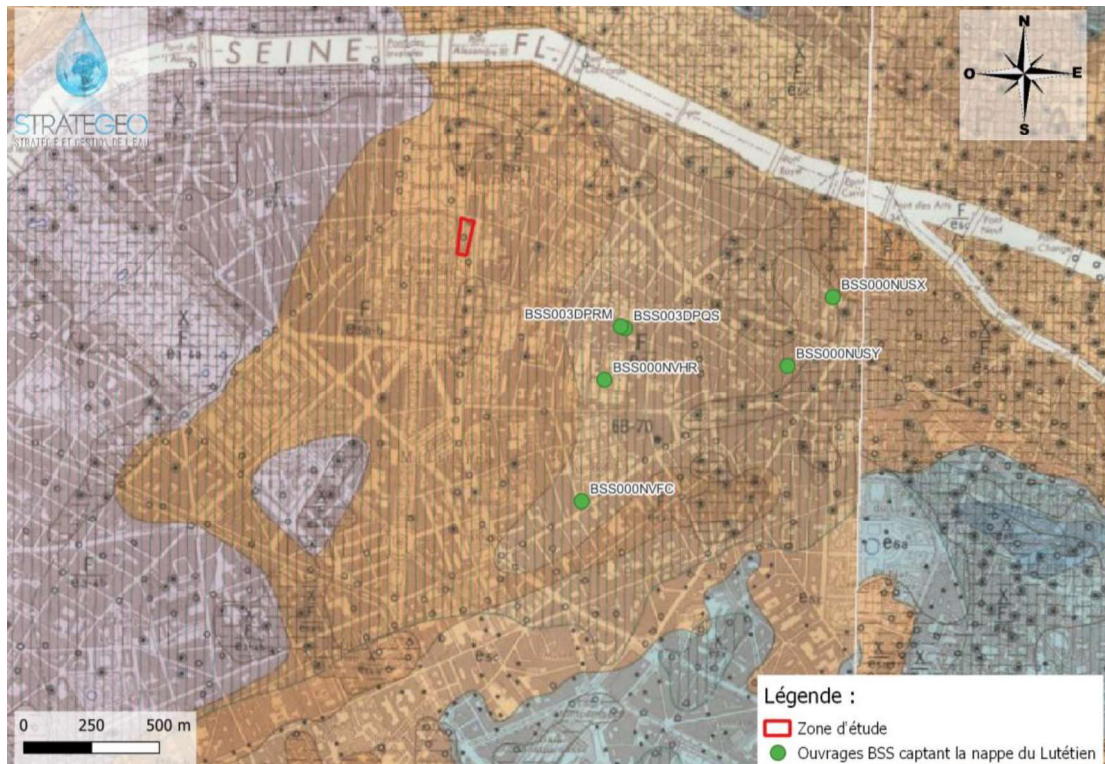
(11) Carte des prélèvements d'eau de nappe à Paris, issue de la thèse de Lamé (2014).

**Ainsi, la direction principale d'écoulement de la nappe du Lutétien et de la nappe de l'Yprésien retenue est le Nord/Ouest, avec un gradient de 0,3%. Et le niveau piézométrique considéré sera +25 m NGF pour la nappe du Lutétien et la nappe de l'Yprésien.**

### 4.3 Paramètres hydrodynamiques et productivité

#### 4.3.1 Nappe du Lutétien

D'après les informations recensées dans la Banque de données du Sous-Sol du BRGM, les ouvrages captant la nappe du Lutétien dans le secteur du projet et présentant des données sur les paramètres hydrodynamiques sont les suivants :



(12) Carte des points de données hydrodynamique du Lutétien issus de la BSS





(13) Synthèse des caractéristiques hydrogéologiques de la nappe du Lutétien

Ouvrage	Distance au site	Débit (m <sup>3</sup> /h)	Rabatement (m)	Epaisseur captée (m)	Débit spécifique (m <sup>3</sup> /h/m)	Transmissivité (m <sup>2</sup> /s)	Perméabilité (m/s)
BSS003DPQS	650	15	1,55	15,6	9,68	2,69.10 <sup>-3</sup>	1,72.10 <sup>-4</sup>
BSS003DPRM	650	13,6	1,36	19,5	10,00	2,78.10 <sup>-3</sup>	1,42.10 <sup>-4</sup>
BSS000NVHR	680	35,8	2,64	14,35	13,56	3,77.10 <sup>-3</sup>	2,62.10 <sup>-4</sup>
BSS000NVFC	1 000	5	0,03	14	166,67	4,63.10 <sup>-2</sup>	3,31.10 <sup>-3</sup>
BSS000NUSX	1 300	11,45	1,08	16	10,60	2,94.10 <sup>-3</sup>	1,84.10 <sup>-4</sup>
BSS000NUSY	1 300	5	3,2	6	1,56	4,34.10 <sup>-4</sup>	7,23.10 <sup>-5</sup>
<b>Moyenne géométrique</b>				<b>14</b>	<b>35</b>	<b>9,8.10<sup>-3</sup></b>	<b>6,9.10<sup>-4</sup></b>
<b>Médiane</b>				<b>15</b>	<b>10</b>	<b>9,9.10<sup>-3</sup></b>	<b>1,8.10<sup>-4</sup></b>

La capacité d'injection d'un forage d'eau est en général plus limitée que sa capacité de pompage, un facteur de dissymétrie de 1 à 3 est généralement retenu. Dans le secteur, pour la nappe du Lutétien, un facteur de dissymétrie de 2 sera retenu compte tenu des retours d'expérience.

$$K_{nappe} \times ep \approx T_{nappe} \approx \frac{Q}{S}$$

Avec :

-   $K_{nappe}$ , la perméabilité moyenne (ici  $2.10^{-4}$  m/s)
-   $ep$ , l'épaisseur moyenne productive (ici ~5 m)
-   $Q$ , le débit de pointe théorique
-   $S$ , la hauteur admissible.

(14) Tableau de calcul du facteur de dissymétrie

Mode	$K_{nappe}$	$ep$	Facteur de dissymétrie	$S$	$Q$
Pompage	$2.10^{-4}$ m/s	5 m	2	3 m	< 10 m³/h
Injection				5 m	< 8 m³/h

**L'épaisseur et la cote de base du Lutétien sur site sont très variables et peuvent donc affecter le débit exploitable de la nappe. Au vu des incertitudes de débits, la nappe du Lutétien ne sera pas retenue dans la suite de l'étude.**

#### 4.3.2 Nappe de l'Yprésien

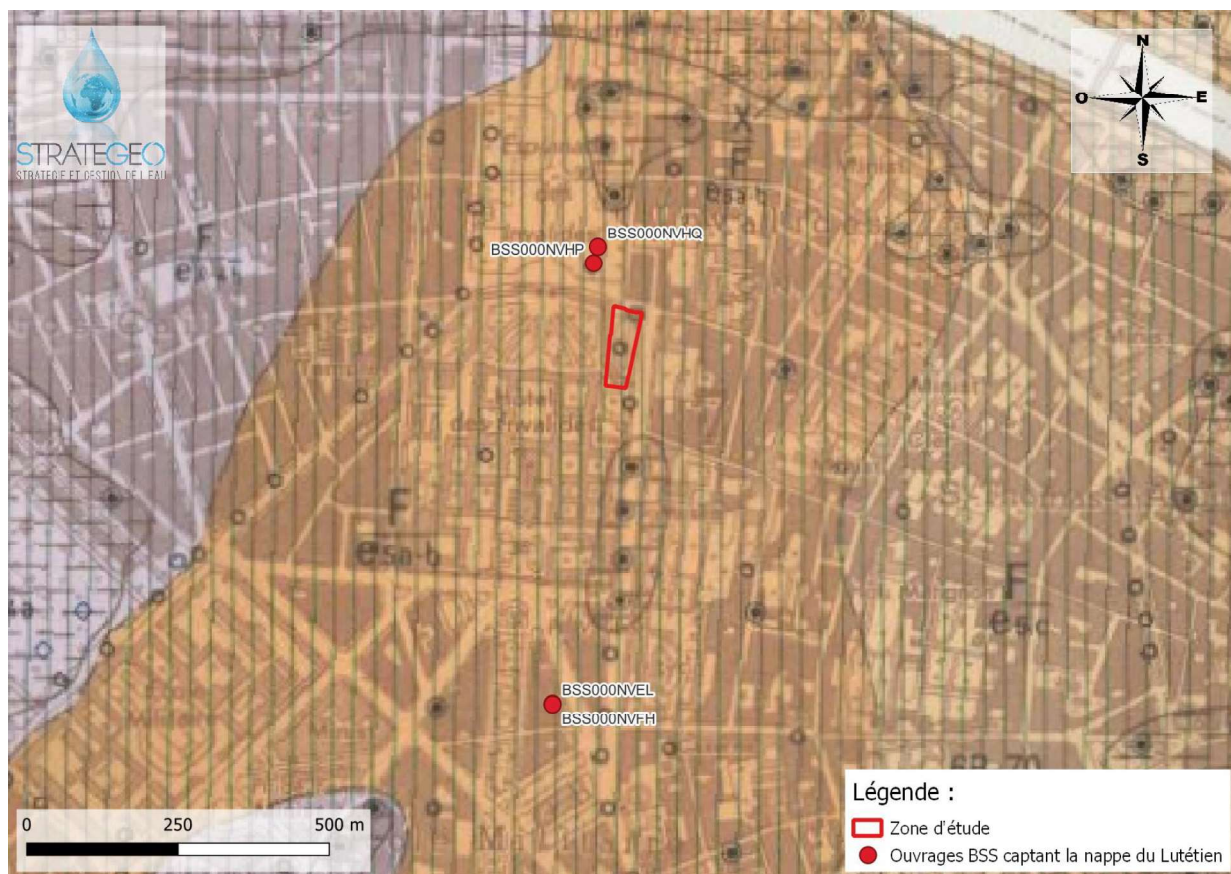
D'après les informations recensées dans la Banque de données du Sous-Sol du BRGM, les ouvrages captant la nappe de l'Yprésien dans le secteur du projet et présentant des données sur les paramètres hydrodynamiques sont les suivants :

(15) Synthèse des caractéristiques hydrogéologiques de la nappe de l'Yprésien

Ouvrage	Distance au site	Débit (m³/h)	Rabatement (m)	Epaisseur captée (m)	Débit spécifique (m³/h/m)	Transmissivité (m²/s)	Perméabilité (m/s)
BSS000NVEL	530	11,61	3,51	19,5	3,31	$9,19.10^{-4}$	$4,71.10^{-5}$
BSS000NVFH	530	6,31	1,83	19,5	3,45	$9,58.10^{-4}$	$4,91.10^{-5}$
BSS000NVHQ	80	15,5	4,68	7	3,31	$9,20.10^{-4}$	$1,31.10^{-4}$
BSS000NVHP	80	16,7	3,88	7	4,30	$1,20.10^{-3}$	$1,71.10^{-4}$
Moyenne géométrique				13,2	3,6	$9,9.10^{-4}$	$9,9.10^{-5}$
Médiane				13,2	3,4	$1.10^{-3}$	$1.10^{-4}$







(16) Carte des points de données hydrodynamique du Yprésien issus de la BSS

La capacité d'injection d'un forage d'eau est en général plus limitée que sa capacité de pompage, un facteur de dissymétrie de 1 à 3 est généralement retenu. Dans le secteur, pour la nappe de l'Yprésien, un facteur de dissymétrie de 2 à 3 est souvent observable.

$$K_{nappe} \times ep \approx T_{nappe} \approx \frac{Q}{S}$$

Avec :

- $K_{nappe}$ , la perméabilité moyenne (ici  $1.10^{-4}$  m/s)
- $ep$ , l'épaisseur moyenne productive (ici  $\sim 8$  m)
- $Q$ , le débit de pointe théorique
- $S$ , la hauteur admissible.

(17) Tableau de calcul du facteur de dissymétrie

Mode	$K_{nappe}$	$ep$	Facteur de dissymétrie	$S$	$Q$
Pompage	$1.10^{-4}$ m/s	8 m	2 à 3	6 m	$\sim 15-20$ m <sup>3</sup> /h
Injection				10 m	12-15 m <sup>3</sup> /h

**Le débit maximal d'exploitation sera fixé à 25 m<sup>3</sup>/h pour l'installation complète (deux forages de pompage et deux forages d'injection).**

**Remarque :**

**Seule une phase de reconnaissance au droit du site permettra de définir précisément les paramètres de productivité de la nappe en pompage et en réinjection.**

#### 4.4 Qualité physico-chimique générale de la nappe

Le BRGM a mis en place un système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines (SEQ), qui établit 5 classes d'aptitude de l'eau à satisfaire un usage donné (eau potable, industrie, énergie, etc.). Ces 5 classes sont les suivantes : très bonne, bonne, passable, mauvaise et inapte à satisfaire l'usage.

Dans le cas d'un usage destiné à des fins énergétiques, les 5 classes sont définies à partir de plusieurs types d'altération :

- La température qui est liée au processus thermodynamique. Les valeurs seuils des différentes classes dépendent alors de l'usage énergétique de l'eau (climatisation ou pompe à chaleur) ;
- La corrosion et la formation de dépôts liées à des facteurs chimiques.

*(18) Définition des classes d'indice de qualité du SEQ eaux souterraines pour l'usage énergie*

SEQ	Couleur de référence					
	Classe d'indice de qualité	Très bonne	Bonne	Passable	Mauvaise	Inapte à satisfaire l'usage
Altération	Température	Favorable à l'usage	Permet l'usage	Usage délicat	Classe non définie	Classe non définie
	Corrosion	Absence de corrosion	Corrosion faible	Corrosion modérée	Corrosion moyenne	Corrosion forte
	Formation de Dépôt	Pas de risque de dépôts importants	Peu de risques de dépôts	Risques de dépôts	Classe non définie	Dépôts très importants

L'**Annexe 1** présente les classes d'altération et les valeurs seuils du SEQ relatives à l'usage énergie. Il est possible de présenter en partie la chimie des nappes à partir des données d'autres études menées sur la nappe de la Craie. Ces données sont synthétisées dans le tableau ci-dessous.



(19) *Synthèse des paramètres chimiques de la nappe du Lutétien et de l'Yprésien*

Nappe captée		Lutétien	Yprésien
Altération	Ouvrage	Rue Varenne	BSS000NTGA
	Date du prélèvement	13/09/2011	1974
Température	Climatisation	16°C	16°C
	PAC		16°C
Corrosion	CO2 dissous (mg/l)	414	-
	O2 dissous (mg/l)	1,76	Non dosable
	Salinité (g/l NaCl)	1,2	-
	Conductivité à 20°C (µS/cm)	2470	-
	pH (unité pH)	6,9	7
	Chlorures Cl- (mg/l)	105	53
	Sulfates SO42- (mg/l)	1128	544
	Bactéries sulfato-réductrices (unité/ml)	0	
	Sulfures HS- (mg/l)	<0,05	
	Potentiel d'oxydoréduction EH (mV)	425	
Formation de dépôts	pH (unité pH)	6,9	7
	EH – selon valeur du pH (mV)	425	
	Ferro-bactéries	0	
	Indice de saturation – selon valeur TAC		
Paramètres supplémentaires	Fer (mg/L)		0,24

(1) Potentiel d'oxydo-réduction Eh= 1330-166 pH (2) Indice de saturation = pHs-pH

Selon le SEQ eaux souterraines pour l'usage énergie et d'après les données disponibles au stade actuel l'étude, la qualité de l'eau des nappes du Lutétien et de l'Yprésien permettent l'usage de chauffage et climatisation sur PAC. Toutefois, celle-ci peut favoriser la corrosion et la formation de dépôt. Il sera donc nécessaire :

- 💧 D'adapter les matériaux de la boucle géothermique primaire (colonne captante, exhaure, liaison horizontale, échangeur primaire), afin de limiter les phénomènes de corrosion ;
- 💧 De prévoir des diagnostics et des entretiens réguliers du forage, afin d'anticiper le développement des dépôts sur les crépines ;
- 💧 Mise en place d'un dispositif de rétro-lavage dans les forages injecteurs.

**Il sera nécessaire de réaliser une analyse d'eau de la nappe pendant la phase de reconnaissance afin de vérifier sa compatibilité pour un usage géothermique et d'adapter l'installation le cas échéant (traitement, entretien, etc.).**












## 5 Contexte réglementaire et administratif

---

Plusieurs textes régissent les dispositions administratives et réglementaires applicables aux projets de géothermie :




-  *Le Code Civil,*
-  *Le Code Minier,*
-  *Le Code de l'Environnement,*
-  *Les périmètres de protection,*
-  *Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE),*
-  *Les zones naturelles,*
-  *Plan de prévention des risques naturels.*

### 5.1 Le Code Civil





Du point de vue du Code Civil (Article 2270), le constructeur d'un ouvrage est responsable des dommages éventuels causés par l'ouvrage. Cette responsabilité est engagée pendant une période de 10 ans (garantie décennale). Ainsi, Le Maître d'Ouvrage devra s'assurer que l'entreprise de forage est bien titulaire d'une police « responsabilité civile décennale ».

### 5.2 Le Code Minier

Le décret n°2015-15 du 8 janvier 2015 et l'arrêté du 25 juin 2015 relatif au Code Minier modifie :

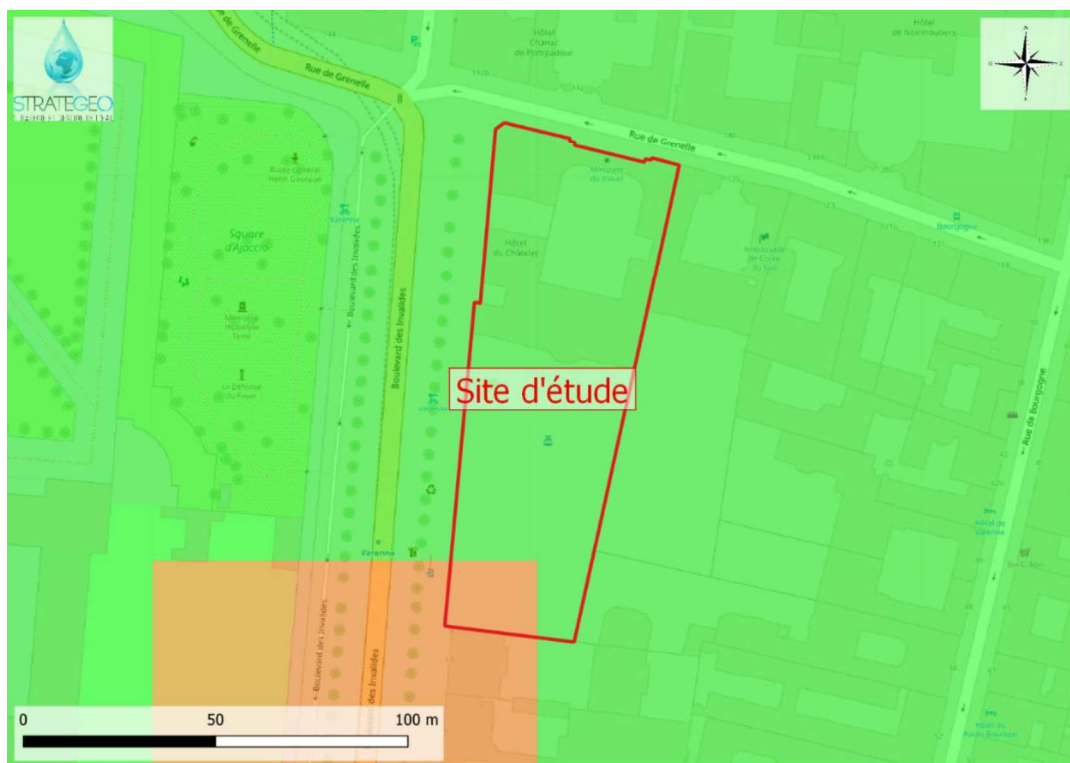
-  *Le décret n°78-498 du 28 mars 1978 relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie ;*
-  *Le décret n°2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la Police des mines et des stockages souterrains ;*
-  *L'article R414-27 du Code de l'environnement.*

Pour la géothermie sur aquifère, les projets sur nappe sont considérés comme relevant du régime de la minime importance (soumis à déclaration au titre du Code minier) s'ils remplissent notamment les conditions suivantes :

-  *La profondeur du forage est inférieure à 200 mètres ;*
-  *La température de rejet ne dépasse pas 32°C ;*
-  *La température de l'eau prélevée est inférieure à 25 °C ;*
-  *La puissance thermique récupérée dans l'ensemble de l'installation est inférieure à 500 kW ;*

- 💧 L'exploitant prend en considération les installations voisines et ne provoque pas une variation de plus de 4°C à 200 m des forages de pompage et de réinjection ;
- 💧 Les eaux prélevées sont réinjectées dans la même nappe aquifère et la différence entre les volumes prélevés et réinjectés est nulle ;
- 💧 Les débits prélevés ou réinjectés sont inférieurs au seuil d'autorisation, tel que défini dans la rubrique 5.1.1.0 de l'article R214-1 du Code de l'Environnement.

De plus, dans le cadre de cette nouvelle réforme, une cartographie réglementaire pour les opérations de minime importance a été mise en place. D'après la cartographie, le projet se situe en zone verte et en zone orange est donc éligible à la géothermie de minime importance :



(20) *Extrait de la cartographie de la GMI – Boucle ouverte*

**Le projet est situé en zone verte (« éligible à la GMI ») avec un risque très faible de communication aquifère (niveau 1) et en zone orange (« éligible à la GMI avec avis d'expert ») avec un risque de présence de cavités (niveau 7) et de communication aquifère (niveau 1).**

De manière générale, le régime de la minime importance implique le respect des prescriptions de l'arrêté du 25 juin 2015 relatives :

- 💧 A l'implantation des ouvrages, dont notamment :
  - Ne pas être situé à moins de 5 mètres de conduites d'assainissement individuelles ou collectives lorsqu'une étanchéité est prévue ou dans le cas contraire à moins de 35 m ;

- *Ne peut pas être implanté dans un périmètre de protection immédiat ou rapproché d'un captage d'eau destinée à la consommation humaine.*
- 💧 *Aux exigences vis-à-vis des entreprises intervenantes (exploitant, entreprise de forage et installateur) avec notamment la qualification obligatoire QUALIFORAGE RGE ;*
- 💧 *Aux dispositions générales lors de la réalisation de l'installation (chantier, matériaux, matériel) ;*
- 💧 *Aux dispositions générales lors de l'exploitation de l'installation ;*
- 💧 *Aux dispositions générales lors de l'arrêt des travaux d'exploitation de l'installation ;*
- 💧 *Aux contrôles et surveillances ;*
- 💧 *A certains documents réglementaires, dont notamment :*
  - *Les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) ;*
  - *Les règlements des schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) ;*
  - *Les plans de prévention des risques naturels ;*
  - *Les servitudes d'utilité publique ;*
  - *Les dispositions du règlement sanitaire départemental.*

### **5.3 Le Code de l'Environnement**

Depuis le 8 Janvier 2015 et la publication du décret 2015-015, la géothermie n'est plus soumise à la réglementation du Code l'Environnement.

### **5.4 Les Périmètres de protection**

Dans le cadre de la géothermie de minime importance, les forages géothermiques ne devront pas se situer à l'intérieur des périmètres de protection immédiats et rapprochés des captages d'eau destinés à la consommation humaine et des sources des eaux minérales naturelles conditionnées.






D'après l'Agence Régionale de Santé (ARS), aucune emprise de périmètre de protection de captage n'est présente au droit du projet.

### **5.5 Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE)**

Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) 2022-2027 du bassin Seine-Normandie a été adopté le 23 mars 2022 par le comité de bassin, rassemblant des représentants des usagers, des associations, des collectivités et de l'Etat. L'arrêté portant approbation du SDAGE 2022-2027 a été publié le 6 avril 2022 au journal officiel.



Les orientations fondamentales du SDAGE 2022-2027 pour le bassin Seine-Normandie sont les suivantes :



-  *Orientation fondamentale 1 : Des rivières fonctionnelles, des milieux humides préservés et une biodiversité en lien avec l'eau restaurée ;*
-  *Orientation fondamentale 2 : Réduire les pollutions diffuses en particulier sur les aires d'alimentation de captages d'eau potable ;*
-  *Orientation fondamentale 3 : Pour un territoire sain, réduire les pressions ponctuelles ;*
-  *Orientation fondamentale 4 : Assurer la résilience des territoires et une gestion équilibrée de la ressource en eau face au changement climatique ;*
-  *Orientation fondamentale 5 : Agir du bassin à la côte pour protéger et restaurer la mer et le littoral.*

Le projet est concerné par les dispositions suivantes :

*(21) Synthèse des orientations et dispositions concernant le projet*

Orientations fondamentales	Orientations	Dispositions
2 – Réduire les pollutions diffuses en particulier sur les aires d'alimentation de captages d'eau potable	2.4 – Aménager les bassins versants et les parcelles pour limiter le transfert des pollutions diffuses	2.4.4 – Limiter l'impact du drainage par des aménagement spécifiques
4 – Pour un territoire préparé : assurer la résilience des territoires et une gestion équilibrée de la ressource en eau face au changement climatique	4.4 - Garantir un équilibre pérenne entre ressources en eau et demandes	4.4.7 – Renforcer la connaissance des ouvrages de prélèvements

Le respect de ces dispositions est assuré par :

-  *L'attention portée lors des forages, réalisés dans les règles de l'Art pour ne pas mettre en contact la nappe de l'Yprésien et les nappes sus-jacentes, notamment la nappe du Lutétien ;*
-  *En phase d'exploitation, le rejet intégral de l'eau prélevée dans la nappe de l'Yprésien ou la nappe du Lutétien vers cette même nappe afin de ne pas influencer sur le bon état quantitatif global de la nappe.*

Le projet est situé dans l'emprise de la masse d'eau **FRHG104 « Éocène du Valois »**, dont l'objectif de bon état quantitatif est atteint depuis 2015 et l'objectif de bon état qualitatif est fixé à 2027 de manière moins stricte du fait de la complexité technique de cet objectif. Elle ne fait pas l'objet de dispositions dans le SDAGE 2022-2027 de Seine-Normandie.

**Les ouvrages souterrains seront réalisés selon les règles de l'Art en s'attachant à isoler la nappe du Lutétien de la nappe de l'Yprésien, afin de préserver la qualité de la ressource.**





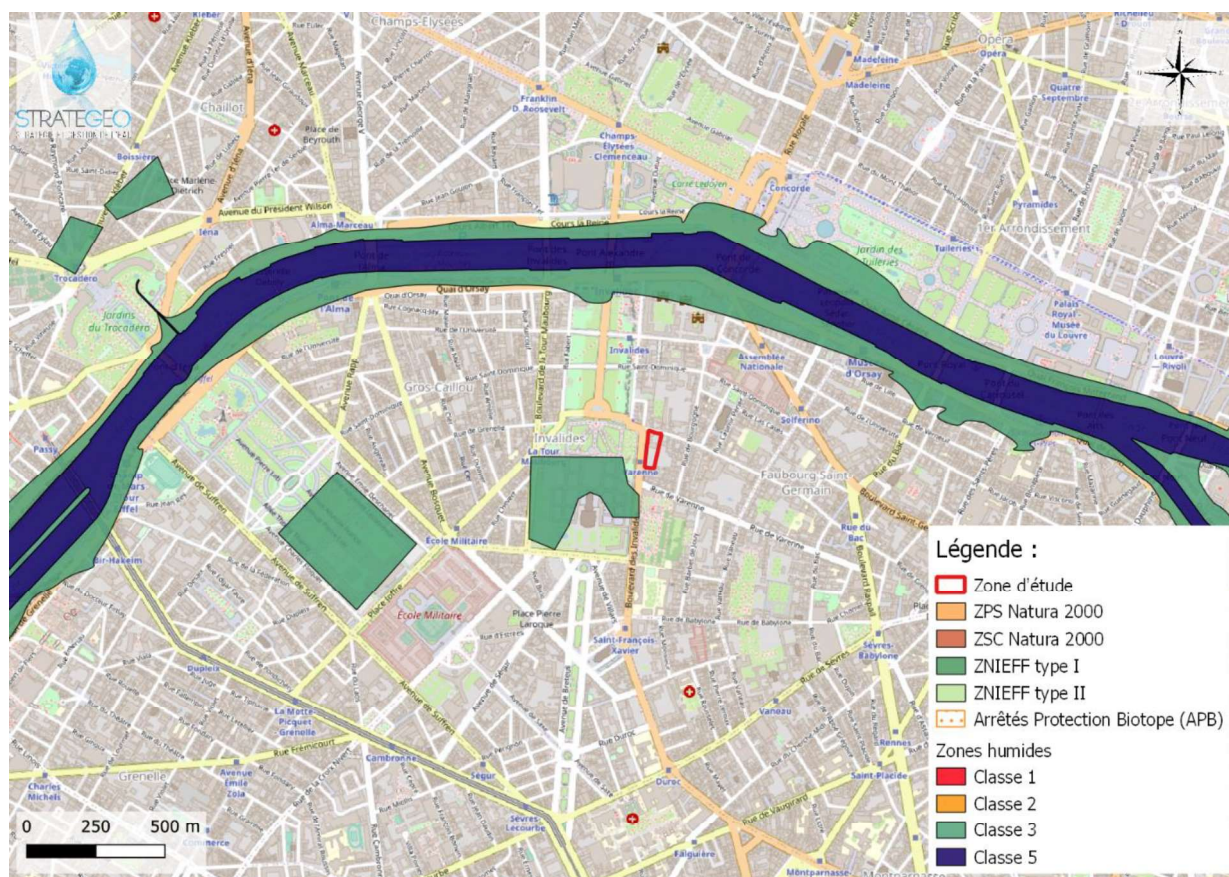
## 5.6 Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE)

Le projet ne se situe pas dans l'emprise du Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SAGE). Aucune mesure n'est donc à prévoir à ce titre.

## 5.7 Les Zones Naturelles

D'après les données disponibles, le projet ne se situe pas sur l'emprise d'une zone naturelle, notamment de type :

- 💧 Zone NATURA 2000,
- 💧 ZNIEFF,
- 💧 Zone humide ou potentiellement humide,
- 💧 Site classé.



(22) Localisation des zones naturelles aux alentours du site d'étude

## **5.8 Plan de prévention des risques naturels (PPRN)**

### *5.8.1 Risque d'inondations*

D'après les informations du site gouvernemental « Géorisques », le 7<sup>ème</sup> arrondissement de Paris est référencé comme commune soumise à un PPRN inondation. Le projet se situe cependant en dehors de zone d'aléa débordement de cours d'eau pour toute récurrence.

### *5.8.2 Risque Mouvement de terrain*

Aucun mouvement de terrain n'a été recensé dans un rayon de 500 m autour du projet. La commune est cependant soumise à un PPRN Mouvement de terrain et le projet est situé dans une zone de PPRN risque mouvement de terrain approuvé.

### *5.8.3 Risque cavités souterraines*

La commune est soumise à un PPRN Cavités souterraines et le projet est situé dans une zone de PPRN risque mouvement de terrain – affaissement et effondrement (cavités souterraines) approuvé. Cependant, d'après l'Atlas des Carrières Souterraines de l'Inspection Générale des Carrières, aucune ancienne carrière n'est présente au droit du site.

### *5.8.4 Risque pollution des sols, SIS et anciens sites industriels*

D'après les informations du site gouvernemental Georisques, aucun site BASOL ou BASIAS n'est référencé au droit du projet.

D'après les banques de données BASIAS (sites industriels et activités de service) et BASOL (sites et sols pollués) il existe un certain nombre de sites industriels aux alentours du projet mais aucun site BASOL dans un rayon de 500 mètres aux alentours du projet.

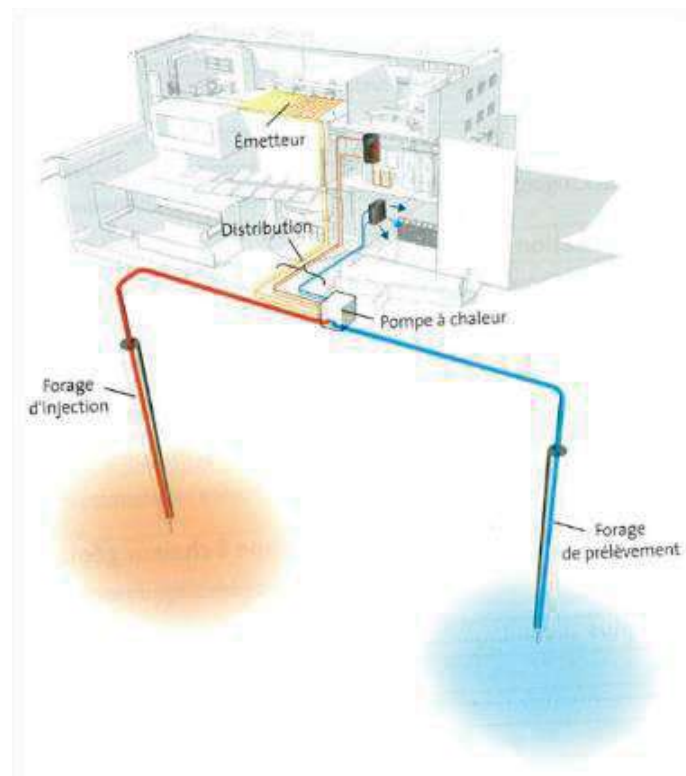


## 6 Dimensionnement d'un dispositif de géothermie sur nappe

### 6.1 Principe de fonctionnement

Le principe de la géothermie sur aquifère consiste à exploiter l'énergie disponible de manière permanente au sein d'une nappe d'eau souterraine.

L'eau souterraine est prélevée par l'intermédiaire d'un ou plusieurs forages de pompage. Elle est ensuite acheminée vers la pompe à chaleur (PAC), qui prélèvera les calories ou les frigories au travers d'un échangeur à plaques. L'eau est ensuite réinjectée dans le même aquifère par l'intermédiaire d'un ou plusieurs forages de réinjection (d'après le guide technique « Les pompes à chaleur géothermiques à partir de forage sur aquifère – Manuel pour la conception et la mise en œuvre » – BRGM, 2012).



(23) Schéma du principe de la géothermie sur aquifère (BRGM, 2012)

### 6.2 Définition de la faisabilité d'un dispositif de géothermie sur nappe

Afin de pouvoir valider la faisabilité géothermique sur nappe d'un projet, il est nécessaire de lever un certain nombre d'interrogations, qui sont :

- 💧 *Le fonctionnement thermique et hydrodynamique du dispositif de géothermie à long terme ;*
- 💧 *La possibilité d'implanter les forages sur le projet (voir § 6.7) ;*



- La capacité de pompage et de réinjection de la nappe au droit du projet (voir § 4.3) ;
- L'impact du projet sur son environnement (limitation à 4°C à 200 m autour du projet, voir § 6.6).

### 6.2.1 Fonctionnement thermique et hydrodynamique du futur dispositif de géothermie

Plusieurs aspects sont étudiés pour apprécier la faisabilité technique du doublet :

- La faisabilité d'un projet vis-à-vis de **son influence thermique** est principalement liée au phénomène de percée, qui correspond à la jonction d'une partie des champs d'action thermiques des forages de pompage et de rejet. Ce phénomène provoque le recyclage d'une partie de l'eau ayant déjà été exploitée : l'eau recyclée est une eau ayant déjà circulée dans la boucle géothermique. **La diminution de la température de l'eau pompée, peut provoquer une baisse du rendement au cours de l'exploitation géothermique ;**
- Dans le cadre des **incidences hydrodynamiques**, l'exploitation d'un doublet de forage entraîne localement une baisse du niveau piézométrique (au droit du puits producteur) et une hausse du niveau (au droit du puits injecteur). La zone d'influence du triplet correspond donc à la zone où le niveau piézométrique de la nappe exploitée est affecté par ces variations. Au-delà de cette zone, l'incidence hydraulique du projet est nulle.

La modélisation de l'exploitation géothermique sur aquifère est donc abordée selon deux approches :

- L'exploitation thermique est modélisée selon **une approche globale annuelle**. Ainsi, la simulation est basée sur un volume annuel d'énergie prélevé à la nappe, et non sur des débits instantanés (et donc des puissances thermiques).
- A l'inverse de l'aspect thermique, la modélisation de l'exploitation hydrodynamique est basée sur **le régime maximal** de fonctionnement jusqu'à stabilisation, soit un débit maximal de sollicitation de la nappe et non sur un débit moyen.

### 6.2.2 Exploitations voisines

Dans le cadre d'une étude géothermique, il est nécessaire de prendre en considération les exploitations voisines, afin d'étudier les différentes incidences entre projets qui pourront apparaître à court et à long terme. Dans un rayon de 200 m autour du projet, plusieurs systèmes géothermiques ont été recensés :

- **Projet « Talleyrand »** : installation sur doublet géothermique située au 4 rue Talleyrand, présentant un forage de pompage (FP) et un forage d'injection (FI) et permettant de satisfaire les besoins en chauffage et en refroidissement du bâtiment présent sur la parcelle ;
- **Projet « Grenelle »** : installation située au 120 rue Grenelle, présentant deux forages de pompage (F1 et F2) et quatre forages d'injection (F3, F4, F5 et F6) et permettant de couvrir les besoins de refroidissement du bâtiment de la parcelle. D'après les données disponibles sur ce projet, les forages de réinjection ne sont pas en fonctionnement et l'eau pompée est réinjectée au réseau.



**Compte tenu du sens d'écoulement supposé vers le Nord/Ouest des nappes et de la distance entre le site d'étude et les installations géothermiques présentées, il conviendra de s'assurer, avec les résultats de la modélisation, que le projet n'aura pas d'impact sur ces systèmes voisins et inversement.**

- 🔹 *Le forage injecteur doit être situé en aval du forage producteur ;*
- 🔹 *L'écartement entre le forage de pompage et de rejet doit permettre d'éviter le recyclage thermique ;*
- 🔹 *L'écartement entre le forage de pompage et de rejet doit rester le plus petit possible pour limiter les coûts de raccordement ;*
- 🔹 *Les contraintes d'accès et d'intervention en phase d'exploitation.*



## 6.4 Construction du modèle

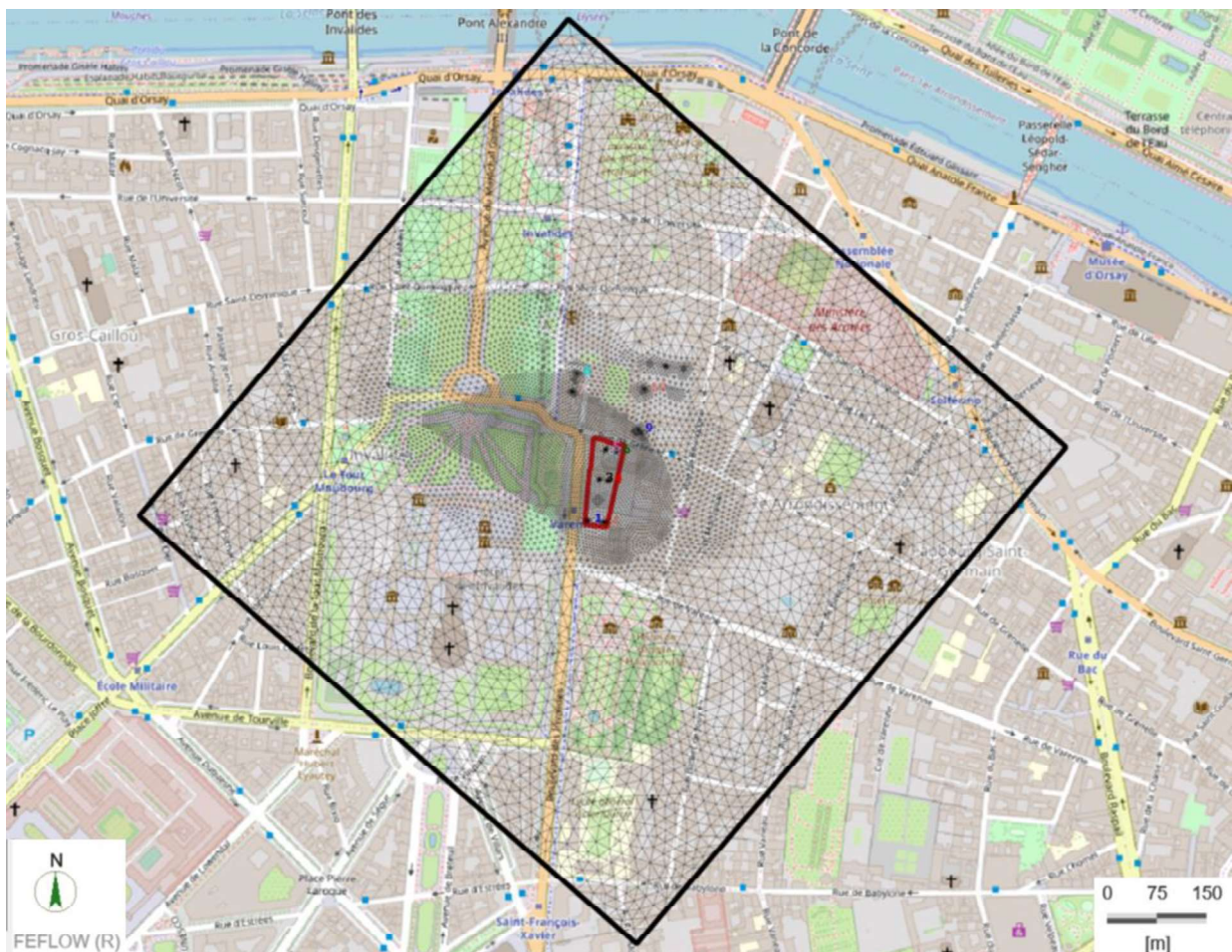
### 6.4.1 Structure du modèle

L'élaboration du modèle d'écoulement nécessite de délimiter le domaine d'étude, dans lequel seront distribuées les caractéristiques hydrodynamiques et thermiques de l'aquifère et des couches géologiques sus et sous-jacentes.

Il s'agit d'un modèle simplifié, réalisé selon les hypothèses retenues au stade du projet, et qui est représentatif de l'impact hydrodynamique et thermique du dispositif de géothermie sur nappe, au droit du site d'étude.

Le modèle du projet est divisé en 11 couches et s'étend sur une superficie de 1 km<sup>2</sup>, pour un volume total d'environ 24 millions de m<sup>3</sup>. Chaque plan du modèle présente un maillage triangulaire irrégulier. Ce maillage est localement densifié à proximité du projet et des ouvrages de géothermie.

L'orientation du modèle est définie selon la direction de l'écoulement de la nappe de l'Eocène Inférieur vers le Nord/Ouest, et selon un gradient hydraulique de 0,3 %.



(25) *Maillage du modèle réalisé sous logiciel FEFLOW*



Dans le détail, les couches lithologiques suivantes ont été modélisées :

(26) *Succession lithologiques modélisée par couches*

Formation	Cote du toit (m NGF)	Epaisseur (m)	Nombre de couches modélisées
Remblai	~ +35,5	2	1
Alluvions	+33,5	5,5	1
Calcaire Grossier Inférieur	+28	10	4
Sables du Soissonnais	+18	6	1
Fausses glaises du Vexin	+12	4	1
Sables d'Auteuil	+8	8	1
Argile plastique	+0	10	2

#### 6.4.2 Paramétrage et calage hydrodynamique et thermique du modèle

Le paramétrage d'un modèle tridimensionnel se déroule en plusieurs étapes selon le protocole suivant :

##### Définition du problème d'écoulement :

- Type de nappe : Nappe libre ;
- Type de calcul : Transitoire ;
- Tolérance sur l'erreur : Euclidien L2 intégrale (RMS) ;
- Forme de l'équation de transport : Convective.

##### Conditions initiales et aux limites :

- Valeur initiale de charge au droit du projet : + 25 m NGF ;
- Charge imposée en amont : + 25,13 m NGF ;
- Charge imposée en aval : + 24,87 m NGF ;
- Gradient hydraulique : 0,27 % ;
- Température initiale de la nappe : 15 °C.

##### Définition des caractéristiques hydrodynamiques et thermiques :

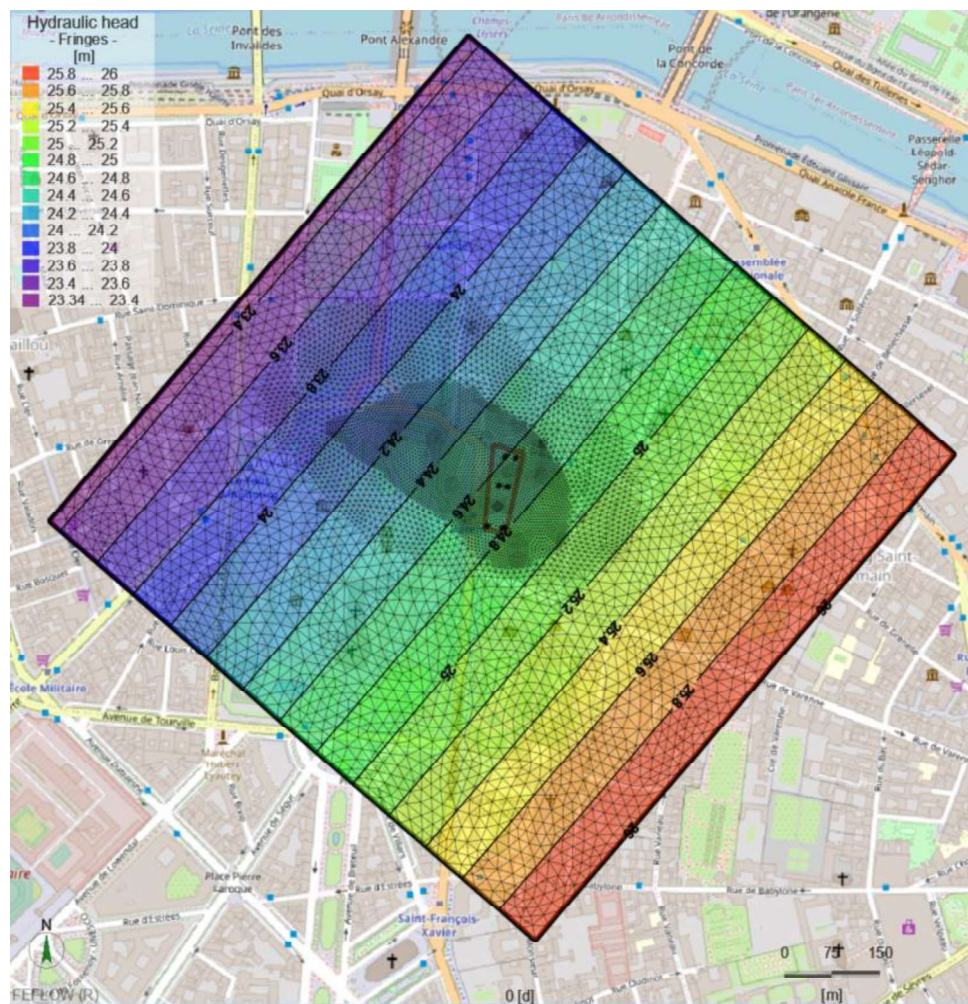
Les paramètres hydrodynamiques et thermiques sont implémentés de la manière suivante :

(27) Tableau de répartition des paramètres hydrothermiques des couches géologiques

Formation	Perméabilité horizontale Kh	Perméabilité verticale Kv	Porosité	Conductivité thermique	Capacité calorifique
Remblais	$5.10^{-5}$ m/s	$5.10^{-5}$ m/s	2 %	1,5 W/m/K	1,5 MJ/m <sup>3</sup> /K
Alluvions	$5.10^{-5}$ m/s	$1.10^{-5}$ m/s	2 %	2,2 W/m/K	2,3 MJ/m <sup>3</sup> /K
Calcaire Grossier Inférieur	$1,7.10^{-4}$ m/s	$3,4.10^{-5}$ m/s	5%	2,4 W/m/K	2,3 MJ/m <sup>3</sup> /K
Sables du Soissonnais	$1,6.10^{-4}$ m/s	$8.10^{-5}$ m/s	3 %	2,4 W/m/K	2,5 MJ/m <sup>3</sup> /K
Sables d'Auteuil	$1,6.10^{-4}$ m/s	$8.10^{-5}$ m/s	3 %	2,4 W/m/K	2,5 MJ/m <sup>3</sup> /K
Argile plastique	$1.10^{-9}$ m/s	$1.10^{-9}$ m/s	3 %	1,7 W/m/K	2,8 MJ/m <sup>3</sup> /K

**Calage piézométrique du modèle :**

Le calage piézométrique du modèle est ensuite lancé jusqu'à stabilisation des isopièzes de la nappe :



(28) Calage piézométrique du modèle FEFLOW

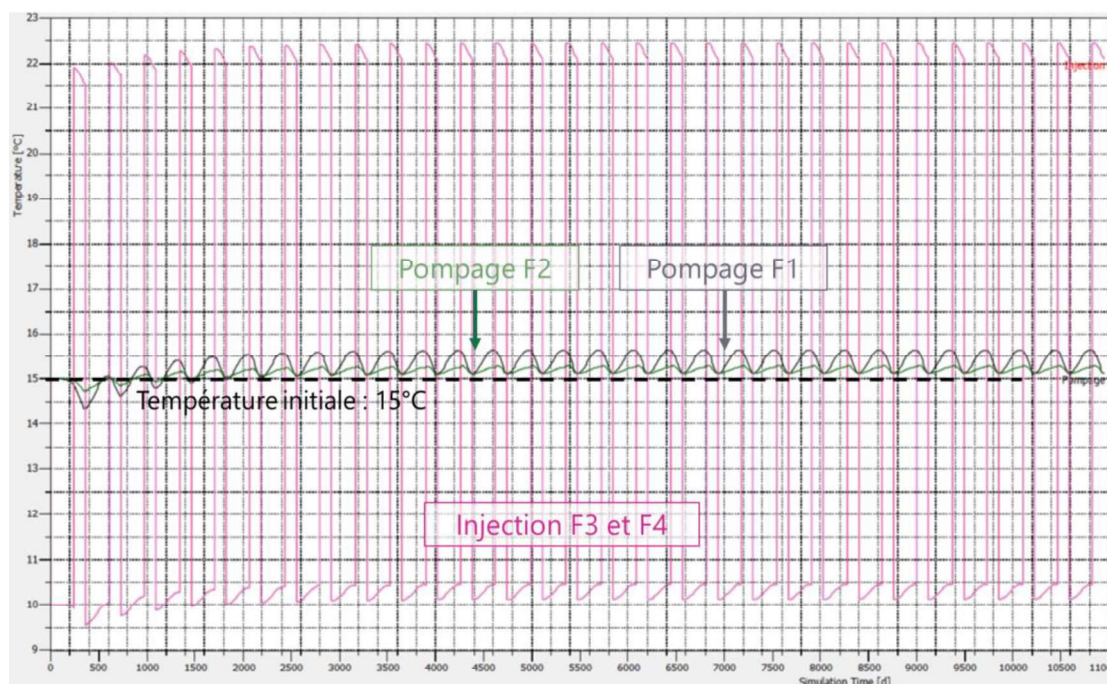
## 6.5 Résultats de la modélisation

Pour rappel, le scénario d'exploitation géothermique est limité à 25 m<sup>3</sup>/h, avec un taux de couverture d'énergie annuelle de 78% pour le chauffage et 80% pour la climatisation, en considérant des adaptations possibles sur le système de production d'énergie :

(29) Scénario de couverture énergétique modélisé

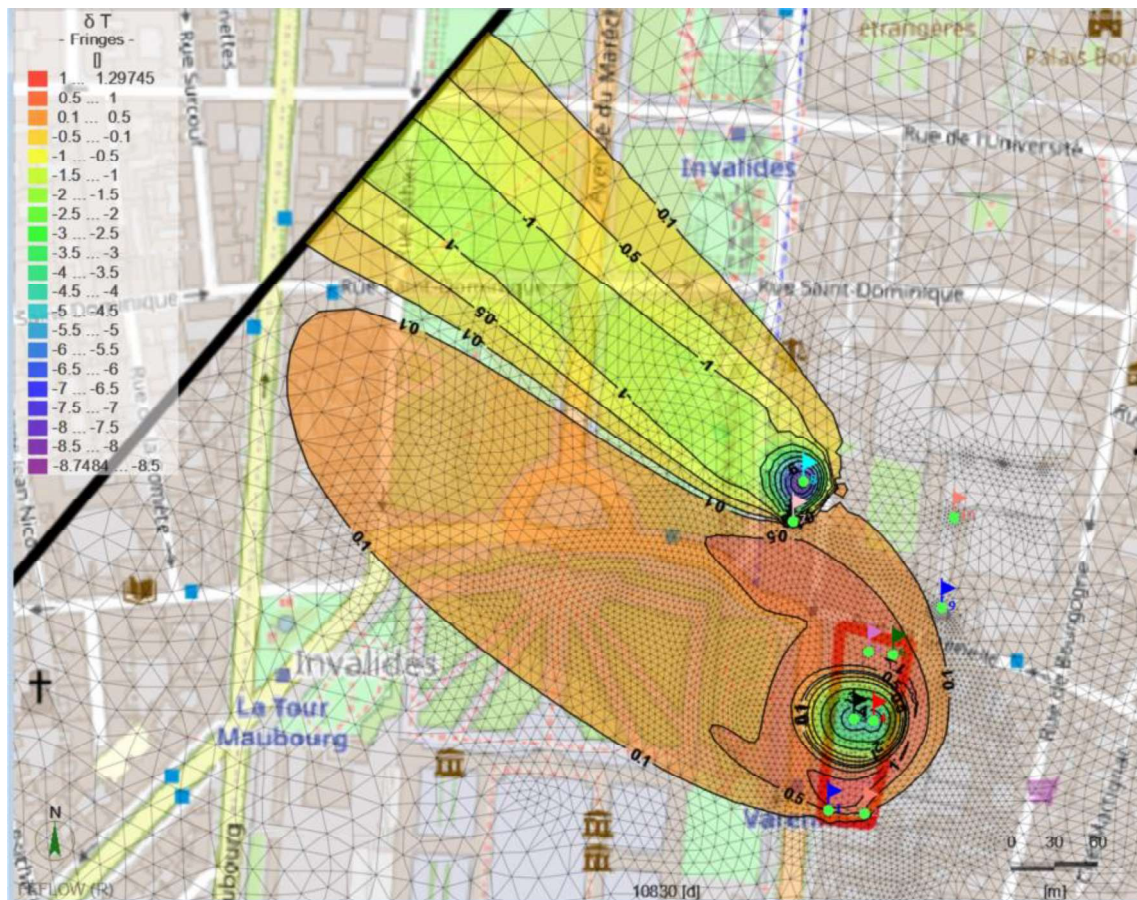
Mode	Chauffage	Climatisation
Surface à chauffer / climatiser	3 702 m <sup>2</sup>	2 962 m <sup>2</sup>
Couverture Puissance	59%	60%
Puissance bâtiment	110 kW	132 kW
Puissance sous-sol	83 kW	161 kW
Couverture Energie	78%	80%
Energie bâtiment annuelle	347 MWh/an	240 MWh/an
Energie sous-sol annuelle	260 MWh/an	293 MWh/an
Delta de température	-5 °C	+7 °C
COP/EER	4	4,5

La modélisation montre la présence d'un recyclage thermique après 30 ans d'exploitation, compris entre +0,6°C et +0,12 °C en fonction des saisons dans les ouvrages F1 et F2.



(30) Evolution de la température modélisée au droit des forages





(31) *Extension du panache thermique après 30 ans d'exploitation.*

**En conclusion, compte tenu de la configuration du site et sur la base des hypothèses retenues, il est possible d'envisager de satisfaire les besoins définis dans le scénario, à savoir une énergie côté bâtiment d'environ 347 MWh/an (78%) de chauffage et 240 MWh/an (80%) en climatisation avec un recyclage thermique limité sur 30 ans, en exploitant la nappe de l'Yprésien.**

**Remarque :**

Pour rappel, seule une phase de reconnaissance permettra de déterminer précisément le sens d'écoulement et le gradient hydraulique des deux nappes, toutefois la valeur de gradient étudiée semble permettre l'exploitation pérenne sur la base du scénario énergétique défini, quelle que soit la nappe exploitée entre celle du Lutétien et celle de l'Yprésien.



## **6.6 Impact du projet sur son environnement**

D'après les résultats des modélisations hydrothermiques, le projet a un impact mesuré sur son environnement, avec une variation induite de température de +0,5 °C maximum à environ 40 m à l'Ouest du projet quelle que soit la nappe exploitée (Lutétien ou Yprésien). Le panache de variation thermique de la nappe de l'Yprésien est présenté au § 6.5.







Ainsi, la variation de température de l'aquifère est inférieure à 4 °C à 200 m du projet après 30 ans d'exploitation, respectant les réglementations de la Géothermie de Minime Importance.

De plus, le panache thermique n'atteint pas le système géothermique « Grenelle » déjà existant au Nord du projet (voir § 6.2.2). Aucun impact sur celui-ci n'est donc à prévoir avec les hypothèses faites dans cette étude.

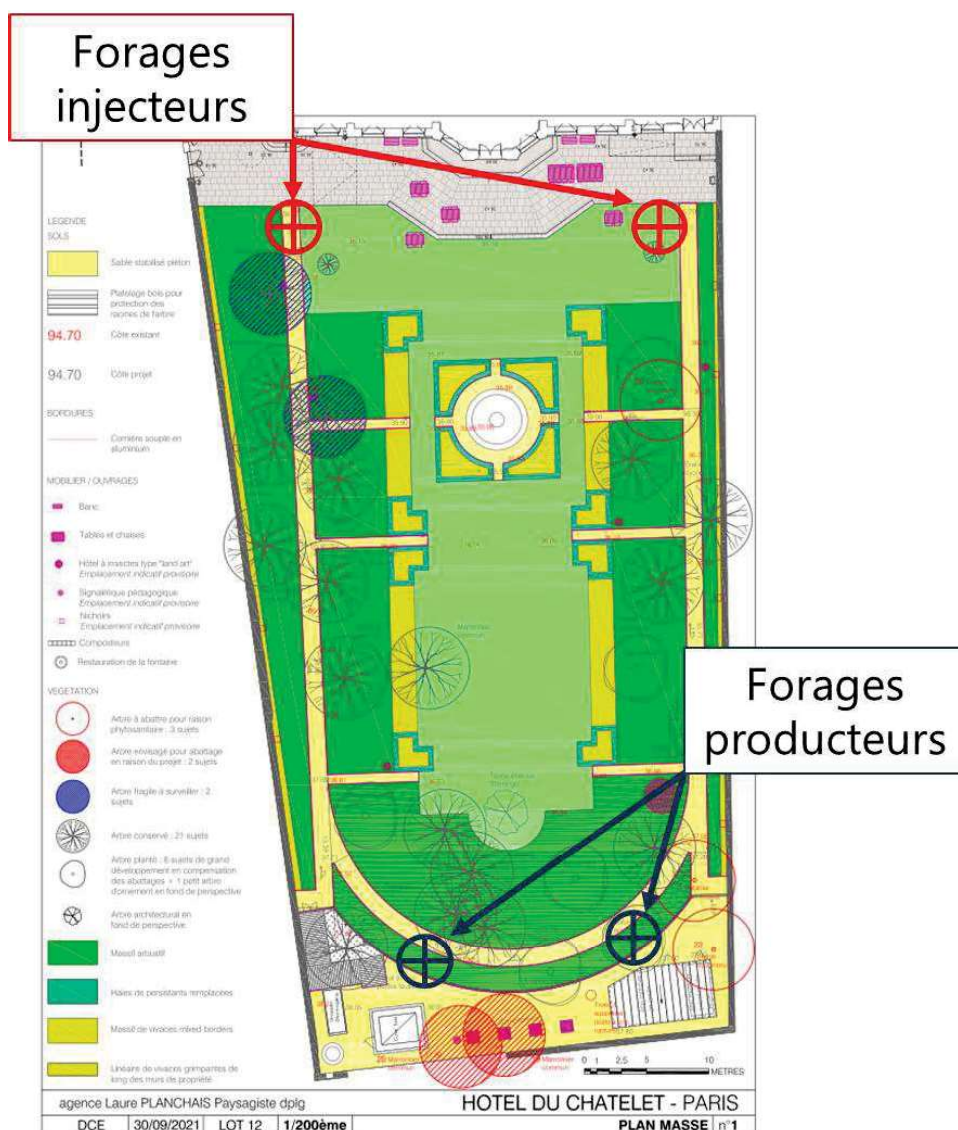
Le panache thermique atteint cependant le système géothermique « Talleyrand » au Nord-Ouest du projet (voir § 6.2.2). L'impact thermique est toutefois très faible, et varie entre 0,4°C et 0,5°C en fonction des saisons (voir figure 30 § 6.5).

## **6.7 Possibilité d'implanter les forages sur site**

La proposition d'implantation tient compte de plusieurs paramètres :

-  *Les forages injecteurs doivent être situés en aval des forages producteurs ;*
-  *La distance entre les forages injecteurs et les forages producteurs doit permettre d'éviter le recyclage thermique ;*
-  *La distance entre les producteurs et les injecteurs doit être optimisée afin de limiter le coût de raccordement entre les forages ;*
-  *Il sera impératif de vérifier l'absence d'infrastructures enterrées au droit des ouvrages, telles que les lignes de métro et de RER ;*
-  *Les forages doivent être disposés de façon à faciliter leur raccordement (par exemple par un passage facilité de tuyaux en plafond) ;*
-  *Les forages doivent rester accessibles afin de réaliser les maintenances de l'exploitation.*

L'implantation des forages proposée est fondée sur les facilités d'accès et les zones de pleine terre présentes sur les plans du projet. Ainsi, les forages producteurs et injecteurs pourraient être espacés d'une soixantaine de mètres environ et, selon la modélisation réalisée et présentée précédemment, cet espacement est suffisant pour limiter le recyclage thermique et l'équilibrer sur une année d'exploitation. L'implantation est présentée en figure suivante pour le sens d'écoulement défini précédemment.



(32) Proposition d'implantation des forages géothermiques sur fond de plan du jardin du projet

**Remarque :**

L'implantation des forages est proposée en première approche et devra faire l'objet d'une validation dans les étapes suivantes du projet.

**Les forages devront être implantés le plus éloignés possible de la salle des Accords (situé en haut à droite du plan) et hors de la vue depuis cette salle.**

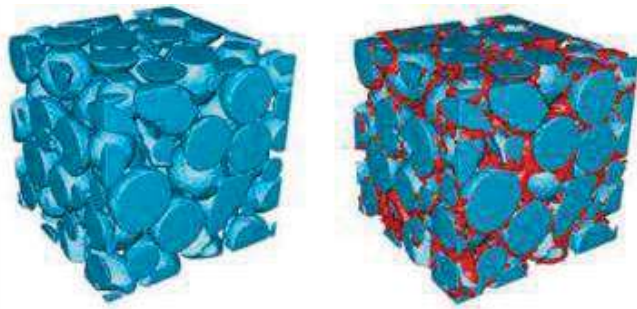
**L'acheminement de la machine de forage pour la réalisation des forages producteurs nécessitera soit l'agrandissement du passage existant soit le grutage de la machine.**

## 6.8 Facteur d'injectivité de la nappe

### 6.8.1 Présentation des phénomènes

La capacité de réinjection de l'eau de nappe et sa variation dans le temps pour des ouvrages de géothermie est très peu connue de nos jours. En effet, il a été constaté sur de nombreux ouvrages profonds et pétroliers, que la capacité de réinjection de certains ouvrages était très limitée par rapport à leur productivité et pouvait également varier dans le temps durant l'exploitation. Plusieurs phénomènes pourraient expliquer ces problématiques de réinjection :

- **Le phénomène thermique** : pour une perméabilité intrinsèque du milieu donné, la conductivité hydraulique pour l'injection d'un fluide froid serait inférieure à celle de l'injection d'un fluide chaud.
- **Le phénomène hydrodynamique** : la capacité d'injection d'une nappe est très généralement dissymétrique par rapport à sa capacité de pompage et ce phénomène peut être amplifié par les caractéristiques des forages réalisés et de leurs pertes de charges quadratiques.
- **Le phénomène chimique** : le changement de température lié à l'extraction de la chaleur et les apports exogènes (corrosion, entrée d'oxygène, ...) peuvent provoquer la précipitation d'éléments chimiques qui auront tendance à colmater les pores de l'aquifère.
- **Le phénomène de transport de particules et de microbulles** : le transport de particules et/ou de microbulles va obstruer les canaux colmatables de petit diamètre, ce qui peut provoquer une perte d'injectivité très rapide et très importante.
- **Le phénomène de réagencement des grains sableux et argileux** : sous la pression de réinjection du fluide les grains sableux et argileux se réorganisent modifiant ainsi la porosité effective du réservoir et donc son injectivité.



(33) Schéma de principe de colmatage de pores d'un aquifère par précipitation (BRGM)

### 6.8.2 Capacité de réinjection d'un forage

Le phénomène hydrodynamique reste prédominant dans la capacité de réinjection à court terme alors que les autres phénomènes apparaissent souvent à plus long terme lors de l'exploitation du dispositif.

Il est donc fondamental d'étudier l'impact hydraulique de la réinjection en s'assurant de limiter les surpressions, afin d'éviter le phénomène de remontée des eaux souterraines. La hauteur admissible  $S_{admissible}$  de remontée du niveau d'eau est égale à la différence entre le plancher bas du sous-sol et le niveau statique de la nappe sollicitée en période de hautes eaux, soit pour la nappe de l'Yprésien :

$$S_{admissible} = 30 - 10 = 20 \text{ m}$$




La réinjection est un facteur limitant pour l'installation d'un dispositif de géothermie sur nappe. Toutefois, des essais d'injection devront être réalisés au droit du forage de reconnaissance afin de valider les hypothèses de calcul.

**Concernant les autres paramètres pouvant influencer l'injectivité d'une nappe, seules des mesures conservatoires d'équipement ou de régulation comme définies dans la suite du rapport permettront de minimiser l'aléa sous réserve de la qualité de l'eau.**

## **6.9 Contraintes de mise en œuvre et d'exploitation d'une installation de géothermie sur nappe**




### **6.9.1 Réinjection de l'eau pompée dans la même nappe**

La réinjection de l'eau prélevée dans la même nappe nécessite quelques précautions d'usage, afin d'éviter le colmatage du forage de réinjection :

-  Limiter les risques de dépôts par un système de filtration et en évitant les processus chimiques ou bactériologiques favorables aux dépôts ;
-  Ne pas oxygéner l'eau (vanne de maintien de pression) ;
-  Prévoir un nettoyage régulier des forages.

### **6.9.2 Régulation de l'exploitation**

Afin d'optimiser le fonctionnement et la durée de vie de l'installation, quelques préconisations de régulation doivent être prises en compte :

-  Le nombre de mises en marche-arrêt des pompes de forage doit être limité. Les démarrages trop fréquents entraînent une usure prématurée de la pompe mais aussi une dégradation du forage (ensablement, déstabilisation du massif filtrant) ;
-  Le démarrage de la pompe doit être progressif (variateur de fréquence) afin d'éviter l'entraînement de fines particules et à long terme de l'ensablement du forage ;
-  La régulation est basée sur une optimisation du delta-température afin de minimiser le plus possible le débit sur nappe ;





- La mise en place de filtres avant l'échangeur en fonction des caractéristiques physico-chimiques de l'eau doit être prévue ;
- La mise en place de capteurs de pression au droit des forages, afin d'éviter la montée en pression au droit des forages de réinjection, le dénoyage de l'aquifère (cas d'une nappe captive) et de la pompe immergée dans le forage de pompage ;
- La mise en place d'un débitmètre permettant de vérifier les volumes prélevés ;
- Le dispositif de géothermie ne devra pas induire de débits de pompage supérieurs au débit maximal admissible sur l'installation ;
- La température de réinjection devra être surveillée et ne devra pas dépasser une température de l'ordre de 25°C en été afin d'éviter de favoriser les phénomènes précipitations de certains minéraux ou le développement bactérien ;
- La température de l'eau en hiver ne devra pas descendre sous une température de l'ordre de 5°C afin d'éviter les phénomènes de précipitations de certains minéraux ;
- Suivre en continu les signaux de fonctionnement avec la mise en place de retour d'alerte et d'arrêt d'urgence :
  - Le débit de pompage et de rejet ;
  - La température entrée/sortie de l'échangeur à plaques ;
  - Les niveaux d'eau dans les forages ;
  - Les heures de mise en marche/arrêt de l'installation ;
  - La pression sur le réseau.

### 6.9.3 Maintenance de l'installation

Une maintenance des forages et des installations de la boucle primaire doit être prévue. Elle porte sur le contrôle des paramètres de fonctionnement des pompes, le suivi des niveaux d'eau dans le forage, le nettoyage régulier des filtres, l'inspection des forages et les opérations de nettoyage des ouvrages.

**Il est conseillé au Maître d'Ouvrage de contractualiser avec une entreprise de forage géothermique spécialisée dans la maintenance et l'exploitation de ce type d'installation (voire avec un cabinet spécialisé en hydrogéologie), afin de planifier un protocole d'entretien annuel et un protocole de nettoyage et de régénération des ouvrages :**

- Un protocole d'entretien annuel préventif :
  - Un suivi mensuel des paramètres de fonctionnement enregistrés dans la GTB et l'armoire de commande avec analyse et interprétation des données par un ingénieur hydrogéologue ;
  - Un suivi mensuel visuel des équipements de la boucle géothermale primaire (chambre de forage, état des vannes, état de la tuyauterie, vérification du filtre, ...) ;



- *Un nettoyage régulier des filtres et l'élaboration d'une fiche d'observation de l'historique de l'état de l'eau de forage ;*
- *Un prélèvement d'eau pour analyse physico-chimique et bactériologique en sortie de producteur afin de vérifier sa stabilité ionique (**deux analyses la première année, à la fin de chaque cycle, puis fréquence a priori annuelle, à réviser à partir des résultats des précédentes analyses**).*
- 💧 *Un protocole de nettoyage et de régénération curatif (rythme de 5 à 9 ans) :*
  - *Nettoyage des équipements hydrauliques présents sur la boucle géothermale avec notamment une javellisation ;*
  - *Inspection visuel (caméra vidéo immergée) des ouvrages afin de vérifier l'état des crépines et la turbidité de l'eau du forage ;*
  - *Brossage des crépines des forages ;*
  - *Nettoyage par air-lift et acidification pour régénérer le forage suivis d'essais de pompage de caractérisation ;*
  - *Le cas échéant, remplacement de certains équipements hydrauliques (pompe immergée, filtres, compteurs,...) sur une périodicité de 5 à 10 ans.*

Le programme proposé ci-dessus sera à ajuster en fonction des conditions réelles d'exploitation et en fonction des premières années de fonctionnement de l'installation. De plus, dans le cas où des développements bactériens apparaîtraient rapidement sur l'installation, il sera nécessaire de procéder à une analyse plus précise des causes avant de procéder à un quelconque nettoyage et remise en service de l'installation.

## 7 Description des installations géothermiques envisagées

### 7.1 Géothermie sur nappe

De manière générale, la boucle géothermale comprend les forages d'eau géothermiques, les équipements hydrauliques et l'échangeur à plaques géothermique situé en amont de la pompe à chaleur (dimensionnée par un bureau d'étude CVC/thermique) :

- Les forages géothermiques possèdent un diamètre et une profondeur en adéquation avec les besoins énergétiques souhaités et la nappe d'eau souterraine recherchée. Les ouvrages peuvent être de type mono-diamètre ou posséder un télescopage, en fonction des couches géologiques traversées. L'équipement des ouvrages est également adapté à la nature de l'aquifère capté (sableux, calcaire, fracture...) et de la qualité physico-chimique de l'eau pompée (incrustante, corrosive...).

**L'Annexe 2** présente les coupes géologiques et techniques prévisionnelles des ouvrages d'eau captant les Sables du Soissonnais et Sables d'Auteuil entre 17,5 et 35 m de profondeur **sur la base de la mise en place d'une pompe d'une capacité de 25 m<sup>3</sup>/h**. Les forages devront être réalisés par une machine suffisamment dimensionnée pour ce type d'opération. Les forages devront être réalisés selon la méthodologie suivante :

- Forage de pompage et d'injection :
  - Foration en Ø610 mm jusqu'à 7,5 m de profondeur ;
  - Pose et cimentation sous pression d'un tubage acier Ø 508 mm jusqu'à 7,5 m de profondeur ;
  - Foration en Ø445 mm jusqu'à 17,5 m de profondeur ;
  - Pose et cimentation sous pression d'un tubage acier Ø 323 mm jusqu'à 17,5 m de profondeur ;
  - Foration en Ø 311 mm jusqu'à 35,5 m de profondeur ;
  - Pose d'une crépine INOX à fils enroulé (slot 0,75 mm) Ø 160 mm de 17,5 à 34,5 m de profondeur ;
  - Pose d'un tubage INOX plein de 15,5 à 17,5 m de profondeur pour réserve à gravier ;
  - Pose d'un tube de fermeture de fond d'un mètre entre 34,5 et 35,5 m de profondeur ;
  - Mise en place d'un massif filtrant siliceux entre 16 et 35,5 m de profondeur par circulation d'eau au travers d'une canne d'injection.



- Dès la fin des travaux de forages, il sera nécessaire de réaliser les phases de nettoyage, de développements et de pompage/injection du réservoir, selon les étapes suivantes :
  - Nettoyage par air-lift double colonne jusqu'à obtention d'une eau claire ;
  - Injection en deux passes de 160 kg d'hexamétaphosphate à l'aide d'une canne d'injection et attente de réaction pendant 2h entre chacune des passes ;
  - Nettoyage par air-lift double colonne jusqu'à obtention d'une eau claire après chaque passe d'acide ;
  - Mise en place d'une pompe de forage immergée ;
  - Pompages de développement pendant 12 heures,
  - Essai de pompage par paliers enchainés (5 paliers d'une heure, avec dernier palier à au moins 30 m³/h) ;
  - Pompage de longue durée de 48 heures avec suivi de la remontée ;
  - Contrôles du forage (micromoulinet, vidéo, ...) ;
  - Analyse physico-chimique de l'eau de nappe ;
  - Essai de réinjection par palier de débits enchainés ;
  - Essai de réinjection pendant 12 h ou plus ;
  - Essai en boucle pendant 24 h.



(34) Atelier de forage de 22 tonnes



(35) Crépine inox en fil enroulé

- Les équipements des ouvrages et les chambres de forage qui seront situées à l'aplomb du forage doivent être accessibles en tout temps pour les opérations de maintenance ou de dépannage. De manière non-exhaustive, les équipements pourront être :
  - Une pompe immergée dimensionnée au débit recherché ;
  - Une colonne d'exhaure ;
  - Des capteurs de pression ;
  - Une chambre de forage.





(36) *Chambre de forage avec regard carrossable de type Fibrelite*

**Remarque :**

Ces chambres de forage avec regard d'accès peuvent être positionnées sur tout type de surface (sol enherbé, parvis, sous-sol, chaussée...) mais doivent rester accessibles à un engin de levage. En cas d'implantation en zone très restreinte à faible hauteur sous plafond, des adaptations devront être prévues pour maintenir l'accès au forage.

Les équipements hydrauliques de raccordement et en local PAC se situant en amont de l'échangeur à plaques géothermiques, permettent la filtration de l'eau de nappe, le comptage énergétique et la régulation du dispositif. De manière non-exhaustive, les équipements pourront être :

- La canalisation de raccordement entre les forages et le local PAC ;
- Le dispositif de filtration pour récupérer les fines particules contenues dans l'eau pompée ;
- Le comptage débitmétrique et énergétique ;
- Les capteurs de température ;
- L'armoire de commande équipée d'un variateur de fréquence.



(37) *Equipements spécifiques pour la géothermie en local chaufferie*

L'impact sonore de la réalisation des forages géothermiques est quantifié dans le document *Essais Acoustiques sur foreuse électrique S500 et matériels techniques associés* présenté en **Annexe 4**.

## 7.2 Phase de reconnaissance

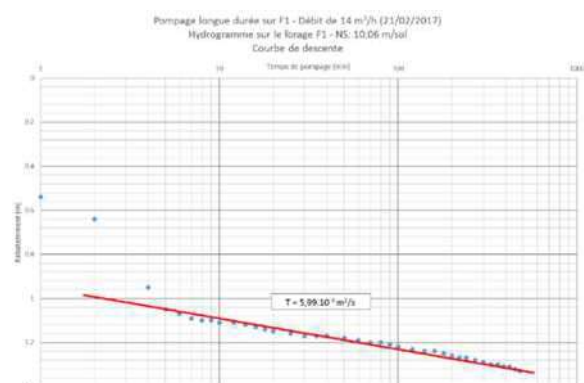
A la suite de l'étude de faisabilité géothermique, fondée sur des hypothèses bibliographiques, et dans le cas où la pertinence de la solution par géothermie est avérée sur le projet d'un point de vue énergétique, économique et environnemental, il est nécessaire de procéder à une phase de reconnaissance permettant de déterminer les paramètres réels du sous-sol au droit du projet et d'affiner ou valider les premières conclusions.

***Cette phase de reconnaissance permet uniquement de valider définitivement le débit sur nappe. Aussi, il est important, avant cette phase, de valider la pertinence économique et énergétique de cette solution pour le futur projet.***

**Pour la géothermie sur nappe aquifère (durée d'intervention d'environ 2 mois)**, la phase de reconnaissance consiste à réaliser un forage d'eau dimensionné comme un ouvrage définitif. Dès la fin de la phase de forage, il est nécessaire de procéder au nettoyage et au développement chimique de l'ouvrage selon un protocole précis. Les tests de productivité et d'injectivité sont réalisés à la suite de ce nettoyage et sous contrôle du Maître d'Œuvre géothermique. Cette phase permet de valider définitivement les hypothèses de calcul et de vérifier la productivité de la nappe ainsi que sa qualité physico-chimique.



(38) *Essai de pompage dans un forage de reconnaissance*



(39) *Interprétation d'un essai de pompage*

A la suite de la phase de reconnaissance, suivie par le Maître d'Œuvre géothermique, les données in-situ sont interprétées et utilisées afin de mettre à jour l'étude de faisabilité, spécifier la conception en phase APD et le dimensionnement des installations. Cette phase APD peut par ailleurs être considérée comme une phase d'étude de projet (PRO) dans le cadre de la géothermie.

***Le Maître d'Œuvre géothermique aura également le rôle de vérifier la bonne intégration de la géothermie dans la conception de la production énergétique en relation directe avec le MOE thermique.***



## 8 Assurance en termes de géothermie

---

Dans le cadre de la mise en œuvre d'une opération de géothermie, le Maître d'Ouvrage peut être couvert de deux manières :

- *Par l'obligation des entreprises et les bureaux d'études de posséder une assurance destinée à réparer tout dommage immobilier ou tout ensemble de dommages immobiliers causés à des tiers pour une période de 10 ans (conformément au décret 2016-835 du 24 juin 2016),*
- *Par la souscription d'une assurance AQUAPAC pour les opérations de géothermie **sur nappe** qui permet de souscrire à une assurance lors des phases de reconnaissance (AQUAPAC Recherche) devant le risque d'échec et une assurance pour 10 ans d'exploitation (AQUAPAC pérennité) devant le risque de baisse de la productivité des forages.*





## 9 Evaluation de l'enveloppe budgétaire d'investissement

A partir des résultats présentés, il est possible de définir une première enveloppe budgétaire pour la réalisation d'une installation de géothermie très basse énergie avec un débit de pointe de 25 m<sup>3</sup>/h. L'estimation comprend la réalisation des forages, leur équipement et le raccordement au local technique avec le dispositif de filtration et de régulation (hors pompe à chaleur et échangeur à plaque).

### (40) Evaluation des coûts d'investissement pour le projet




Désignation	Yprésien 2 forages de 35 m
<b>Résultat énergétique (hors pic)</b>	
Puissance couverte en chaud / en froid	110 kW / 132 kW
Energie couverte chauffage / climatisation	347 MWh/an (78 %) / 240 MWh/an (80 %)
<b>Résultat financier</b>	
	<b>Phase de reconnaissance (€ HT)</b>
Phase de reconnaissance (y compris rebouchage)	89 000
Reconnaissance géophysique	15 000
Assurance AQUAPAC recherche (5%)	4 000
<b>TOTAL Reconnaissance</b>	<b>108 000 € HT</b>
	<b>Phase définitive (€ HT)</b>
Travaux de forages définitifs	230 000
Equipement des forages (y compris rétrolavage)	140 000
Raccordement	Evaluation par SERMET
Chambres de forage (hors contrainte majeure)	50 000
Equipement en local PAC	60 000
<b>TOTAL Phase définitive</b>	<b>480 000 € HT</b>
<b>TOTAL Investissement + aléa 3%</b>	<b>~ 605 000 € HT</b>
<b>TOTAL avec TVA 20%</b>	<b>~ 726 000 € TTC</b>
Maitrise d'Œuvre géothermique	50 000 € HT
Assurance AQUAPAC Recherche/Pérennité	17 000 € HT



## 10 Estimation des coûts d'exploitation

---

Une approche du coût global de l'exploitation géothermique a également été réalisée. Après validation par le bureau d'étude SERMET, les hypothèses retenues pour l'estimation du coût d'exploitation sont :

-  *Cost P1 – Consommation électrique de la pompe immergée : 3 460€ HT/a (17,3 MWh/an),*
-  *Cost P2 – Visites mensuelles : 4 200 € HT/a,*
-  *Cost P3 – Régénération des forages (5 à 8 ans) et changement des pompes : 9 000 € HT/a.*



## 11 Conclusion

Dans le cadre du projet de rénovation de l'Hôtel de Châtelet, qui abrite le Ministère du Travail, du Plein Emploi et de l'Insertion, et qui se situe dans le VII<sup>e</sup> arrondissement de Paris, au 127 rue de Grenelle, le Maître d'Ouvrage souhaite étudier la possibilité de recourir à une solution de géothermie très basse énergie afin d'alimenter en chauffage et climatisation les bâtiments.

Au stade actuel du projet, les besoins énergétiques sont présentés dans le tableau suivant. Les puissances d'appel du bâtiment et les énergies annuelles ont été estimées par le bureau d'étude SERMET.

(41) Conclusion : Besoins énergétiques totaux du projet (SERMET)

Mode	Puissance d'appel du bâtiment	Energie annuelle E <sub>bâtiment</sub>
Chauffage	187 kW	443 MWh/an
Climatisation	220 kW	300 MWh/an*

**Etant donné l'absence de place disponible sur l'emprise projet présentant un bâtiment total existant, un scénario sur sondes géothermiques n'est pas envisageable, aussi cette étude s'est intéressée uniquement à un dispositif de géothermie sur nappe.**

Après analyse géologique et hydrogéologique du site, et compte tenu des incertitudes d'épaisseur du Lutétien sur le site, c'est la nappe de l'Yprésien qui a été sélectionné pour la suite de l'étude.

Les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère de l'Yprésien permettent d'envisager une productivité probable de la nappe sur deux doublets de forage (deux producteurs et deux injecteurs) d'environ 25 m<sup>3</sup>/h au total. Ainsi, à ce stade et sur la base du potentiel géothermique identifié, le scénario géothermique retenu est le suivant

(42) Estimation des couvertures énergétiques du scénario retenu – géothermie sur nappe

Mode	Côté bâtiment		Côté sous-sol		Delta de température	Débit de pointe sur nappe
	Puissance P bâtiment	Energie E bâtiment	Puissance P géothermique	Energie E géothermique		
Chauffage	110 kW (59%)	347 MWh (78%)	83 kW	260 MWh	-5°C	14 m <sup>3</sup> /h
Climatisation	132 kW (60%)	240 MWh (80%)	161 kW	293 MWh	+7°C	20 m <sup>3</sup> /h

**Réglementairement**, la mise en œuvre de la solution géothermique pourra rester en régime de déclaration pour les forages d'injection au titre de la Géothermie de Minime Importance. Concernant les forages de pompage, il sera nécessaire de réaliser un avis d'expert préalable.



**Thermiquement**, le recyclage thermique du scénario de couverture étudié est acceptable, d'environ +0,60 °C, assurant ainsi la pérennité thermique interne des doublets géothermiques. L'impact thermique de l'exploitation sur les avoisinants est faible puisqu'à 40 m du projet la variation de la température de la nappe est de +0,5 °C et donc conforme à la réglementation de la GMI.

L'impact thermique sur l'installation existante rue Talleyrand est par ailleurs très faible, et varie entre 0,4°C et 0,5°C en fonction des saisons (voir § 6.5).

**Hydrauliquement**, le projet aura également un impact limité sur les avoisinants, puisque la variation piézométrique induite est de l'ordre 0,2 m à ~10 m du projet pour la solution sur nappe.

**Remarque :**

*Pour rappel, l'étude de préfaisabilité réalisée par StratéGéO Conseil est fondée sur des données énergétiques et architecturales transmises au stade actuel du projet. Les éléments présentés devront être validés lors des phases ultérieures de conception.*

*Il est important de noter que ces résultats de modélisation sont dépendants des conditions hydrauliques définies lors de la construction du modèle, et notamment du sens d'écoulement et du gradient hydraulique retenu à 0,3 %. Une simulation numérique définitive pourra être réalisée avec le sens d'écoulement et le gradient hydraulique de l'aquifère fixés après la phase de reconnaissance.*

**Financièrement**, la mise en œuvre d'une géothermie induit des coûts de travaux pouvant atteindre environ 605 000 € HT pour la mise en œuvre des forages géothermiques (hors MOE géothermie) jusqu'au local PAC.

**En conclusion, à ce stade de la conception du projet, l'étude de faisabilité a permis de définir que la mise en œuvre d'un doublet géothermique sur la nappe l'Yprésien permettrait de couvrir 78% des besoins annuels en chauffage et 80% des besoins annuels en climatisation du projet et ceci de manière pérenne. Les besoins restants devront être couverts par un dispositif d'appoint.**

**Le scénario énergétique reste à définir précisément par une STD notamment, qui devra permettre de valider les choix techniques et les taux réels de couverture de la géothermie.**

**Pour rappel, seule une phase de reconnaissance avec un essai de pompage et un essai en injection en vraie grandeur permettra de valider définitivement la capacité des forages à produire ou à absorber les débits d'exploitation.**





## ANNEXE 1 : CLASSES D'ALTERATION ET VALEURS SEUIL DU SEQ RELATIF A L'USAGE ENERGIE

---



### 2.3. USAGE ENERGIE






L'eau souterraine est parfois utilisée à des fins énergétiques pour le chauffage (pompes à chaleur ou géothermie) ou pour la climatisation. L'utilisation géothermique de l'eau est de nature très ponctuelle par rapport à l'utilisation pour le fonctionnement de pompes à chaleur ou de climatisation. Les nappes alluviales, en raison de leur accessibilité, sont fréquemment sollicitées en site urbain, pour ce type d'usage. Pour l'usage énergie, il a donc été décidé de ne retenir que ces deux derniers aspects (pompes à chaleur et climatisation).

#### Les différentes classes d'aptitude de l'eau pour l'usage énergie

Classe	Aptitude pour satisfaire l'usage
Bleu 	Très bonne
Vert 	Bonne
Jaune 	Passable
Orange 	Mauvaise
Rouge 	Inapte à satisfaire l'usage


#### Les altérations

Trois altérations décrivent l'usage de l'eau souterraine à des fins énergétiques : la température, la corrosion et la formation de dépôts. Les deux dernières altérations sont identiques à celles décrivant l'usage industrie. Le lien entre les différentes classes d'aptitude de l'usage exprimées ci-dessus et les classes de qualité de chacune de ces trois altérations est le suivant :

Classe	Climatisation / pompes à chaleur	Corrosion	Formation de dépôts
Bleu 	favorable à l'usage énergétique considéré	absence de corrosion	pas de risques de dépôts importants
Vert 	permet l'usage énergétique considéré	corrosion faible	peu de risques de dépôts
Jaune 	usage délicat pour raisons techniques ou économiques	corrosion modérée	risques de dépôts
Orange 	(1)	corrosion moyenne	(1)
Rouge 	(1)	corrosion forte	dépôts très importants

(1) classe non définie.



Le motif  indique dans les tableaux ci-après que le paramètre ne décrit pas la (ou les) classe(s) d'aptitude à l'usage.

### Altération Température - Usage Climatisation

Les valeurs seuils des différents états dépendent des objectifs poursuivis en matière de climatisation. Les valeurs seuils proposées le sont sur la base d'une climatisation de locaux à usage d'habitation.

Paramètre	Unité	Bleu	Vert	Jaune
Température	°C	> 8 et ≤ 12	> 12 et ≤ 15	≤ 8 ou > 15

Des températures inférieures à 8°C peuvent occasionner des problèmes de dysfonctionnements au niveau des installations (problèmes de condensation par exemple).

### Altération Température - Usage Pompes à chaleur

Paramètre	Unité	Bleu	Vert	Jaune
Température	°C	> 15 et ≤ 60	> 8 et ≤ 15	≤ 8 ou > 60

Des températures inférieures à 8°C peuvent occasionner des problèmes de dysfonctionnements au niveau des installations (problèmes de condensation par exemple).

### Altération Corrosion

Paramètres	Unités	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
CO <sub>2</sub> dissous	mg/l	50		120	200	
O <sub>2</sub> dissous	mg/l	absence ou > 8	> 0 et ≤ 0.1		> 0.1 et ≤ 4	> 4 et ≤ 8
Salinité*	g/l NaCl	0.6		1.5	3	
Conductivité*	µS/cm	1500		3000	6000	
pH		> 9.8	> 7 et ≤ 9.8	≥ 6 et ≤ 7		< 6
Chlorures*	mg/l	150		400	1000	
Sulfates*	mg/l	250		500	1500	
Ferro-bactéries		absence				présence
Bactéries sulfato-réductrices	N/ml	absence	10		100	
Sulfures	mg/l HS <sup>-</sup>	0.1		8	50	
Eh (potentiel d'oxydoréduction)	mV	≤ -600 ou > 0		> -600 et ≤ -500	> -500 et ≤ -400	> -400 et ≤ 0

\* au moins l'un des quatre paramètres doit être mesuré. Le choix pourra être effectué en fonction des problématiques locales.



### Altération Formation de dépôts

Paramètres	Unités	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
<b>pH</b>		<b>5.00</b>				
<b>Eh - selon la valeur du pH <sup>(1)</sup></b>						
pH <= 3.5		<b>1500</b>				
3.5 < pH <= 9.6	mV	<b>(1)</b>				
pH > 9.6		<b>- 800</b>				
O <sub>2</sub> dissous	mg/l	<b>0.10</b>		<b>5.5</b>		
Ferro-bactéries		<b>absence</b>				
<b>Indice saturation - selon la valeur du TAC <sup>(2)</sup></b>						
TAC < 10°F		<b>0.2</b>		<b>2</b>		
10°F < TAC <= 25°F		<b>0.2</b>		<b>1</b>		
TAC > 25°F		<b>0.2</b>		<b>0.5</b>		

(1) Potentiel d'oxydo-réduction Eh = 1330 - 166 pH

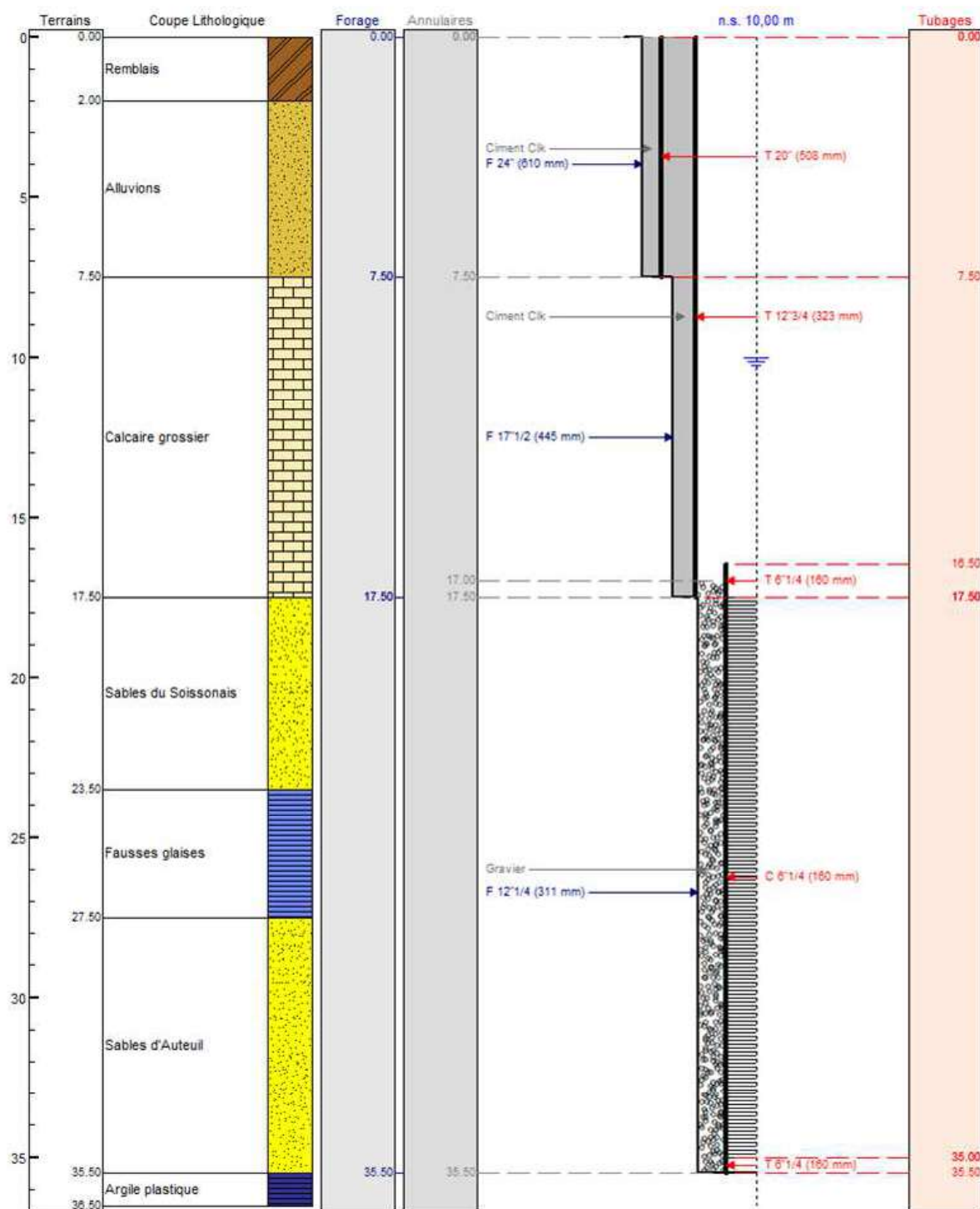
(2) Indice saturation = pHs-pH. Le pHs est le pH d'équilibre ou de saturation après essai au marbre.

*L'ensemble des valeurs seuils proposées provient d'avis d'experts basés sur la thermodynamique des équilibres électrochimiques et/ou la bibliographie jugée comme faisant référence en ce domaine. La justification des valeurs des seuils et les références bibliographiques sont données en annexe.*





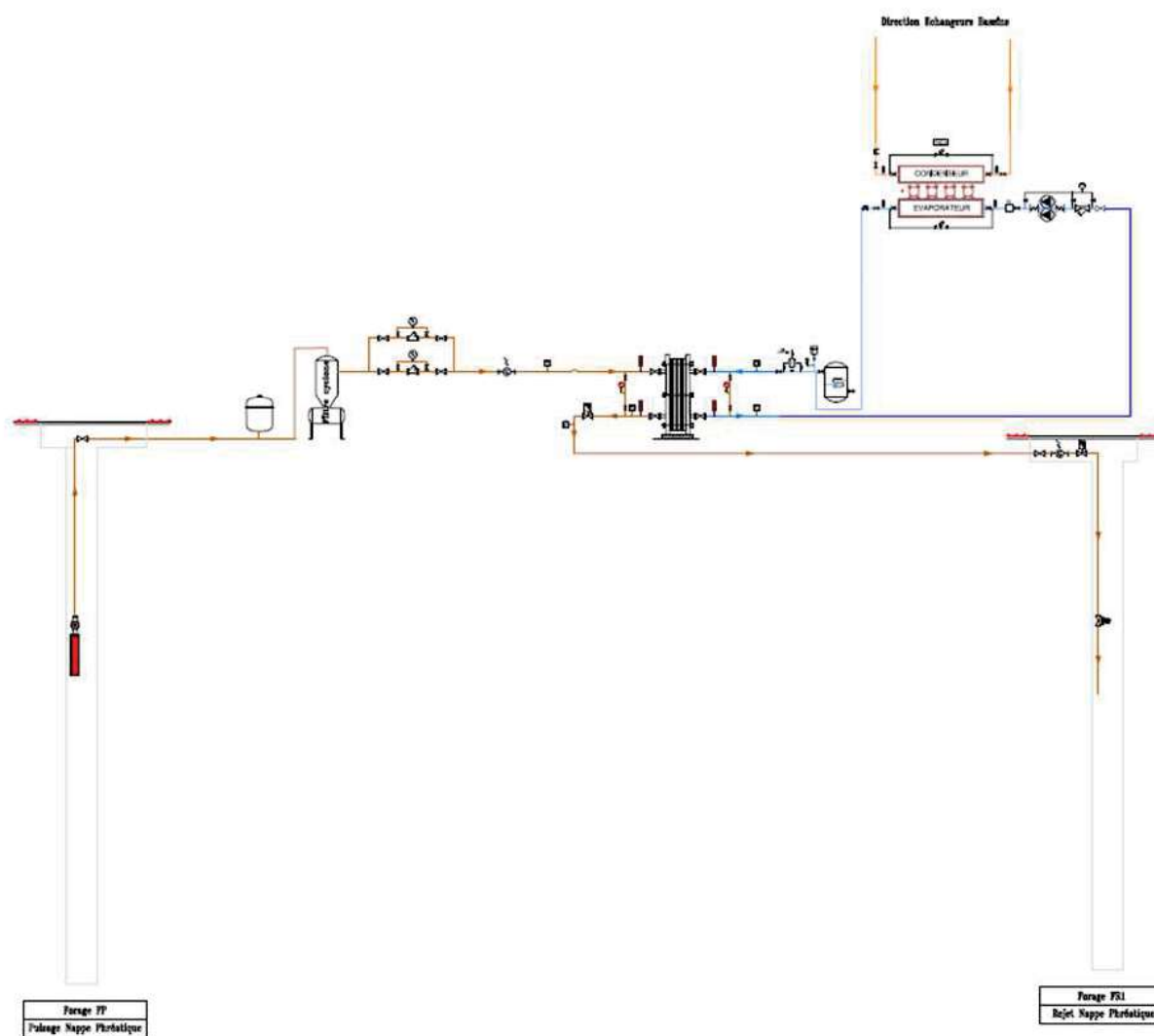
## ANNEXE 2 : COUPES TECHNIQUES PREVISIONNELLES DES FORAGES



(43) Coupe technique prévisionnelle des forages à la nappe de l'Yprésien

## ANNEXE 3 : SYNOPTIQUE DU DISPOSITIF DE GEOTHERMIE (EXEMPLE)

*Schéma conceptuel des équipements du local géothermique*



## ANNEXE 4 : IMPACT SONORE DE LA REALISATION DES FORAGES (SIXENSE)

---

