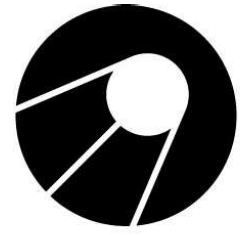


DOSSIER APD



Moon Safari
Architecture & Urbanisme



Le lycée de demain

Construction d'un lycée à Châteauneuf-sur-Loire

Avenue du Gatinais
45110 Châteauneuf-sur-Loire

MAITRE D'OUVRAGE

REGION CENTRE VAL DE LOIRE

9 rue Saint-Pierre Lentin
45041 ORLEANS

ASSISTANT MAITRE D'OUVRAGE

AVENSIA

2 rue Girodet
45000 ORLEANS

BUREAU DE CONTRÔLE

VERITAS

ARCHITECTE MANDATAIRE

MOON SAFARI

4 Pl. Jean Moulin
33000 BORDEAUX

ARCHITECTE ASSOCIE

C+S ARCHITECTURE

26 avenue de Saint Mesmin
45077 ORLEANS

ARCHITECTE ASSOCIE

BLOT ARCHITECTURE

44 rue d'Illiers
45000 ORLEANS

PAYSAGISTE

BIG BANG

114 Grande rue de la Guillotière
69007 LYON

BUREAU D'ETUDE TCE

CETAB

61 rue du professeur Lannelongue Bât D
33000 BORDEAUX

BUREAU D'ETUDE RESTAURATION

BETR

16 bis avenue de la République
69200 VENISSIEUX

OPC

PILOTYS

6 rue de la Picornière
45380 CHAINGY

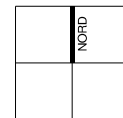
BUREAU D'ETUDE ACOUSTIQUE

VIA SONORA

17 rue Forment
75011 PARIS

Indice	Date	Modification

Orientation



Echelle

Format

A4

Altimétrie

± 0,00BAT = 121,50 NGF

Date

22/05/2023

Projet

22-023

Référence projet

CHA-APS-001-A

Etude comparative en coût global géothermie

045XXX	APD	CET		DOC	TZ		A	1309
--------	-----	-----	--	-----	----	--	---	------

NOTA :

Les côtes, altitudes et tous les éléments complémentaires portés sur les plans n'ont qu'une valeur indicative. Les plans n'ont de valeur que de principe et en aucun cas de plans d'exécution.



ETUDE DE MISE EN PLACE D'UNE SOLUTION DE GEOTHERMIQUE

PHASE APD – Lycée à Châteauneuf-sur-Loire



Rapport n° A123805/ A – 01/06/2023

Projet suivi par Alexandre Chevalier – 06.19.16.52.88 – alexandre.chevalier@anteagroup.fr



Antea Group
803 Bd Duhamel du Monceau
CS30602 ZAC du Moulin
45166 Olivet Cedex – France

www.anteagroup.fr/fr

Fiche signalétique

ETUDE DE MISE EN PLACE D'UNE SOLUTION DE GEOTHERMIE Phase APD – Lycée à Châteauneuf-sur-Loire

CLIENT

CETAB

6, passage Tenaille
75014 PARIS

Contact : b.delhumeau@cetab.fr
Tél : 07 77 14 51 33

Projet de construction de lycée au nord de Châteauneuf-sur-Loire (45)

RAPPORT D'ANTEA GROUP

Responsable du projet Alexandre Chevalier

Interlocuteur commercial Alexandre Chevalier

Implantation d'Olivet 02.38.23.23.00

Implantation chargée du suivi du projet

secretariat.orleans-fr@anteagroup.com

N° Rapport 123805

Version n° A

N° projet CENP220403

	Nom	Fonction	Date	Signature
Rédaction	Chevalier Alexandre	Chef de projet	30/05/2023	
Vérification	Chevalier Alexandre Elmelik Marine	Chef de projet	01/06/2023	

Suivi des modifications

Indice Version	Date de révision	Nombre de pages	Nombre d'annexes	Objet des modifications
A	01/06/2023	66	1	Version initiale

Sommaire

1. Préambule.....	9
2. Présentation du contexte	10
2.1. Localisation du projet.....	10
2.2. Plan de masse du projet et des zones à enjeux	12
3. Principe de la géothermie	13
3.1. Principe de la géothermie sur nappe (échangeur ouvert)	13
3.2. Principe de la géothermie sur sondes (échangeur fermé).....	14
3.3. Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC)	15
3.4. Orientation dans le choix des solutions géothermiques.....	16
3.4.1. Comparaison entre une solution sur nappe et sur sonde	16
3.4.2. Choix d'une solution de géothermie.....	16
4. Besoin énergétique	19
4.1. Evaluation des besoins nécessaires.....	19
4.2. Monotone de puissance en mode chaud.....	20
4.3. Monotone de puissance en mode froid.....	20
4.4. Puissances de pointe proposées	21
5. Analyse du contexte.....	23
5.1. Contexte hydrologique.....	23
5.2. Contexte géologique	23
5.2.1. Contexte géologique général	23
5.2.2. Contexte géologique au droit du projet.....	24
5.3. Contexte hydrogéologique.....	24
5.3.1. Description de l'aquifère des calcaires de Beauce.....	25
5.3.2. Piézométrie et fluctuation	25
5.3.3. Qualité des eaux.....	26
5.3.4. Caractéristiques hydrodynamiques	27
5.3.5. Synthèse.....	27
6. Contraintes réglementaires et environnementales.....	28
6.1. Géothermie minime importance (GMI)	28
6.1.1. Critère de définition	28
6.1.2. Conditions d'implantation	28
6.1.3. Cartographie des zones réglementaires	30

6.2. Usage des points d'eau	31
6.3. Compatibilité avec les objectifs des SAGE et du SDAGE	31
6.3.1. Le SDAGE Loire-Bretagne	31
6.3.2. Le SAGE « Nappe de Beauce et milieux aquatiques associés »	32
6.4. Synthèse des contraintes environnementales du projet	33
6.5. Sites potentiellement pollués.....	33
6.6. Patrimoine naturel (Zone Natura 2000, ZNIEFF, ZICO)	34
7. Dimensionnement du dispositif sur nappe	35
7.1. Rappel des caractéristiques de l'aquifère ciblé.....	35
7.2. Estimation du débit de pompage	35
7.3. Implantation prévisionnelle du doublet.....	36
7.4. Dimensionnement des forages	37
7.4.1. Forage de pompage	37
7.4.2. Forage de réinjection	39
7.4.3. Développement, nettoyage et essais de pompage.....	39
7.4.4. Evaluation simplifiée des impacts du fonctionnement du doublet	40
7.5. Equipement hydraulique du doublet et réseau de transfert	42
7.5.1. Equipements et canalisation	42
7.5.2. Equipement hydraulique des forages	42
7.5.3. Equipement hydraulique au droit du puits de pompage	42
7.5.4. Equipement hydraulique au droit du puits de réinjection.....	43
7.5.5. Equipements électriques	44
7.5.6. Télégestion	44
7.5.7. Installation de la ligne	44
7.6. Mise en service et essai de la boucle	45
7.6.1. Principe de fonctionnement	45
7.6.2. Essais de bon fonctionnement et mise en service	45
7.6.3. Nature des équipements.....	46
7.7. Evaluation financière d'un doublet sur nappe	46
7.7.1. Enveloppe prévisionnelle des travaux	46
7.7.2. Coût d'exploitation, maintenance et remplacement.....	47
8. Etude de la solution sur sonde	49
8.1. Choix de la profondeur des échangeurs fermés	49
8.2. Conductivité thermique des roches traversées	49
8.3. Modélisation du champ de sondes	50
8.3.1. Modèle utilisée	50

8.3.2. Hypothèses utilisées pour la modélisation	50
8.3.3. Résultats de la modélisation	52
8.3.4. Implantation prévisionnelle des sondes	53
8.4. Estimation budgétaire du projet de géothermie	55
8.4.1. Enveloppe budgétaire	55
8.4.2. Coût d'exploitation	56
9. Bilan économique des solutions	57
9.1. Demande de subvention auprès de l'ADEME	57
9.1.1. Géothermie sur nappe pour la production de chaud et de froid	57
9.1.2. Géothermie sur sondes pour la production de chaud et de froid	57
9.1.3. Rafraîchissement par Géocooling	58
9.1.4. Evaluation de l'aide	58
9.2. Synthèse des coûts de création des solutions.....	59
9.2.1. Comparatif de l'investissement et des coûts d'exploitation	59
9.2.2. Estimation du coût total au bout de 50 ans.....	59
9.3. Garantie AQUAPAC.....	60
10. Déroulement et procédures	61
11. Conclusion.....	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Extrait du plan cadastral actuel et emprise du lot 4	10
Figure 2 : Parcelles concernées par le projet	11
Figure 3 : Altimétrie du projet (m NGF).....	11
Figure 4 : Plan de masse du projet et localisation des zones à enjeux écologique.....	12
Figure 5 : Géothermie sur nappe – exploitation par forages d’eau (source : AFPG)	14
Figure 6 : Géothermie sur sonde – exploitation par sondes géothermiques verticales (source : AFPG)	15
Figure 7 : Puissance en chaud et en froid sur l’année (résultat de la STD – CETAB).....	19
Figure 8 : Monotone de puissance annuelle et énergie annuelle cumulée (MWh/an) - mode chauffage	20
Figure 9 : Monotone de puissance annuelle et énergie annuelle cumulée (MWh/an) - mode froid ...	21
Figure 10 : Carte géologique du secteur d’étude - BRGM n°399 - Contexte géologique local	23
Figure 11 : Piézométrie réalisée par la DREAL Centre en mars-avril 2002 (SIGES Centre)	26
Figure 12 : Zonage réglementaire pour les échangeurs ouverts ou fermés de 0 à 50 m à gauche, de 50 à 100 m au centre et de 100 à 200 m à droite (géothermie perspective)	30
Figure 13 : Localisation prévisionnelle des forages de pompage, de réinjection et des canalisations.	36
Figure 14 : Coupe géologique et technique prévisionnelle du forage de pompage	38
Figure 15 : Cône de rabattement induit par un pompage de 24h dans les calcaires de Beauce au débit de 50 m ³ /h.....	40
Figure 16 : Sonde verticale en Double U	50
Figure 17 : Evolution de la température moyenne et de pointe dans les sondes	52
Figure 18 : Proposition d’implantation des 92 sondes géothermiques verticales (SGV).....	54

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Coordonnées géographiques du projet.....	10
Tableau 2 : Coordonnées cadastrales du projet.....	10
Tableau 3 : Points positifs et négatifs en fonction de différents critères entre une solution de géothermie sur nappe et sur sonde	17
Tableau 4 : Avantages et inconvénient entre une solution de géothermie sur nappe et sur sonde....	18
Tableau 5 : Puissance de pointe et énergie annuelle en mode chaud et froid.....	19
Tableau 6 : Puissance sortie condensateur et estimation de la puissance à extraire au niveau de la ressource	21
Tableau 7 : Succession lithologique prévisionnelle au droit du projet (Source : InfoTerre)	24
Tableau 8 : Cadre réglementaire GMI	30
Tableau 9 : Critères de classification en zone orange	31
Tableau 10 : Synthèse des contraintes environnementales au droit du projet.....	33
Tableau 11 : Récapitulatif Patrimoine Naturel	34
Tableau 12 : Puissances et débits retenus en mode chaud et froid	35
Tableau 13 : Diamètres et profondeurs de foration	37
Tableau 14 : Equipement des ouvrages	37
Tableau 15 : Hypothèses et données hydrodynamiques utilisées pour l’évaluation du recyclage thermique, dans l’hypothèse « maximale » - fonctionnement en chaud.....	41
Tableau 16 : Estimation des coûts de l’installation géothermique partie sous-sol uniquement pour 1 doublet	47
Tableau 17 : Conductivité thermique et capacité thermique volumique des roches traversées jusqu’à 110 m.....	49
Tableau 18 : Résultat du test de réponse thermique (TRT)	49

Tableau 19 : Hypothèses énergétiques et de puissance utilisée dans le modèle	51
Tableau 20 : Principales hypothèses pour la simulation du champ de sondes sèches	51
Tableau 21 : Distance à respecter pour l'implantation des sondes	53
Tableau 22 : Montant de l'aide ADEME pour une PAC sur nappe (ADEME)	57
Tableau 23 : Montant de l'aide ADEME pour une PAC sur sondes (ADEME)	57
Tableau 24 : Montant de l'aide ADEME pour une PAC géothermique produisant du rafraîchissement par géocooling (ADEME)	58
Tableau 25 : Comparaison de l'investissement et des coûts d'exploitation des deux solutions de géothermie	59
Tableau 26 : Estimation du coût d'investissement et d'exploitation au bout de 50 ans	59
Tableau 27 : Délais estimatifs de la solution sur nappe ou sur sonde – cas d'un projet en GMI	61

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Equations utilisées pour évaluer le taux de recyclage thermique	64
--	----

1. Préambule

Dans le cadre de la réalisation d'un lycée à Châteauneuf-sur-Loire, le maître d'ouvrage souhaitait mettre en place une solution de géothermie. Dans ce cadre, une sonde test et un TRT avaient déjà été réalisés afin d'avoir les premiers éléments de dimensionnement.

Le maître d'œuvre CETAB a missionné Antea Group afin de l'assister dans la conception de l'installation de géothermie pour la partie sous-sol. CETAB a demandé à Antea Group de réaliser une étude APD afin de comparer la solution de géothermie sur nappe et celle sur sonde.

2. Présentation du contexte

2.1. Localisation du projet

Le projet se situe sur la commune de Châteauneuf-sur-Loire à l'intersection entre la D2460 et la D952, à l'ouest du lieudit de l'Aunière. Le centroïde du projet présente les coordonnées Lambert 93 suivantes :

	Lambert 93
Coordonnée X (m)	642 875
Coordonnée Y (m)	6 753 301

Tableau 1 : Coordonnées géographiques du projet

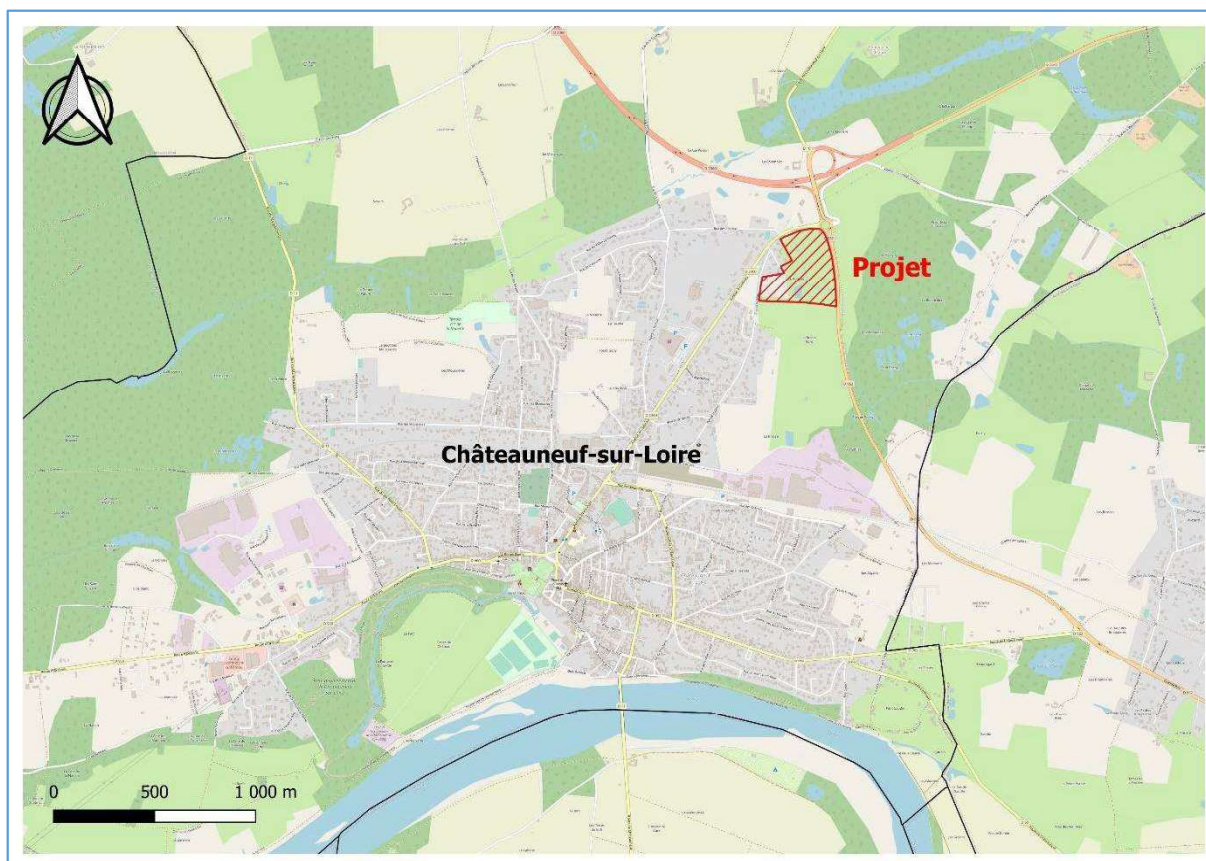


Figure 1 : Extrait du plan cadastral actuel et emprise du lot 4

Le tableau suivant présente les parcelles concernées par le projet :

Département	Commune	Section	Parcelle
Loiret (45)	Châteauneuf-sur-Loire	AE	9 à 14, 23 à 25, 61, 63, 316 à 323, 438 à 455, 633, 635

Tableau 2 : Coordonnées cadastrales du projet

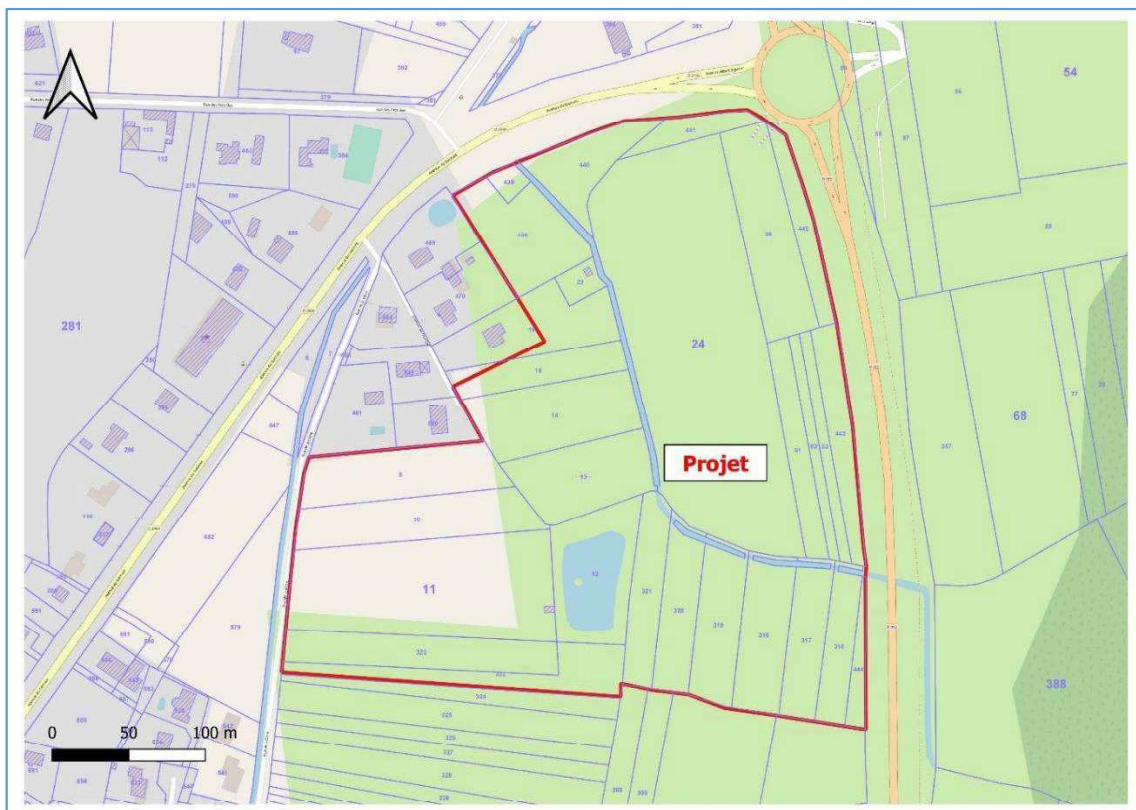


Figure 2 : Parcelles concernées par le projet

Le site se situe à une altitude moyenne de 122 m NGF et présente une topographie relativement plane (Figure 3).

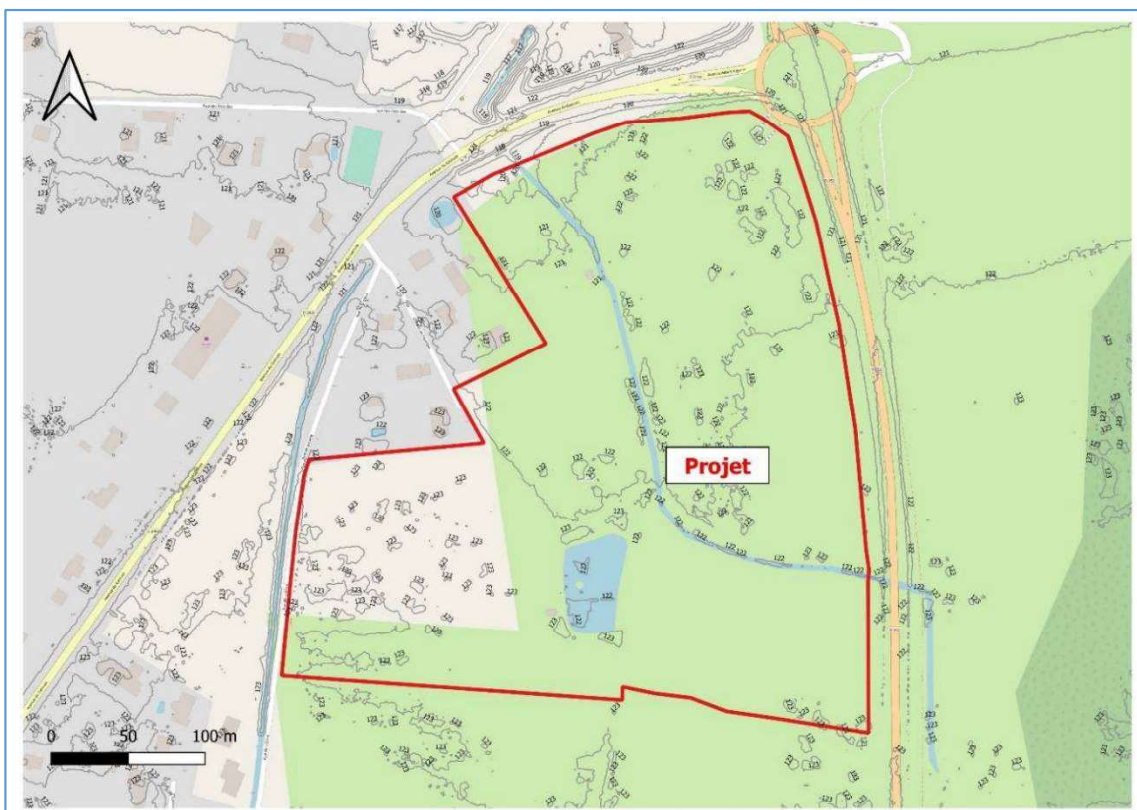


Figure 3 : Altimétrie du projet (m NGF)

2.2. Plan de masse du projet et des zones à enjeux

Le plan du projet est présenté ci-dessous.

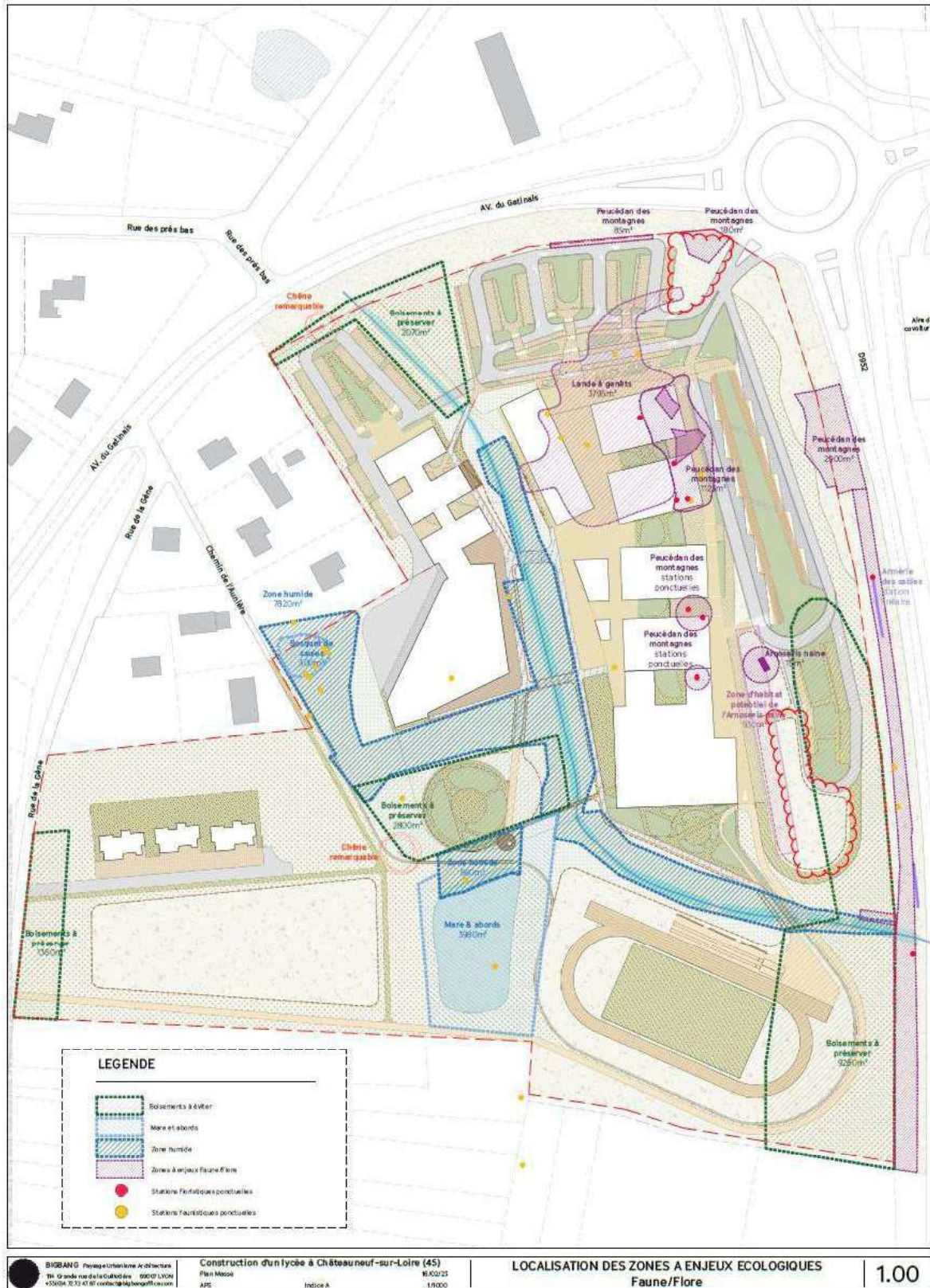


Figure 4 : Plan de masse du projet et localisation des zones à enjeux écologique

3. Principe de la géothermie

Le principe de la géothermie est de prélever de l'énergie dans le sol ou dans les nappes d'eau souterraine afin d'alimenter en chaleur mais aussi en froid des bâtiments (Industriels, collectifs, tertiaires). Il s'agit d'une énergie renouvelable (ENR) pouvant fonctionner de manière quasi ininterrompue (non intermittente) et intégrable facilement dans un mix énergétique. Son très haut rendement tout au long de l'année du fait de la variation négligeable de température est un des principaux atouts de la géothermie.

Les différentes formes de géothermies applicables à un usage de bureaux et d'industrie de cette échelle sont :

- **La géothermie sur nappe** avec l'utilisation des eaux souterraines prélevées (nappes superficielles ou profondes),
- **La géothermie sur sondes verticales** avec l'utilisation de l'énergie du sous-sol en circuit fermé (transfert thermique).

3.1. Principe de la géothermie sur nappe (échangeur ouvert)

Si les conditions hydrogéologiques sont favorables, il est possible, grâce à un ou plusieurs forages de pompage, d'exploiter directement les eaux souterraines contenues dans les aquifères de faible profondeur pour **le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la climatisation ou le rafraîchissement passif**.

Bénéficiant d'une température stable toute l'année, l'eau souterraine est prélevée par une pompe immergée puis acheminée vers l'échangeur thermique. L'eau géothermale, après échange thermique, est généralement restituée dans un ou plusieurs forages de réinjection. En période estivale, l'eau souterraine peut être exploitée pour les besoins en froid des bâtiments, soit au moyen de la pompe à chaleur réversible (climatisation), soit en usage direct (refroidissement passif par géocooling).

Dans le cas d'une production de froid, l'eau prélevée dans le forage de production est rejetée dans le forage de réinjection après avoir été réchauffée (les frigories prélevées dans le circuit primaire alimentent le circuit secondaire). Les calories injectées créent une zone chaude d'extension croissante autour du forage d'injection.

Pour la production de chaud, le phénomène inverse se produit et l'eau réinjectée crée une zone froide d'extension croissante autour du forage d'injection.

Cette perturbation thermique peut atteindre le forage de production à l'issue d'un temps de fonctionnement appelé temps de percée plus ou moins long. L'évolution de la température au forage de production, du fait de la perturbation thermique, dépend d'un certain nombre de paramètres, notamment : l'épaisseur productrice de l'aquifère, le débit exploité, la distance au forage de réinjection, la vitesse d'écoulement de la nappe et l'orientation de l'axe du doublet par rapport à l'écoulement de la nappe.

La qualité des informations hydrogéologiques rassemblées au départ conditionne donc en grande partie la validité des estimations du comportement thermique de l'aquifère.

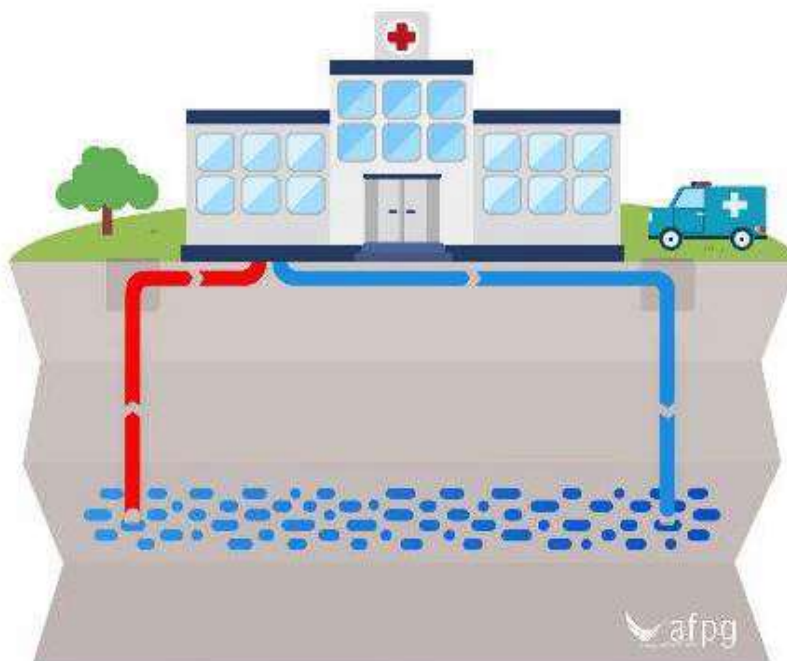


Figure 5 : Géothermie sur nappe – exploitation par forages d'eau (source : AFPG)

3.2. Principe de la géothermie sur sondes (échangeur fermé)

L'énergie thermique du sous-sol peut être récupérée en installant verticalement un échangeur de chaleur en forme de tube en U, appelé Sonde Géothermique Verticale (SGV). Les forages, de profondeur variable, sont souvent situés à côté, mais parfois aussi sous le bâtiment à chauffer/refroidir.

Dans la sonde, le fluide caloporteur circule en circuit fermé, récupère l'énergie thermique du sous-sol et alimente la Pompe A Chaleur (PAC).

La sonde géothermique verticale peut techniquement être installée dans n'importe quel milieu géologique. Sa profondeur va dépendre de la conductivité thermique du terrain, de la puissance de la PAC et de la demande en chaleur. Le regroupement de plusieurs SGV, appelé champ de sondes géothermiques, permet de chauffer et rafraîchir des bâtiments de grande taille avec des besoins énergétiques importants. Les sondes sont raccordées à un collecteur qui alimente une à plusieurs PAC. La chaleur est extraite du sous-sol durant la saison de chauffage. Pour le rafraîchissement passif ou la climatisation, la chaleur des bâtiments est transférée dans le champ de sondes géothermiques. Il est conseillé d'avoir un besoin en chaud et en froid le plus équilibré possible afin de recharger thermiquement le terrain.

Des mesures de température des capteurs dans les puits verticaux démontrent que le terrain se refroidit rapidement et durablement les premières années. Ensuite, une température d'équilibre semble apparaître. Pour vérifier cet impact et dimensionner correctement un champ de sondes, une modélisation des incidences thermiques est nécessaire.

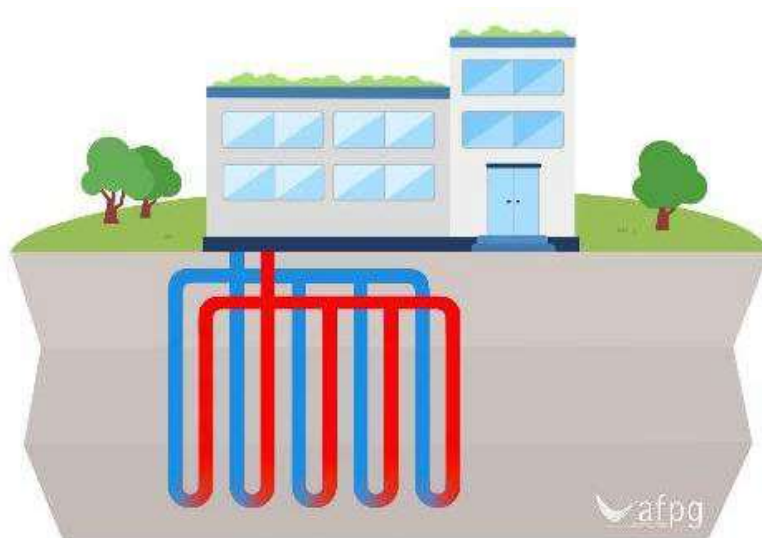


Figure 6 : Géothermie sur sonde – exploitation par sondes géothermiques verticales (source : AFPG)

3.3. Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC)

Un système de pompe à chaleur géothermique comprend une source froide, une pompe à chaleur, un échangeur et un système de distribution de la chaleur. On définit deux milieux : l'environnement ou source froide et le bâtiment ou source chaude. L'eau, l'air et la terre et/ou les roches peuvent être utilisées comme source froide.

Une pompe à chaleur est capable d'extraire des calories de l'environnement (source froide) pour les restituer à un autre milieu à une température plus élevée (source chaude). Elle transfère donc la chaleur entre le système de distribution froid/chaud du bâtiment et l'échangeur avec l'environnement. Cette opération se fait grâce à un fluide caloporteur qui change d'état (liquide ou gazeux) quand on modifie sa pression.

Ainsi, il est possible de faire du chaud (chauffage), du froid (climatisation), du rafraîchissement (géocooling) et aussi de réaliser une production d'eau chaude sanitaire (ECS).

Les quatre principaux éléments d'une PAC sont :

- 1- **L'évaporateur** : Il met en contact thermique le fluide frigorigène avec la source froide. Le fluide change d'état et se transforme en vapeur. Pendant cette opération, le fluide frigorigène se réchauffe, tandis que la source froide se refroidit.
- 2- **Le compresseur** : Il comprime la vapeur (fluide frigorigène), augmentant ainsi sa température.
- 3- **Le condenseur** : La vapeur en se condensant transmet sa chaleur au milieu à chauffer (source chaude). La température du fluide frigorigène (liquide) diminue tandis que celle de la source chaude augmente.
- 4- **L'organe de détente** : Il abaisse la pression du fluide frigorigène (liquide). Cette phase provoque une chute de température. Cela permet le début d'un nouveau cycle au niveau de l'évaporateur.

3.4. Orientation dans le choix des solutions géothermiques

3.4.1. Comparaison entre une solution sur nappe et sur sonde

Le tableau ci-dessous présente pour chaque solution de géothermie et pour différents critères les points positifs (bleu) et les points négatifs (marron).

Le [Tableau 4](#) présente les avantages et les inconvénients entre les deux solutions de géothermie (nappe et champ de sondes).

3.4.2. Choix d'une solution de géothermie

Ainsi, les deux synthèses présentées dans les [Tableau 4](#) et [Tableau 5](#) mettent bien en évidence que le choix de la solution de géothermie à retenir dépend des principaux critères suivants :

- Le besoin énergétique et la puissance,
- La typologie de l'activité (usage),
- Le potentiel de la ressource (aquifère ou du sous-sol),
- L'emprise disponible.

La géothermie permet de couvrir la totalité des besoins thermiques d'un bâtiment ou d'un ensemble de bâtiment. Toutefois, en fonction de la demande de puissance (gestion des pointes), il peut s'avérer judicieux de ne couvrir qu'une partie des besoins énergétiques par de la géothermie pour optimiser le fonctionnement global de l'installation et le coût de fonctionnement. Dans ce cas, il est alors nécessaire de coupler la géothermie avec une autre énergie d'appoint (aérotherme, solaire, gaz...).

Ainsi, il est possible de recourir à la géothermie sur nappe ou sur sondes verticales mais aussi de coupler ces deux techniques.

Critères	Exploitation des eaux souterraines par forages d'eau	Exploitation du sous-sol par sondes géothermiques verticales
Puissance et énergie	<ul style="list-style-type: none"> • Permet de délivrer de fortes puissances en chauffage et rafraîchissement • Objectif recherché : taux de couverture supérieur ou égal à 85% des besoins calorifiques annuels hors production ECS 	<ul style="list-style-type: none"> • Permet de délivrer de fortes puissances en chauffage et rafraîchissement. Pour les forts besoins : nécessite un appoint pour les besoins de pointe (aérotherme, gaz...) • Objectif recherché : taux de couverture supérieur ou égal à 85% des besoins calorifiques annuels hors production ECS
Point de vigilance	<ul style="list-style-type: none"> • Prise en compte de la capacité, température et qualité de eaux de la ressource • Prise en compte du risque de recyclage thermique pour le dimensionnement et implantation des forages • Vigilance sur la réinjection des eaux, le colmatage et sur l'impact de la réinjection sur les infrastructures souterraines situées autour du projet 	<ul style="list-style-type: none"> • Prise en compte des caractéristiques thermiques du sous-sol et de la température initiale du sous-sol • Vigilance au niveau des températures du fluide et espacement entre les sondes • Emprise nécessaire plus importante
Cadre général de mise en œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre pour une construction neuve comme pour une installation existante 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre pour une construction neuve comme pour une installation existante
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> • Coût d'investissement moyen à important car le coût est fonction de la profondeur de la ressource et de la puissance nécessaire (débit recherché) 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût d'investissement de faible à important car le coût est fonction de la puissance nécessaire. Pour les fortes puissances, le coût d'investissement devient très important
Maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance sur la partie hydraulique (forages, pompes immergées, filtres, échangeurs, pompes de circulation) et thermique (pompe à chaleur) 	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance sur la partie hydraulique (pompes de circulation) et thermique (pompe à chaleur)

Tableau 3 : Points positifs et négatifs en fonction de différents critères entre une solution de géothermie sur nappe et sur sonde

Solution	Avantages	Inconvénients
<p>Géothermie sur nappe</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Faible emprise des installations sous-sol (3 x 2 m) • Le choix d'une ressource en eau productive permet de couvrir des besoins importants (500 kW ou plus) avec peu de forages (1 doublet ou 2 doublets) • Nécessite moins de linéaire de forages et moins de ciment qu'un champ de sondes : l'impact environnemental est alors moins important avec moins d'émission de CO2 (volume de ciment moindre que pour un champ de sonde équivalent en termes de puissance) • L'aléa géologique, en particulier la présence de cavité est plus facilement gérable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Incertitude possible sur le débit de production dans les nappes ou secteur peu connues • Difficulté possible en réinjection et perte de performance dans le temps nécessitant la mise en place d'un dispositif de rétrolavage avec un rejet des eaux (pluviale, eaux usées). • Maintenance et entretien plus coûteux • Solution moins intéressante pour les faibles puissances (<100 kW). Le coût de réalisation du doublet et son équipement peut devenir plus couteux qu'une solution sur sondes.
<p>Géothermie sur sonde</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance peu onéreuse • Peu d'aléa sur l'atteinte de la puissance demandée (nécessite un linéaire de sondes supplémentaires) 	<ul style="list-style-type: none"> • Dérive possible du planning en raison des difficultés en phase travaux pour forer et cimenter les sondes en cas de présence de cavité, de silex et de variations lithologiques des couches traversées • Coût de réalisation pouvant être plus important pour les sondes jusqu'à 200 m de profondeur • Emprises nécessaires plus importantes et difficulté d'implantation en cas d'espaces naturels protégés ou d'espace utilisé pour l'infiltration des EP • Difficulté d'implantation en présence de réseaux existants • Linéaire important de tranchées : création d'un réseau important entre les sondes et le ou les collecteurs • Pas de possibilité d'intervention sur une sonde en cas de défaillance • Surdimensionnement nécessaire en cas de déséquilibre important entre les besoins de chaud et froid

Tableau 4 : Avantages et inconvénient entre une solution de géothermie sur nappe et sur sonde

4. Besoin énergétique

4.1. Evaluation des besoins nécessaires

Une simulation Thermique Dynamique (STD), réalisée par CETAB, a été transmise à Antea Group. Cette STD, réalisée au stade d'étude APD, indique des besoins en chaud et en froid. La simulation thermique dynamique (STD) a permis d'établir la monotone des puissances heure par heure sur une année de fonctionnement type. Ce besoin a été évalué pour le mode chauffage et refroidissement pour l'ensemble du lycée.

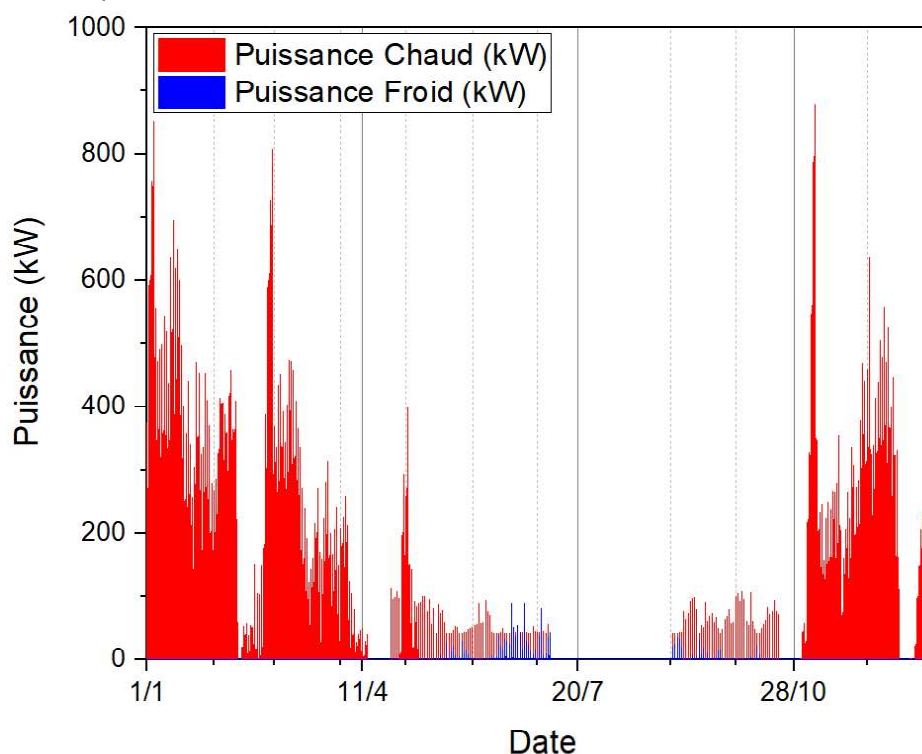


Figure 7 : Puissance en chaud et en froid sur l'année (résultat de la STD – CETAB)

La synthèse des résultats de la STD est présentée dans le tableau ci-dessous. Il est envisagé un fonctionnement en mode chauffage et refroidissement.

	Mode chaud	Mode froid
Puissance de pointe (kW)	878,5	89,9
Energie annuelle (MWh/an)	862,6	7,83

Tableau 5 : Puissance de pointe et énergie annuelle en mode chaud et froid

Le faible besoin de froid entraîne un déséquilibre important qui impliquera un refroidissement de la ressource. Ce déséquilibre ne pourra pas être suffisamment compensé par la recharge thermique naturelle du sol ou de la nappe.

La réalisation des courbes monotones de puissance par mode de fonctionnement permettra éventuellement d'optimiser le taux de couverture possible par la géothermie et la nécessité ou non de recourir à un appoint pour gérer les pointes de puissance.

4.2. Monotone de puissance en mode chaud

L'analyse de la monotone du besoin de chaud met en évidence une durée de fonctionnement annuelle d'environ 4829 heures avec un fonctionnement de 150 heures pour des pointes supérieures à 500 kW.

D'après la monotone de puissance chaud, il ne semble pas intéressant de couvrir les besoins supérieurs à 500 kW. En effet, ce besoin de pointe va nécessiter de surdimensionner l'installation (forages, pompages, PAC). L'objectif serait de couvrir les puissances jusqu'à environ 460 kW ce qui représenterait un taux de couverture d'environ 85 % de l'énergie annuelle.

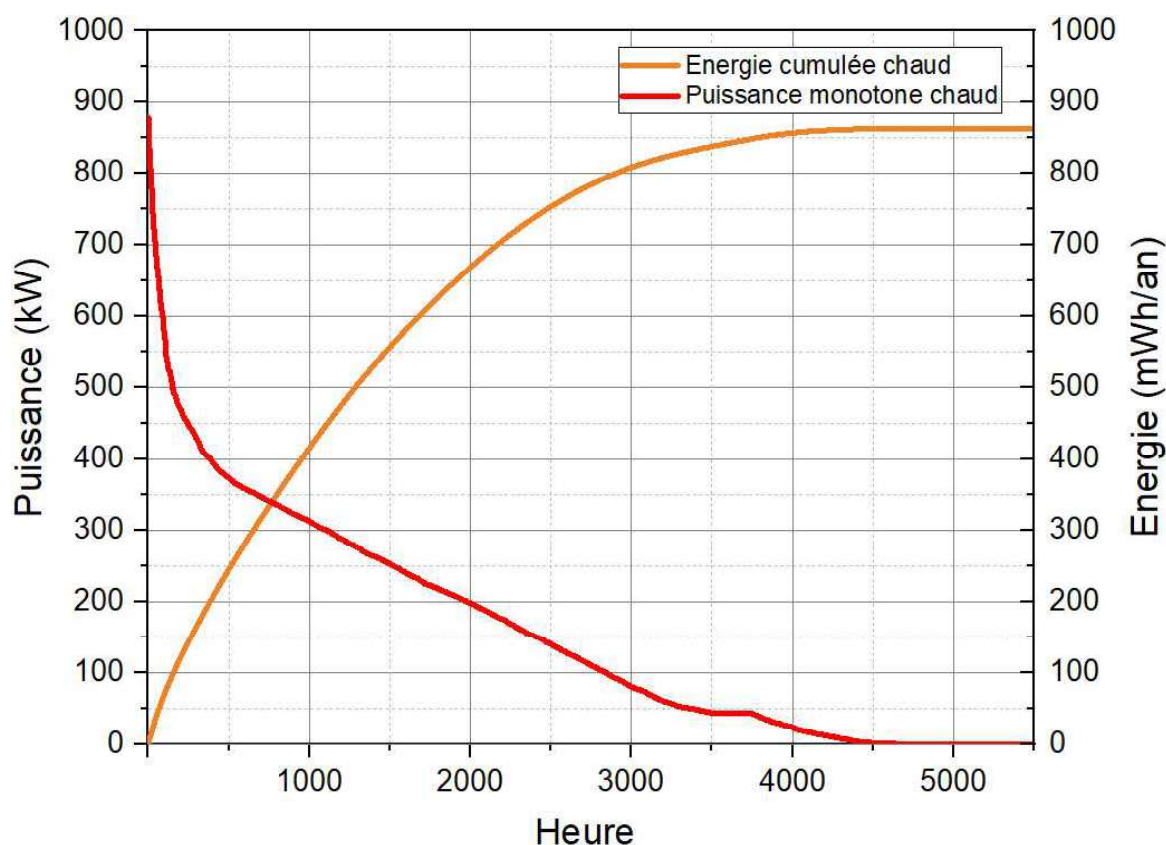


Figure 8 : Monotone de puissance annuelle et énergie annuelle cumulée (MWh/an) - mode chauffage

4.3. Monotone de puissance en mode froid

L'analyse de la monotone du besoin de froid met en évidence une durée de fonctionnement annuelle faible d'environ 550 heures avec un fonctionnement de 27 heures pour des pointes supérieures à 40 kW.

Le dimensionnement de l'installation sous-sol sera fait sur la base de la puissance chaud qui est plus importante. Ainsi, l'installation pourra couvrir l'intégralité de la puissance froide nécessaire. Dans ce cas de figure, le taux de couverture sera de 100 %. Le projet prévoit un géocooling.

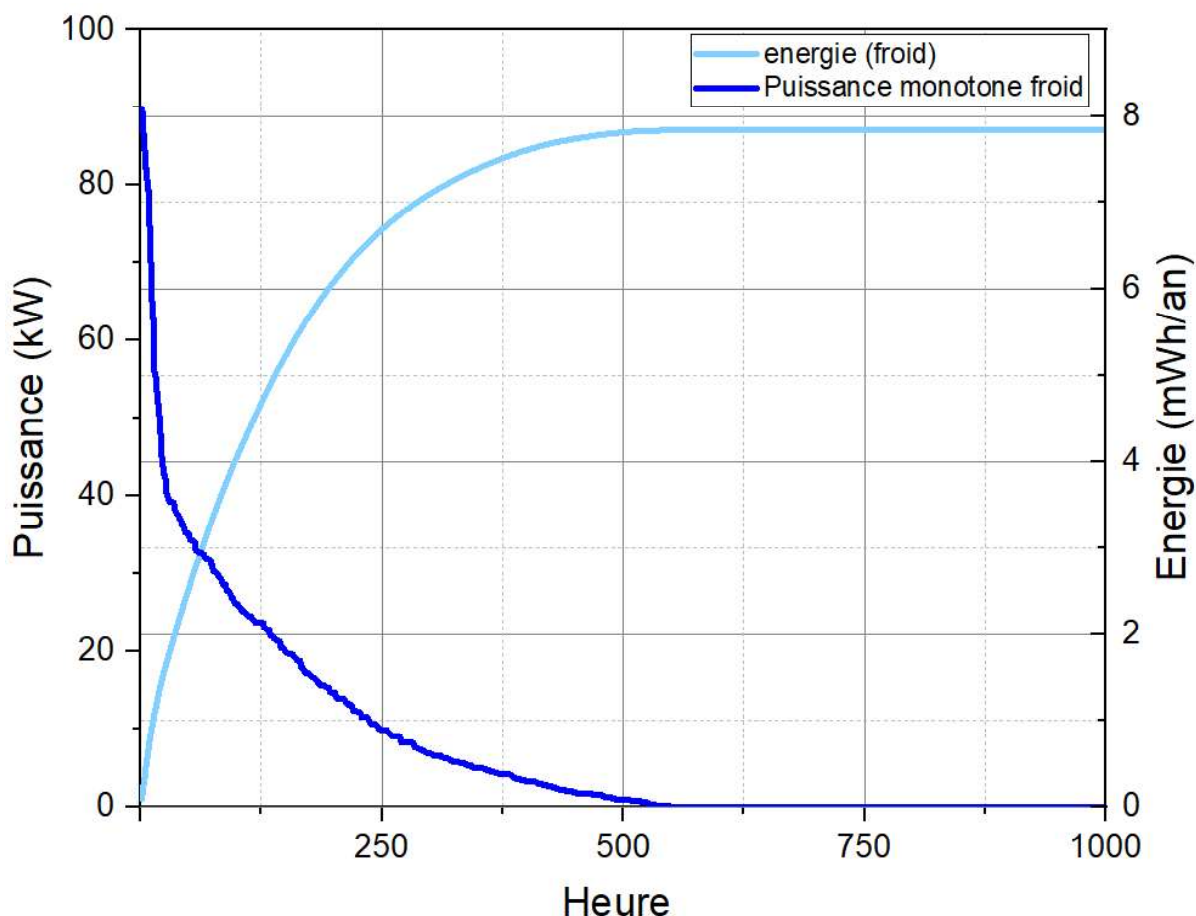


Figure 9 : Monotone de puissance annuelle et énergie annuelle cumulée (MWh/an) - mode froid

4.4. Puissances de pointe proposées

Les puissances issues de la STD correspondent aux besoins énergétiques du bâtiment en fonction de l'occupation et non pas à la puissance extraite au niveau de la ressource (nappe souterraine ou du sous-sol). Ainsi, pour évaluer la puissance à extraire sur la ressource, il est nécessaire de prendre en compte le COP et l'EER de la PAC.

La puissance de pointe retenue de 460 kW en mode chaud (hors intégration du COP) positionne déjà le projet dans le cadre réglementaire de la Géothermie de Minime Importance (GMI) ; c'est-à-dire une puissance extraite au niveau de la ressource inférieure à 500 kW.

	Mode chaud	Mode froid
Puissance de pointe (kW)	460	89,9
Energie annuelle couverte (MWh/an)	733,21	7,83
Taux de couverture (%)	85 %	100 %
COP/EER pour un régime 55/46°C	3,6	(*)
Puissance de pointe ressource (kW)	332	89,9

(*) La PAC ne fonctionne pas en mode géocooling, uniquement les circulateurs

Tableau 6 : Puissance sortie condensateur et estimation de la puissance à extraire au niveau de la ressource

La puissance prélevée/extraite sur la ressource sera de 332 kW au maximum en mode chaud pour un COP de 3,6. Il s'agit de la puissance de pointe qui sera retenue pour le dimensionnement de la solution de géothermie sur nappe et sur champ de sondes.

5. Analyse du contexte

5.1. Contexte hydrologique

Le projet se situe au nord de la Loire à une distance d'environ 1,9 km et au sud du ruisseau de l'Anche (à environ 400 m). Au droit du projet, différents éléments hydrologiques s'observent (réseau de fossés, de petits cours d'eau et lacs). Le projet n'est pas classé en zone inondable.

5.2. Contexte géologique

5.2.1. Contexte géologique général

D'après la carte géologique de Châteauneuf-sur-Loire au 1/50 000 (n°399), la lithologie des sols de la zone d'étude est la suivante :

- Alluvions de la Loire (anciennes terrasses),
- Sables et argiles de Sologne ou de l'Orléanais,
- Formation de Beauce (calcaires de Pithiviers et d'Etampes),
- Eocène et argile à silex,
- Craie du Séno-Turonien.



Figure 10 : Carte géologique du secteur d'étude - BRGM n°399 - Contexte géologique local

5.2.2. Contexte géologique au droit du projet

Le contexte géologique au droit du site peut être identifié à partir des données issues de la banque du sous-sol, de notre base de données interne et de la phase de reconnaissance effectuée sur le site (sonde test) par l'entreprise Van Ingen (08/06/2022).

Profondeur verticale (m/sol) du toit et du mur de la formation	Lithologie / étage géologique	Altitude approximative du toit de la formation (m NGF)	Epaisseur (m)
0 à 6,0 m	Limon et alluvions	122,0	6,0
6,0 à 30,0 m	Sables et argiles	116,0	24,0
30,0 à 116,0 m	Calcaires et Marnes	92,0	86,0
>116,0 m	Eocène	-	-

Tableau 7 : Succession lithologique prévisionnelle au droit du projet (Source : InfoTerre)

Au-delà de 116 m se rencontrent les formations de l'Eocène (argile à silex) puis du Séno-Turonien (Craie blanche à Silex). Ces formations au-delà de 116 m n'ont pas été reconnues lors de la phase de reconnaissance en raison du classement en NAEP de la nappe des Calcaires de Beauce et de la nappe de la Craie.

Les résultats de la reconnaissance géologique, analysés au regard des coupes géologiques des ouvrages voisins indiqueraient l'absence probable de l'écran imperméable constitué par une couche de Molasse du Gâtinais. Le calcaire de Pithiviers et le calcaire d'Etampes formeraient un ensemble indifférencié qu'il serait possible de capter.

5.3. Contexte hydrogéologique

Parmi les formations géologiques décrites dans la partie précédente, plusieurs peuvent être le siège de nappes d'importance variable. Les eaux souterraines superficielles de la région proviennent de quatre réservoirs principaux :

- La nappe des alluvions récentes de la Loire (formation absente au droit du projet),
- La nappe des sables du Burdigalien (Sables et Argiles de Sologne, Marnes et Sables de l'Orléanais) : Nappe à usage domestique avec faible débit (< 10 m³/h),
- La nappe des calcaires de Beauce : forte productivité et classement en NAEP.
- La nappe de la Craie du Séno-Turonien : Faible débit sous couverture et classement en NAEP

Au-delà (profondeur > 200 mètres), les nappes de l'Albien et du Néocomien, la nappe des Calcaires du Jurassique et du Trias se rencontrent. Ces nappes ne seront pas étudiées afin de rester dans le cadre réglementaire dérogatoire de la GMI (forage < 200 m de profondeur)

Au regard des éléments présentés précédemment et des besoins du projet (régime dérogatoire de la GMI), seule l'ensemble des calcaires de Beauce est étudié ici.

5.3.1. Description de l'aquifère des calcaires de Beauce

Cet aquifère est un ensemble sédimentaire à dominante calcaire dans lequel s'intercalent des niveaux marneux. Il s'agit du principal aquifère de la région. Il présente nombre de structures karstiques et de fissures facilitant grandement la circulation de l'eau en son sein.

La nappe siège à la fois dans les calcaires de Pithiviers et d'Etampes qui ne sont séparés que par la molasse du Gâtinais si celle-ci est présente.

- **L'aquifère des calcaires de Pithiviers** correspond à la partie la moins profonde du système aquifère de Beauce. Cette formation présentant des faciès marneux dans le secteur du projet, sa productivité est variable mais celle-ci peut être localement forte.
- **L'aquifère des calcaires d'Etampes** correspond au deuxième niveau des calcaires de Beauce rencontré depuis la surface. Il est séparé des calcaires de Pithiviers par la molasse du Gâtinais peu perméable, dont l'épaisseur et le faciès sont variables dans le secteur. Le log stratigraphique du forage BSS001CGJR, situé à 1,8 km du projet, présente la Molasse du Gâtinais avec une épaisseur de 5 m (présence supposée).

Au droit du projet, la molasse du Gâtinais ne constitue pas un vrai écran continu imperméable car celle-ci ne semble pas réellement différenciée entre l'aquifère des calcaires de Pithiviers et celui des calcaires d'Etampes. Les deux aquifères semblent ainsi se retrouver en communication et ne former qu'un unique ensemble que l'on peut définir comme l'aquifère des calcaires de Beauce indifférenciés. Ceci est également confirmé par le SDAGE qui classe en NAEP l'ensemble des Calcaires de Beauce sans distinction entre les sous-ensembles.

5.3.2. Piézométrie et fluctuation

5.3.2.1. Sens d'écoulement

D'après les cartes piézométriques existantes, les écoulements de la nappe sont dirigés vers la Loire. Le niveau statique de la nappe des calcaires de Beauce serait situé 100 et 105 m NGF **soit entre 18 et 23 m/sol**. La carte piézométrique de la nappe de Beauce de 2002 est présentée en Figure 11.

Au droit du site, la nappe présenterait un très faible gradient hydraulique moyen d'environ 0,2 ‰.

La fluctuation du niveau de la nappe est évaluée à 7,3 m.

Le niveau d'eau mesuré le 08/06/2022, lors de la réalisation de la sonde test, était à 22,0 m/sol. Il est à noter que l'ouvrage était en cours de réalisation, il ne s'agit donc pas d'un niveau stabilisé mais d'un ordre de grandeur.

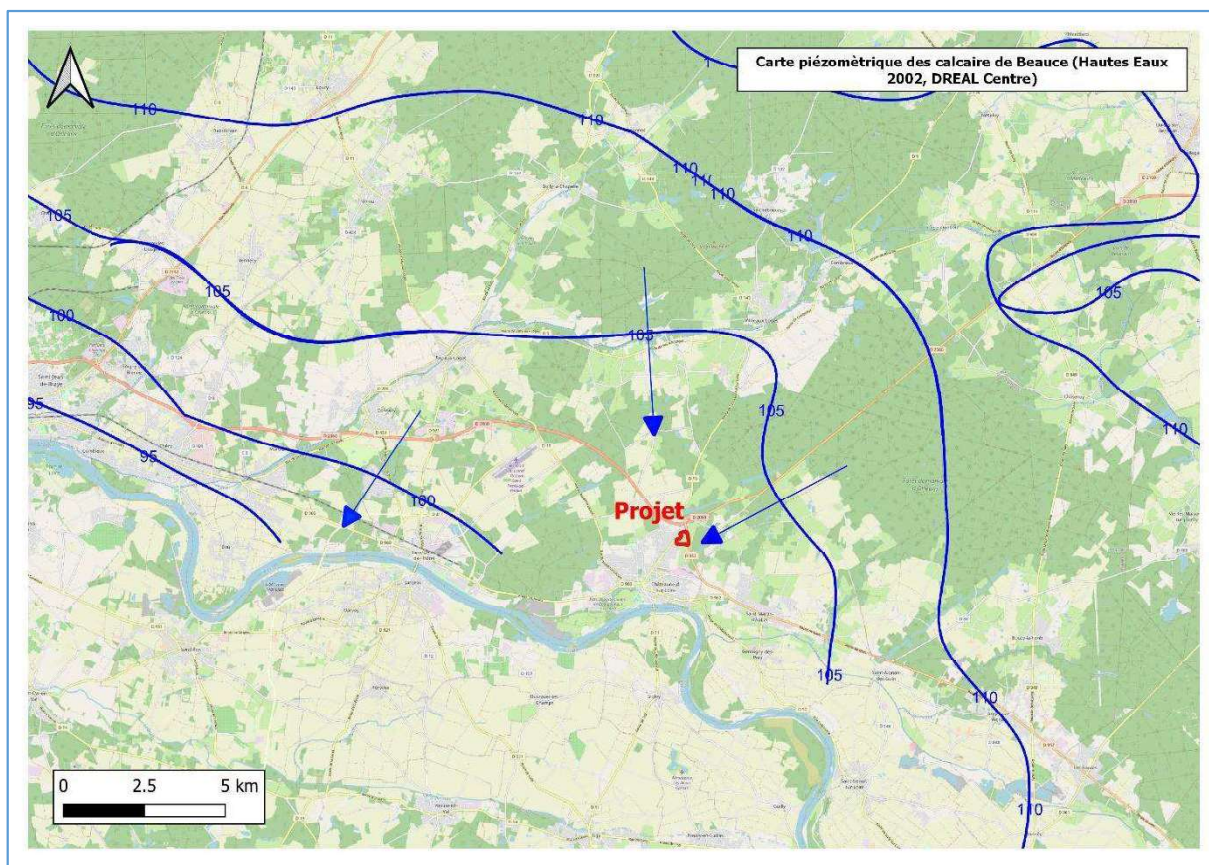


Figure 11 : Piézométrie réalisée par la DREAL Centre en mars-avril 2002 (SIGES Centre)

Lors de la réalisation de la sonde test, un niveau d'eau à 22 mètres a été mesuré le 08/06/2022, correspondant à un niveau de moyenne eaux. **Une hypothèse de fluctuation de +/- 3,65 m autour d'un niveau moyen de 22 mètres/sol peut être adoptée en première approche dans le cadre du dimensionnement des ouvrages pour une solution de géothermie sur nappe.**

5.3.3. Qualité des eaux

L'analyse des eaux prélevée dans le forage AEP n° BSS001CFCC et BSS001CFB à Châteauneuf-sur-Loire (45) permet d'apporter des données de qualité sur la nappe.

Les teneurs en fer sont faibles aux deux forages, elles sont en moyenne de 40 µg/L. Les teneurs en manganèse sont plus fortes au captage BSS001CFCC et quasi-nulles au captage BSS001CFB. Les teneurs en nitrates sont faibles, indiquant un aquifère relativement bien protégé.

D'après les données ADES, la température de l'eau est comprise entre 14 et 16 °C.

D'après notre retour d'expérience dans le Loiret, les données qualitatives des forages dans les calcaires de Beauce montrent la présence de fer pour les installations de géothermie exploitant les calcaires d'Etampes. La présence de fer serait la cause de colmatage au niveau de ces installations. Toutefois, les analyses locales indiqueraient un contexte favorable pour l'usage des Calcaires d'Etampes (faible concentration en manganèse) plutôt que des Calcaires de Pithiviers. Une hétérogénéité chimique peut exister. Il conviendra de prévoir une analyse d'eau sur le forage de reconnaissance pour vérifier et anticiper un risque éventuel de baisse de performance des forages.

5.3.4. Caractéristiques hydrodynamiques

D'après les informations de la BSS sur les captages environnants, les débits spécifiques obtenus sur l'aquifère des calcaires de Beauce sont compris entre 4,5 et 13 m³/h/m dans le secteur.

Dans un rapport du BRGM (RP-52121-FR), des ordres de grandeur de transmissivité sont donnés pour la nappe de Beauce. Elles seraient comprises entre 10⁻⁴ et 10⁻² m²/s. Dans le secteur, les valeurs recueillies sont comprises entre 1,5 et 3,6.10⁻³ m²/s.

La nappe de Beauce dans le secteur est donc transmissive, en lien avec la fissuration et la fracturation des calcaires qui engendrent un réseau de drainage bien développé. Les débits spécifiques permettraient d'exploiter la ressource à des débits pouvant aller jusqu'à 100 m³/h avec des rabattements d'une dizaine de mètres.

5.3.5. Synthèse

Sur la base de l'analyse des données bibliographiques, il paraît plus favorable de viser en première approche des niveaux plus profonds pouvant correspondre aux calcaires d'Etampes.

Les faibles concentrations en fer et en manganèse dans les calcaires d'Etampes permettent d'envisager la mise en place d'une géothermie sur nappe. Toutefois, il pourra être nécessaire de prévoir des solutions techniques pour limiter le risque de colmatage des forages d'injection (rétrolavage, filtration).

Une analyse d'eau devra être prévue sur le forage de reconnaissance pour statuer sur le risque.

6. Contraintes réglementaires et environnementales

6.1. Géothermie minime importance (GMI)

6.1.1. Critère de définition

D'après le décret n°2015-15 du 8 janvier 2015 modifiant le décret n°78-498 du 28 mars 1978 modifié relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie, le décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains, l'annexe de l'article R.122-2 et l'article R.414-27 du Code de l'Environnement, la réalisation et l'exploitation des forages géothermiques dits de "minime importance" font l'objet d'une déclaration, lorsqu'ils répondent aux caractéristiques suivantes :

1. Pour une solution sur nappe :

- La température de l'eau prélevée en sortie des ouvrages de prélèvement est inférieure à 25 °C,
- La profondeur du forage est inférieure à 200 m,
- La puissance thermique maximale prélevée du sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation est inférieure à 500 kW,
- Les eaux prélevées sont réinjectées dans le même aquifère et la différence entre les volumes d'eaux prélevés et réinjectés est nulle,
- Les débits prélevés ou réinjectés sont inférieurs au seuil d'autorisation fixé à la rubrique 5.1.1.0 de l'article R. 214-1 du Code de l'Environnement, soit strictement inférieur à 80 m³/h.

2. Pour une solution sur sondes :

- La profondeur du forage est inférieure à 200 m,
- La puissance thermique maximale prélevée du sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation est inférieure à 500 kW.

Enfin, l'article 22-6 du décret du 2 juin 2006 modifié par décret n°2016-835 du 24 juin 2016 fournit une cartographie des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance qui doivent être prises en considération lors du choix de l'implantation d'échangeurs géothermiques. Cette cartographie définit des zones vertes, oranges et rouges. En zone orange, un avis d'expert agréé est demandé pour autoriser le projet.

Les dispositifs géothermiques sur sondes ou sur nappe ne relèvent pas de la minime importance lorsqu'ils sont situés dans des zones rouges, où les activités géothermiques présentent des dangers ou inconvénients graves.

⇒ **En cas de dépassement de l'un ou plusieurs de ces seuils, un projet de géothermie** ne pourra donc pas être considéré en régime de minime importance (téléclaration) et devra faire l'objet d'une demande d'autorisation au titre du Code Minier (PEX).

6.1.2. Conditions d'implantation

➤ Règle d'implantation des échangeurs géothermiques

En termes d'implantation, l'arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance précise que :

- les ouvrages ne doivent pas se placer dans les périmètres de protection immédiate et rapprochée des captages d'eau destinée à la consommation humaine et des sources des eaux minérales naturelles conditionnées : cette condition est respectée pour le projet ;
- les ouvrages doivent se situer à plus de :
 - 35 mètres d'un ouvrage souterrain de prélèvement d'eau destinée à la consommation humaine : cette condition est respectée pour le projet ;
 - 35 mètres des stockages d'hydrocarbures, de produits chimiques, de produits phytosanitaires ou autres produits susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines ;
 - 35 mètres des bâtiments d'élevage et leurs annexes, relevant des rubriques 2101, 2102, 2110, 2111, 2112, 2113, 2120 de la nomenclature des installations classées ainsi que des zones de stockage des déchets de l'exploitation d'élevage ;
 - 35 m des ouvrages de traitement des eaux usées collectifs ou non collectifs ;
 - 200 mètres d'une installation de stockage de déchets relevant de la rubrique de la nomenclature des installations classées.

Les implantations proposées du champ de sondes et du doublet sur nappe prennent en compte ces règles. En fonction du choix retenu par le MOA, une implantation plus détaillée sur le plan de masse sera faite.

➤ **Règle spécifique pour les sondes (échangeurs fermés)**

Les échangeurs ne doivent pas être implantés à moins de :

- 5 m de la limite de propriété la plus proche, à défaut d'un accord écrit préalable des propriétaires voisins autorisant la réalisation de l'échangeur géothermique de minime importance ;
- 5 m de conduites d'assainissement individuelles ou collectives d'eaux usées ou transportant des matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines.

➤ **Règle spécifique pour la nappe (échangeurs ouverts)**

Les échangeurs ne doivent pas être implantés :

- dans un périmètre de protection géothermique : cette condition est respectée pour le projet car aucun permis d'exploitation de gîte géothermique au titre du Code Minier ne grève le site à ce jour.
- à moins de 5 mètres de conduites d'assainissement individuelles ou collectives d'eaux usées ou transportant des matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux souterraines, lorsqu'une étanchéité entre les conduites d'assainissement et les horizons géologiques exploités existe ou est mise en place. En l'absence d'une telle étanchéité naturelle ou artificielle, cette distance minimale est portée à 35 m.

Cet article spécifie également qu'en phase exploitation, l'installation d'un échangeur géothermique ouvert ne doit pas causer une variation de température de la nappe d'eau exploitée de plus de 4°C à 200 m des échangeurs géothermiques de production et réinjection. La température maximale de réinjection ne doit pas dépasser 32°C.

Une étude spécifique (modélisation hydrogéologique et thermique) devra être réalisée dans les phases suivantes pour vérifier que le fonctionnement de l'installation respectera cette condition.

6.1.3. Cartographie des zones réglementaires

L'article 22-6 du décret du 2 juin 2006 modifié par décret n°2016-835 du 24 juin 2016 fournit une cartographie des zones réglementaires relatives à la géothermie de minime importance qui doivent être prises en considération lors du choix de l'implantation d'échangeurs géothermiques : **le site se situe en zone dite « orange » dans lesquelles les activités géothermiques nécessitent un avis d'expert.** Ce classement en zone orange est lié à la présence d'une pollution sur un site voisin. Le maillage du zonage réglementaire est de 500 x 500 m.

Cadre GMI	Géothermie sur sonde ou nappe
Classe de 0 à 200 m	Orange

Tableau 8 : Cadre réglementaire GMI

La Figure 12 présente le zonage réglementaire pour la géothermie sur sonde et nappe jusqu'à 200 m.



Figure 12 : Zonage réglementaire pour les échangeurs ouverts ou fermés de 0 à 50 m à gauche, de 50 à 100 m au centre et de 100 à 200 m à droite (géothermie perspective)

Les critères de classification de la zone orange sont présentés par classe de profondeur dans le tableau ci-dessous.

Aléa	10 à 50 m	50 à 100 m	100 à 200 m
Pollution avérée	6	6	6
Communication aquifère	1	1	1
Remontée de nappe	1	1	1
Note finale	24	24	24

Tableau 9 : Critères de classification en zone orange

Bruno Tomasi, bureau d'étude TELOSIA, en qualité d'expert agréé G.M.I a été mandaté en 2022 pour réaliser une expertise GMI en lien avec la position du site en zone orange (induit par la pollution du site CODIFRANCE, site SSP001213401) et pour la réalisation d'une sonde test (SGV). Cet avis indique que CODIFRANCE se situe en position latérale, voire légèrement en aval du projet. Bruno Tomasi indique qu'une éventuelle pollution pourrait alors toucher le faciès des calcaires de Pithiviers, présent sous une épaisseur de 10 à 30 m de sables et argiles de Sologne largement dénoyée. L'expert donne un avis favorable pour la réalisation de la sonde test.

Les critères pour la déclaration sont respectés, dans ces conditions, **le projet est soumis à déclaration.**

Après déclaration et avis d'expert, les travaux peuvent débuter sans délai. Si l'une des conditions listées au décret n°2015-15 du 8 janvier 2015 n'est pas respectée, le projet de géothermie devra faire l'objet d'une demande d'autorisation au titre du Code Minier (procédure comportant une enquête publique et des délais d'instruction habituellement constatés de l'ordre de 15 à 18 mois en Ile de France).

La solution d'une géothermie sur nappe devra faire l'objet d'un nouvel avis d'expert.

6.2. Usage des points d'eau

De manière à anticiper toute interférence entre le futur doublet géothermique et les ouvrages alentours, les puits/forages et autres ouvrages sollicitant les nappes dans un rayon de 1500 m autour du projet ont été répertoriés. Ces données sont issues des bases de données et documents à notre disposition. Cet inventaire montre qu'il existe plusieurs captages à usage domestique à proximité du projet et aucun ouvrage à usage géothermique.

Le projet n'est pas concerné par la présence de périmètres de protection de captage AEP (alimentation en eau potable).

6.3. Compatibilité avec les objectifs des SAGE et du SDAGE

6.3.1. Le SDAGE Loire-Bretagne

Le SDAGE 2022-2027 du bassin Loire-Bretagne est un document de planification dans le domaine de l'eau. Il définit, pour une période de cinq ans (2022 – 2027), les grandes orientations fondamentales déclinées en dispositions, permettant de satisfaire aux principes d'une gestion équilibrée et durable de la ressource en eau (articles L.212-1 du code de l'environnement). Sur la base des différentes orientations fondamentales, **un projet de géothermie semble donc compatible avec le SDAGE.**