

PJ7- Résumé non technique

P.J. n° 7. - *Une note de présentation non technique du projet [8° de l'article R. 181-13 du code de l'environnement]*

Table des matières

PJ7- Résumé non technique	1
Résumé non technique	3
Introduction à la géothermie basse température.....	4
Localisation.....	7
Evaluation des besoins	9
Travaux de forage projetés	12
Calendrier des travaux	16
Evaluation des impacts du projet.....	17
Géothermie et risque sismique	23
Glossaire	26
Figure 1 – Principe de fonctionnement d’un doublet géothermique (source : ADEME/BRGM)	4
Figure 2 – Réseaux de chaleur géothermiques en Île de France en 2023 (source : étude de marché AFPG 2023)	5
Figure 3 – Installations géothermiques au Dogger en Île-de-France (source : BRGM)	6
Figure 4 – Zone d'implantation du futur quadruplet (source : Géoportail)	7
Figure 5 - Surface mobilisées pour le projet de géothermie.....	7
Figure 6 – Autorisation de recherche sollicitée et concession envisagée pour le projet de Villiers-sur-Marne, Bry-sur-Marne et Noisy-le-Grand	8
Figure 7 – Carte de chaleur du territoire.....	9
Figure 8 – Répartition des besoins issus de la prospection.....	10
Figure 9 – Tracé projeté du réseau de chaleur pour le scénario de développement retenu	11
Figure 10 – Exemples d’ateliers de forages géothermiques	12
Figure 11 – Coupe prévisionnelle d'un des ouvrages (à titre indicatif).....	14
Figure 12 – Panaches de température simulés au niveau des différents puits au Dogger du secteur.	15
Figure 13 – Schéma du fossé rhénan (source : Eduterre)	23
Figure 14 – Schéma du Bassin parisien (source : BRGM).	24
Tableau 1 – Besoins thermiques à horizon 2030	10
Tableau 2 – Résumé des travaux dans leur ensemble	13
Tableau 3 – Calendrier des travaux.....	16
Tableau 4 – Synthèse des enjeux du projet principales mesures d’évitement, de réduction et de compensation qui seront mises en œuvre	21

Résumé non technique

Le SIPPAREC souhaite réaliser un projet de géothermie basse température en créant un réseau de chaleur sur les communes de Bry-sur-Marne, Villiers-sur-Marne et Noisy-le-Grand. Les têtes de puits seront implantées sur le terrain du Complexe sportif Octave Lapize de Villiers-sur-Marne, en bordure Est de la commune. La centrale géothermique (où s'effectue l'échange de chaleur) sera construite à côté des forages.

Le scénario retenu pour le futur réseau de chaleur devrait permettre de produire 160,2 GWh/an. Un taux de couverture EnR&R de 74% serait atteint à terme.

Dans ce cadre, le SIPPAREC sollicite donc une autorisation de recherche (AR) et une demande d'autorisation environnementale (AENV), volet travaux miniers, pour un gîte géothermique au Dogger pour un nouveau quadruplet (deux producteurs et deux injecteurs). Le présent dossier sera déposé à cet effet en préfecture du Val-de-Marne et sera soumis à une enquête publique.

Conformément à la réglementation en vigueur, la présente demande d'autorisation de recherche et d'ouverture de travaux miniers (AR-AENV) est sollicitée pour une durée maximale de 3 ans. A l'issue des travaux de forage, et en cas de succès des forages, une demande de concession sera formulée pour une durée initiale minimale de 30 ans.

Introduction à la géothermie basse température

La géothermie basse température ou basse enthalpie consiste en l'extraction d'une eau à une température comprise entre 60°C et 85°C, à partir de gisements situés entre 1 500 et 2 500 mètres de profondeur. L'essentiel des réservoirs exploités se trouve dans les bassins sédimentaires comme le Bassin de Paris. L'exploitation de ce type de géothermie repose sur un fonctionnement en doublet (Figure 1) :

- Un forage permet de puiser l'eau à grande profondeur, là où elle est naturellement très chaude,
- Ramenée à la surface du sol, par sa pression naturelle ou à l'aide d'une pompe, l'eau est envoyée par une canalisation étanche à une centrale géothermique,
- La production de chaleur a lieu dans la centrale géothermique, au moyen d'un échangeur de chaleur constitué d'une série de plaques en métal inoxydable (titane) assurant une grande surface d'échange. L'eau issue du sous-sol circule d'un côté, l'eau alimentant les installations de chauffage des immeubles circule de l'autre côté. Il n'y a aucun contact direct entre les deux eaux,
- L'eau provenant du sous-sol est renvoyée en profondeur après avoir cédé une part de sa chaleur,
- Un réseau de chaleur permet d'acheminer l'eau réchauffée après passage dans les échangeurs vers les divers immeubles clients.

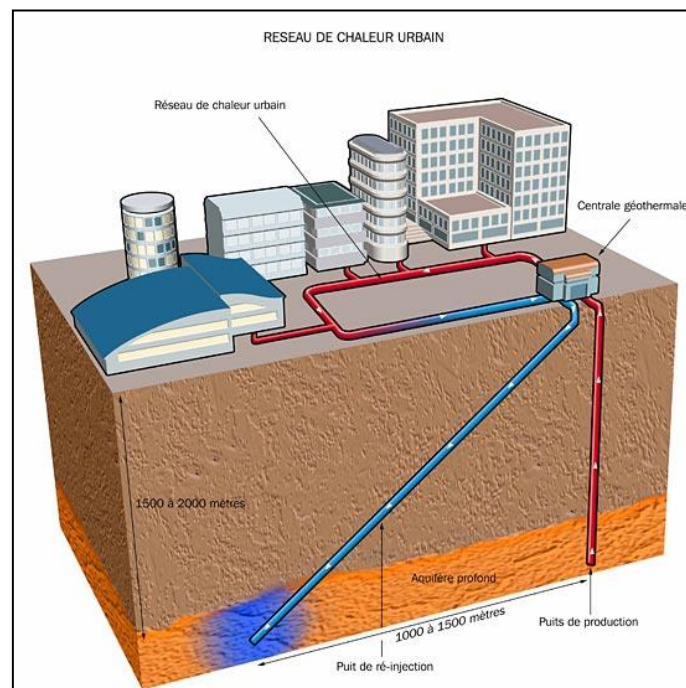


Figure 1 – Principe de fonctionnement d'un doublet géothermique (source : ADEME/BRGM)

L'Île-de-France est riche d'une cinquantaine d'exploitations géothermiques de ce type, et constitue une région pilote en France (et en Europe). Leurs positions sont rappelées sur la Figure 2.

L'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG) a édité une étude de marché en 2023 sur la géothermie en France répertoriant 54 réseaux de chaleur exploitant la géothermie au

Dogger, sous forme de doublets ou de triplets de forage. Les réseaux de chaleur bénéficiant de la géothermie alimentent près de 314 000 équivalents logements.

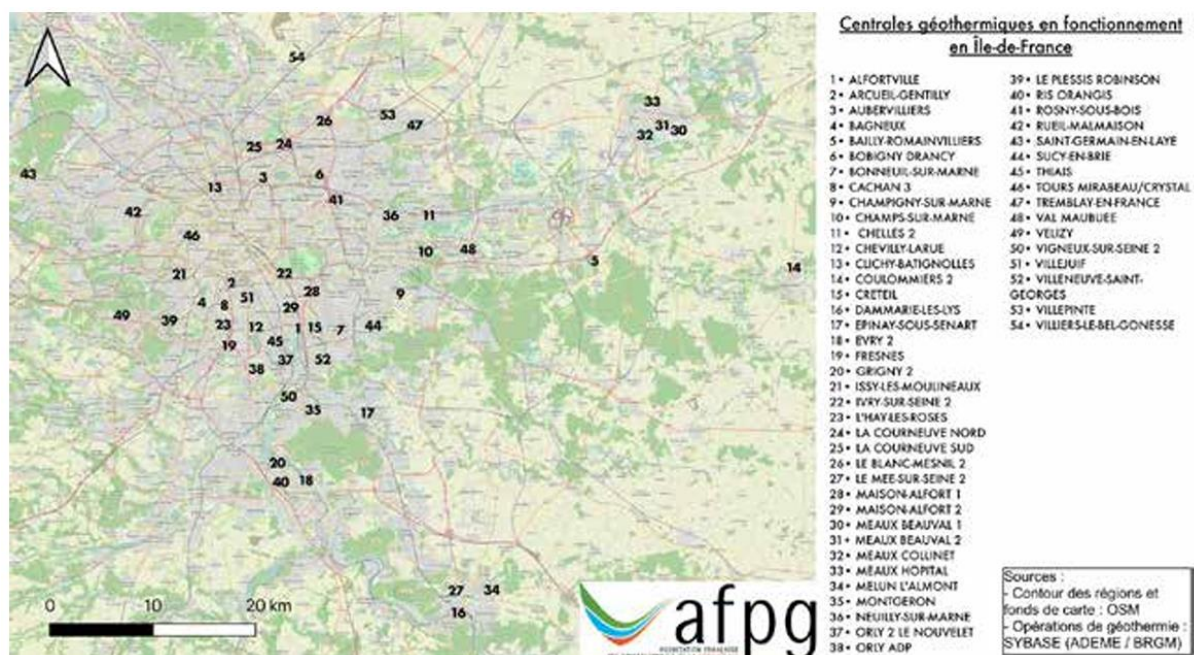


Figure 2 – Réseaux de chaleur géothermiques en Île de France en 2023 (source : étude de marché AFGP 2023)

Le BRGM met également à disposition du public une carte des forages géothermiques au Dogger en Île-de-France (Figure 3).

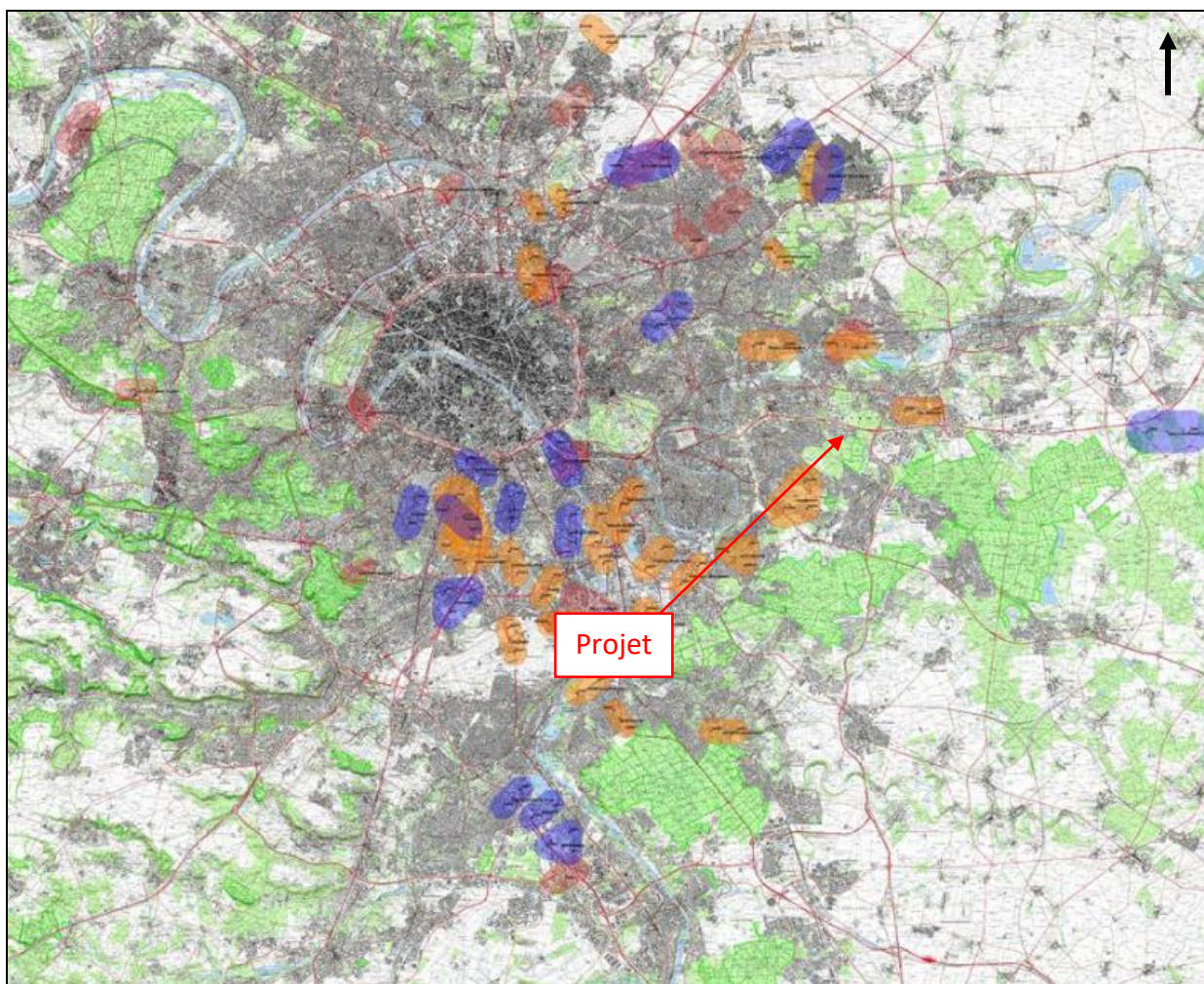


Figure 3 – Installations géothermiques au Dogger en Île-de-France (source : BRGM)

Localisation

Les têtes de puits du futur quadruplet seront implantées à proximité du Complexe sportif Octave Lapize sur la commune de Villiers-sur-Marne (cf. Figure 4). Un bâtiment intégrant la centrale géothermique sera également construit à proximité du site et le réseau de chaleur s'étendra sur les communes de Villiers-sur-Marne, Bry-sur-Marne et Noisy-le-Grand.

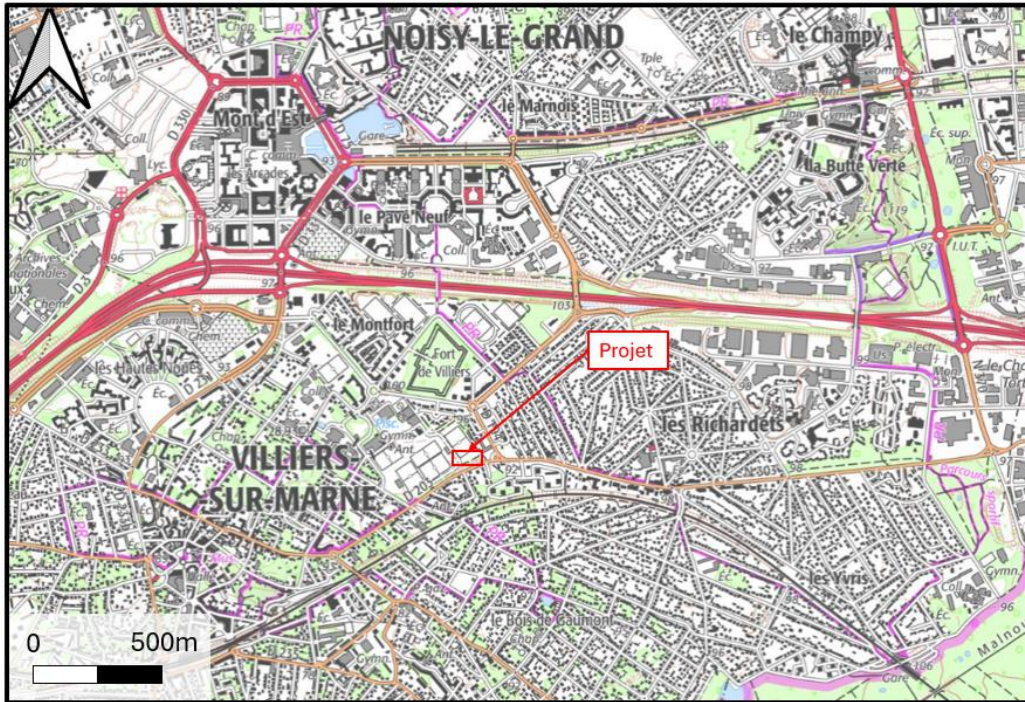


Figure 4 – Zone d'implantation du futur quadruplet (source : Géoportail)



Figure 5 - Surface mobilisées pour le projet de géothermie

La présente demande comprend une demande d'autorisation de recherche et une demande d'autorisation environnementale volet travaux minier (Figure 6).

Le projet s'insère dans un secteur où de nombreux doublets sont déjà présents, qu'ils soient en phase d'exploitation, en projet ou à l'arrêt. Ainsi la géologie et les propriétés physico-chimiques du sous-sol sont bien connues.

A proximité du futur projet, on retrouve les permis d'exploitation de Neuilly-sur-Marne, Chelles, Val-Maubuée, Champigny 1, Champs-sur-Marne, Rosny-sous-Bois qui sont en activité et celui de Champigny 2 qui a été foré et dont la mise en exploitation est à venir prochainement.

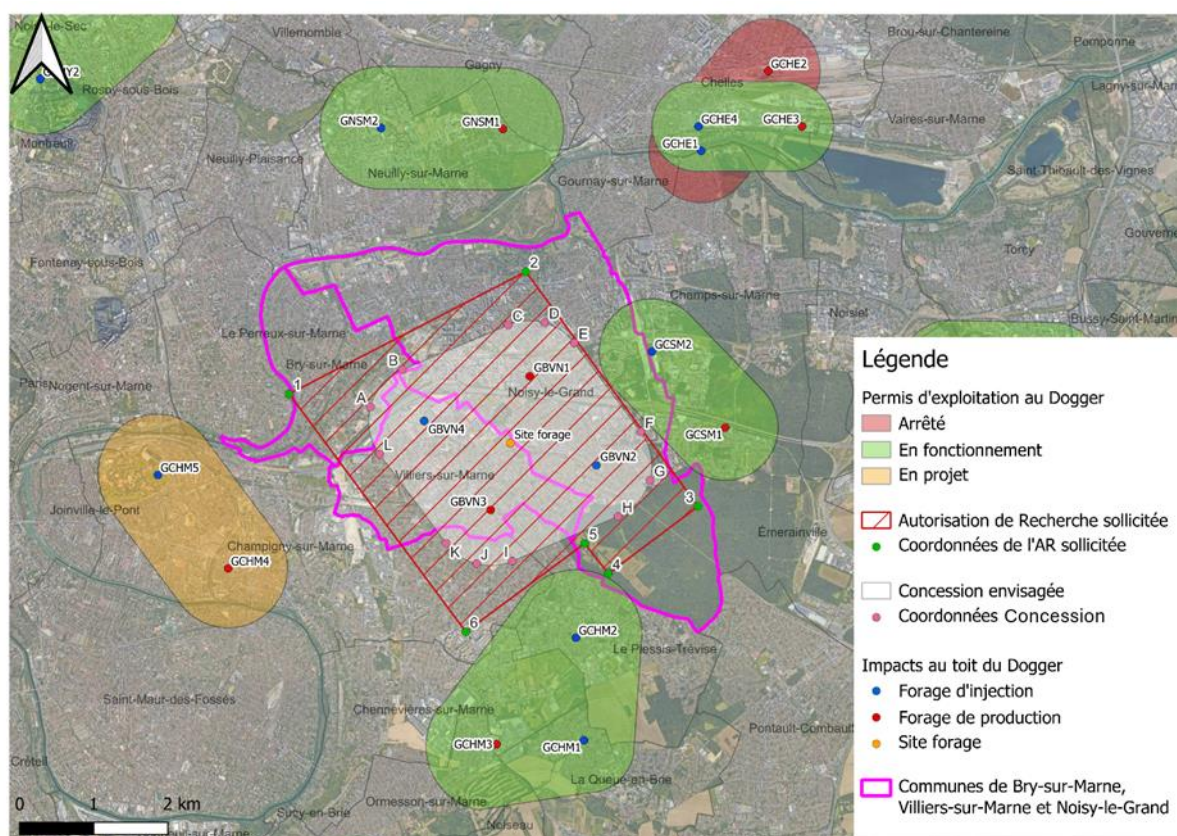


Figure 6 – Autorisation de recherche sollicitée et concession envisagée pour le projet de Villiers-sur-Marne, Bry-sur-Marne et Noisy-le-Grand

Les communes concernées par la demande d'autorisation de recherche sont les suivantes:

- Noisy-le-Grand ;
- Emerainville ;
- Bry-sur-Marne ;
- Noisy-le-Grand ;
- Le Plessis-Trévisé ;
- Champigny-sur-Marne ;
- Villiers-sur-Marne.

Evaluation des besoins

Une étude de faisabilité a été réalisée concernant la création d'un réseau de chaleur alimenté par des énergies renouvelables, afin d'offrir aux communes une solution de chauffage locale, durable et à un tarif compétitif, avec comme périmètre d'étude l'ensemble du territoire des trois communes de Bry-sur-Marne, Villiers-sur-Marne et Noisy-le-Grand. Ce rapport est disponible en annexe 1.

La carte de chaleur présentée ci-dessous met en évidence les densités de chaleur du territoire des trois communes à horizon 2030. Elle permet d'identifier des zones à forte densité de besoin en chaleur collective pour lesquelles un raccordement à un réseau de chaleur urbain peut être étudié.

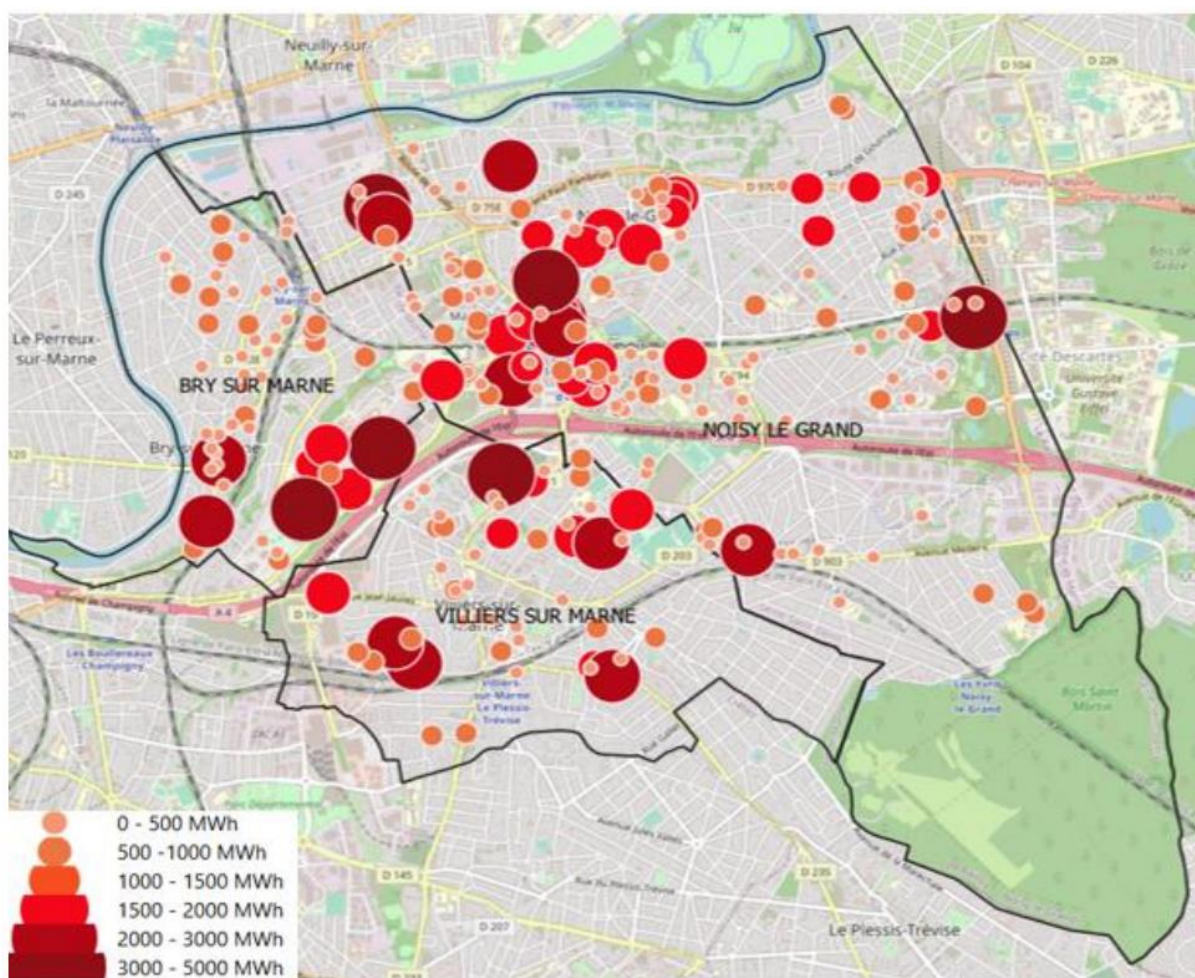


Figure 7 – Carte de chaleur du territoire

L'objectif a été de compléter davantage la carte de chaleur précédemment établie dans l'étude de faisabilité grâce à la transmission de données spécifiques à de nouveaux projets de constructions par les collectivités par exemple.

Sur l'ensemble du territoire de la commune de Noisy-le-Grand, c'est au total 132 prospects qui ont été retenus, pour des besoins de chaleur estimés 77 GWh en 2030. La répartition des besoins est représentée en Figure 8.

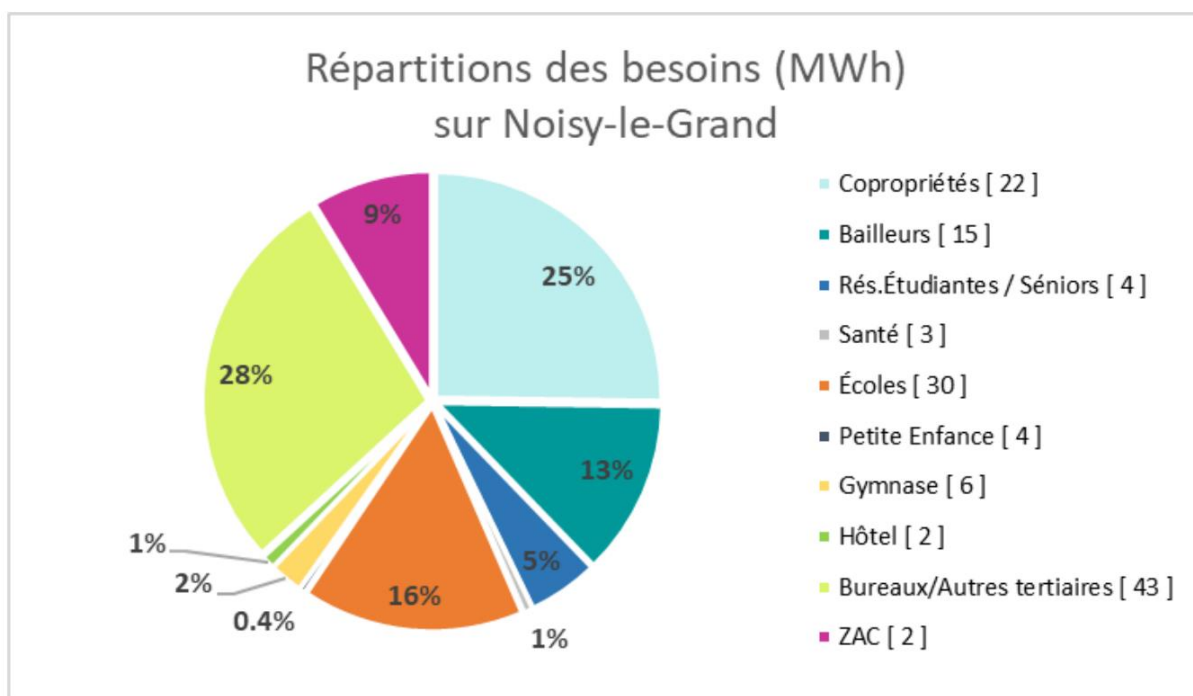


Figure 8 – Répartition des besoins issus de la prospection

La typologie des prospects retenus est majoritairement du tertiaire (48%), très présent à Noisy-le-Grand, et de l’habitat (46%). Le nombre indiqué à côté de chaque typologie correspond au nombre de sites concernés. Ce complément d’étude a ainsi permis d’identifier 101 sites supplémentaires sur la commune de Noisy-le-Grand, soit 57 GWh/an (en 2030).

Les besoins thermiques retenus à horizons 2030 sont présentées dans le Tableau 1.

2030	Indicateur	Données
Besoins thermiques	DJU	2030
	Besoins de chauffage recensés	124 GWh/an
	Besoins en ECS recensés	25 GWh/an
	TOTAL des besoins recensés	149 GWh/an

Tableau 1 – Besoins thermiques à horizon 2030

Le tracé du réseau a été abordé avec les services des trois communes et n’ont pas soulevé de points bloquants. Ce tracé est issu de l’étude de faisabilité et n’est pas définitif. Il évoluera au cours des études de maîtrise d’œuvre. L’alimentation en chaleur de certains quartiers non desservis dans cette version pourra être intégrée au projet à cette occasion. De manière à relier les abonnés au réseau de chaleur, le tracé projeté du réseau est présenté ci-dessous pour le scénario de développement retenu :

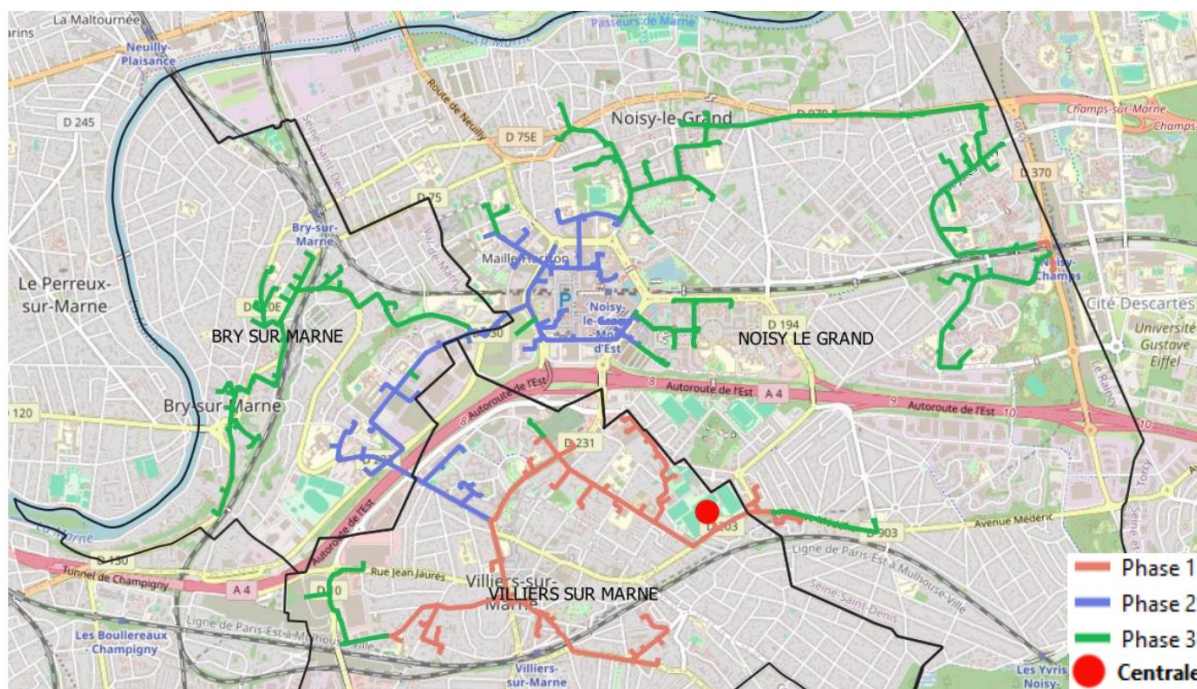


Figure 9 – Tracé projeté du réseau de chaleur pour le scénario de développement retenu

Les besoins annuels en chaleur estimés des futurs abonnés s'élèvent à 149 GWh/an en 2030, valeur suffisante à ce qui est nécessaire pour financer des investissements de forage au Dogger à un prix de chaleur commercialisable (70 GWh/an/doublet).

Afin de réaliser les simulations énergétiques de ce scénario, voici les données énergétiques de dimensionnement :

- Débit géo total : 2 x 320 m³/h,
- Température de mélange : 70°C (en tête de puits)
- Température de réinjection : 30°C (en tête de puits)
- Puissance PAC chaud : 19 MW (COP=4,4)
- Longueur du réseau : 33,4 km
- Ventes : 149 GWh/an
- Puissance maxi demandée : 76 MW
- Taux d'EnR&R : 74 %
- Densité du réseau ≈ 4,5 MWh /ml

Considérant que la géothermie est effectivement disponible 98% du temps, le bilan énergétique est le suivant (sortie de chaufferie) :

- Géothermie : 121 382 MWh/an (mixité : 76%) ;
- Électricité PAC : 10 364 MWh/an (mixité : 6%) ;
- Gaz : 28 457 MWh/an (mixité : 18%) ;
- TOTAL : 160 202 MWh/an (mixité : 100%)

Travaux de forage projetés



Figure 10 – Exemples d’ateliers de forages géothermiques

Les travaux seront réalisés avec un appareil de forage de type pétrolier ayant la capacité de travailler à des profondeurs de l’ordre de 2000 mètres dans un contexte urbain (Figure 10).

Les coupes techniques des futurs ouvrages ont été construites en tenant compte des débits d’exploitation envisagés (qui conditionnent le diamètre des tubages), des différents aquifères à isoler (Albien et Néocomien, sensibles au regard des captages d’eau potable), et de manière à espacer suffisamment les points d’impact des deux forages au niveau du réservoir (afin de limiter l’impact du recyclage thermique : le fait de pomper de l’eau déjà refroidie par l’exploitation géothermique).

Programmation des phases de travaux		Description succincte
Travaux de terrassement		Travaux de surface et autour de la future plateforme en fonction des charges définies par les études géotechniques
Equipements de la plateforme de forage		- Bassin de rétention - Caves - Réseau de caniveaux - Ouvrages divers (déshuileur, décanteur)
Alimentation du chantier en eau		Raccordement au réseau existant
Forages et opération annexes	Installation de l'appareil	Forages et opérations annexes
	Activité forage	Forage au Dogger (deux injecteurs et deux producteurs)
	Equipement des forages	Installation des tubages, cimentations
	Tests de production	A l'issue des forages pour déterminer la capacité des puits
	Diagraphie	A l'issue des forages et après chaque pose de tubage.
	Replis de l'appareil de forage	Processus similaire à la venue de l'appareil
Travaux de surface	Construction de la centrale	Travaux de surface
	Raccordement à la centrale	Branchement du lot sous-sol au lot surface – connexion entre les têtes de puits et l'échangeur de chaleur
	Mise en place du réseau de chaleur	Travaux de génie civil au sein de la commune pour raccorder les prospects à la centrale
Mise en production		Démarrage de l'installation

Tableau 2 – Résumé des travaux dans leur ensemble

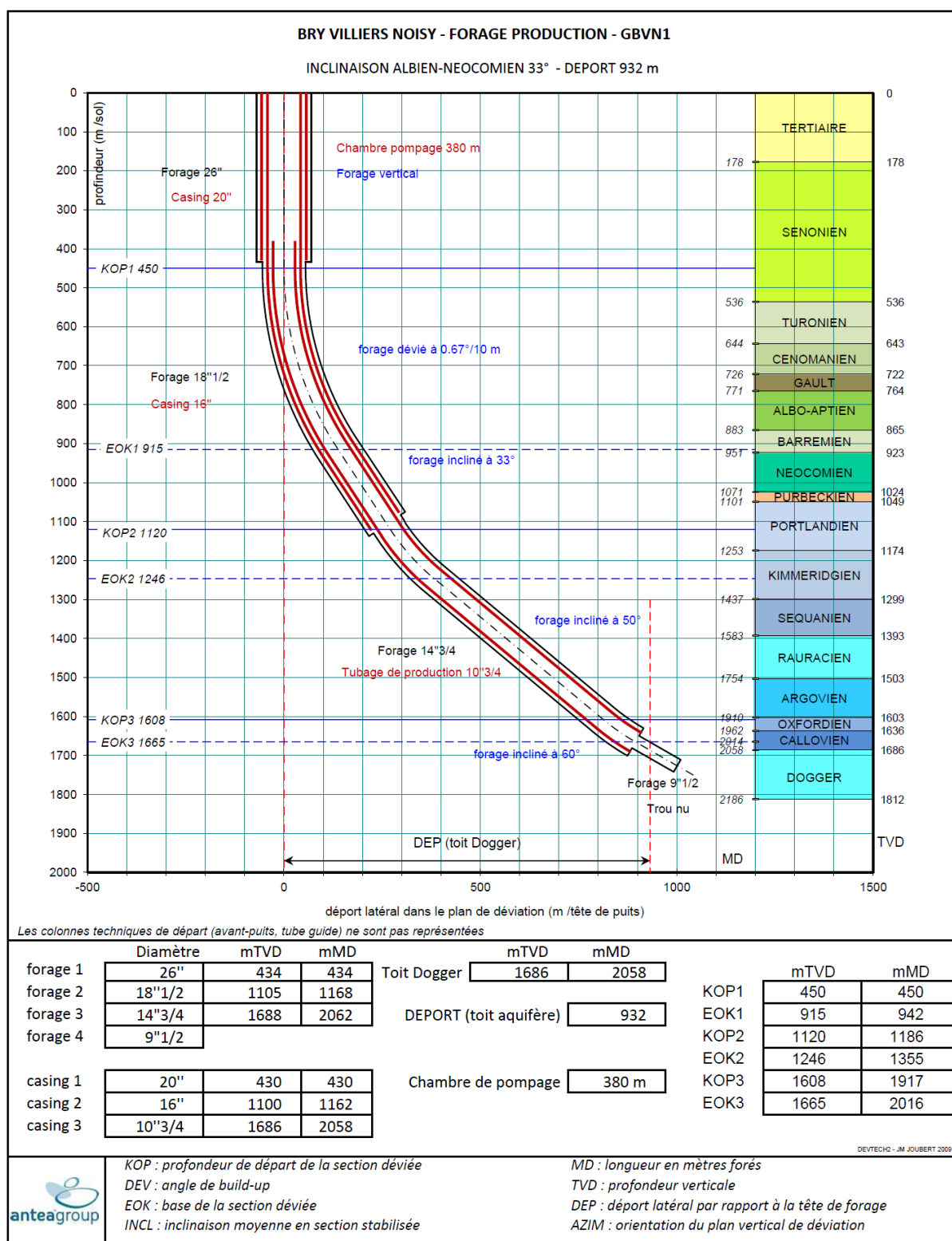


Figure 11 – Coupe prévisionnelle d'un des ouvrages (à titre indicatif)

Une modélisation hydrodynamique et thermique du réservoir du Dogger a été réalisée afin de simuler l'impact de la mise en service du quadruplet sur les niveaux d'eau et l'évolution des températures de l'aquifère sur les doublets avoisinants. Les principales caractéristiques qui ont été prises en compte dans le dimensionnement du projet géothermique au Dogger pour le projet sont les suivantes :

- Débit d'exploitation moyen annuel de GBVN1-GBVN2 : 284 m³/h,
- Débit d'exploitation moyen annuel de GBVN3-GBVN4 : 296 m³/h,
- Débit d'exploitation maximal de GBVN1-GBVN2 : 350 m³/h,
- Débit d'exploitation maximal de GBVN3-GBVN4 : 370 m³/h,
- Température du fluide réinjecté : 47°C.

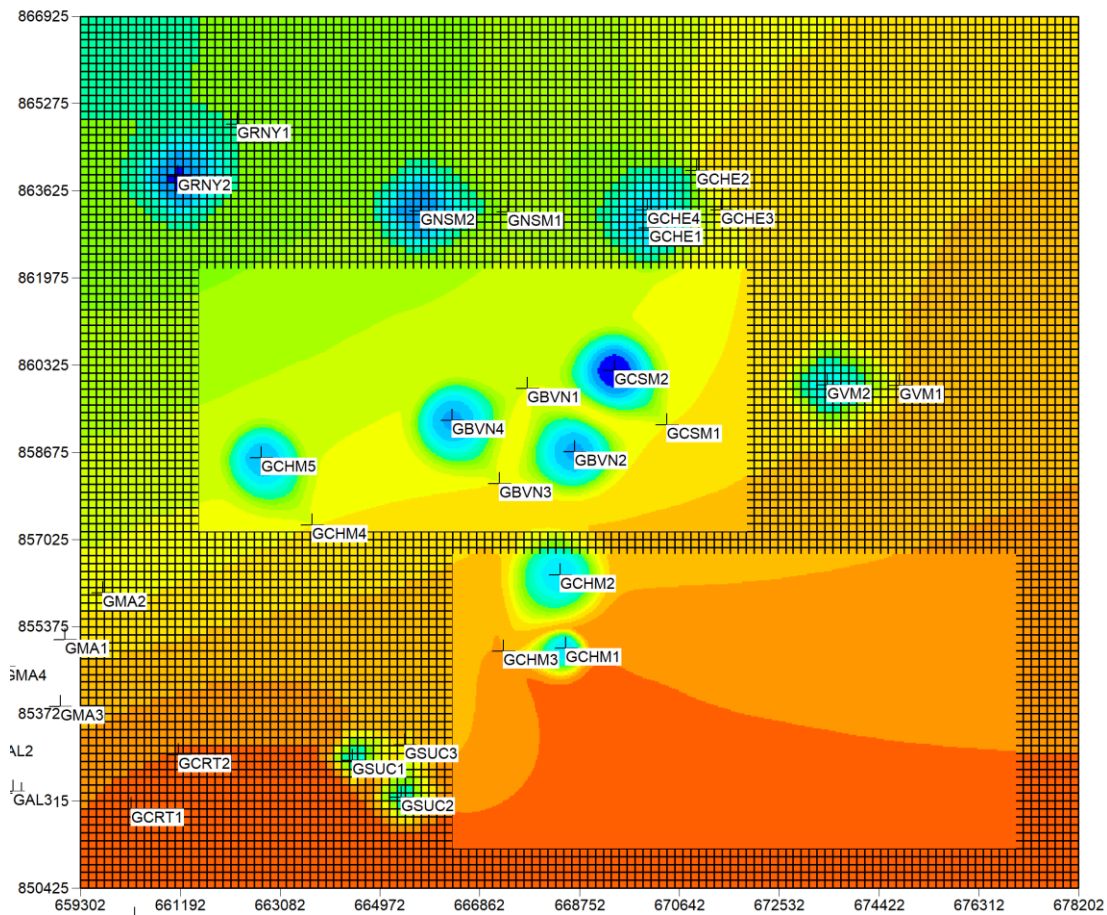


Figure 12 – Panaches de température simulés au niveau des différents puits au Dogger du secteur

Les résultats de la modélisation indiquent un impact acceptable sur les niveaux hydrodynamiques et nul sur les températures au droit des ouvrages voisins existants Champs-sur-Marne, Champigny, Chelles, Neuilly-sur-Marne (Figure 12).

Calendrier des travaux

Intitulé du projet	Projet de géothermie– Réalisation d’un quadruplet géothermique au Dogger
Localisation	Complexe sportif Octave Lapize, 94350 Villiers-sur-Marne
Description	Réalisation de quatre forages (deux injecteurs et deux producteurs) pour alimenter le réseau de chaleur des villes de Villiers-sur-Marne, Bry-sur-Marne et Noisy-le-Grand
Maître d’ouvrage	SIPPEREC
Classification	Permis minier : gîte géothermique
Aquifère concerné	Calcaires du Dogger
Profondeur de forage	GBVN1 : 2186 m MD GBVN2 : 2337 m MD GBVN3 : 2224 m MD GBVN4 : 2350 m MD
Production	GBVN1-GBNV2 : 17.0 MW GBVN3-GBVN4 : 19.3 MW Quadruplet : 36.3 MW
Durée prévisionnelle des travaux de forage	250 jours d’opération forage
Date de début des travaux	S2 2026
Durée prévisionnelle des travaux sur site	Environ 2 ans
Durée prévisionnelle des travaux du réseau de chaleur et de la centrale	Environ 1 an
Date prévisionnelle de mise en service	Première phase en 2027-2028

Tableau 3 – Calendrier des travaux

Evaluation des impacts du projet

La demande d'ouverture de travaux minier est accompagnée d'une étude d'impact environnemental du projet qui concerne les phases de travaux et d'exploitation.

Dans un premier temps, l'analyse de l'état initial du site et de son environnement a permis de dégager les principaux enjeux environnementaux. La synthèse de ces enjeux est décrite dans le Tableau 4.

	Enjeu nul ou négligeable
	Enjeu faible
	Enjeu modéré
	Enjeu fort

Thème	Constats	Intensité de l'enjeu
Milieu physique		
Climat	Le site d'étude n'est pas situé dans un environnement de conditions climatiques extrêmes.	Faible
Mesures complètes décrites dans l'études d'impact. Mesures d'évitements : Contrôle réglementaire des pompes à chaleur, recours à des fluides frigorigènes spécifiques, interdiction de brûler des déchets sur chantier, ... Mesures de réduction : Vitesse de circulation limitée sur le chantier, raccordement électrique potentiel de l'appareil de forage, sensibilisation du personnel aux écogestes du quotidien, ... Mesures de compensation : Sans objet		
Qualité de l'air	Le site d'étude est situé dans un environnement où la qualité de l'air est moyenne.	Faible
Mesures complètes décrites dans l'études d'impact. Mesures d'évitements : Sans objet Mesures de réduction : Vitesse réduite des véhicules, arrosage au besoin des zones de terrassement pour limiter l'envol des poussières, entretiens réguliers des engins, injection d'eau de javel pour empêcher la diffusion d'H ₂ S pendant les phases de test en forage, contrat anti-éruption en phase exploitation, utilisation de capteurs H ₂ S, ... Mesures de compensation : Sans objet		
Sol et sous-sol	Aucun site BASOL n'est recensé dans un rayon de 1km autour de la zone d'étude. Un site BASIAS est référencé à proximité du projet et plusieurs sites sont situés à moins de 500 m du projet.	Fort
Mesures complètes décrites dans l'études d'impact. Mesures d'évitements : Mise en place de bacs de rétention adaptés, de surfaces bâchées bétonnées pour le stockage de produits dangereux, les zones d'activités seront étanches, emploi d'huiles végétales et non polluantes, sensibilisation du personnel à la préservation de l'environnement, mise en place d'un séparateur à hydrocarbure sur la plateforme de forage, mise en place des réseaux de chaleur selon les règles de l'art, diagnostic amiante en amont de la phase travaux, vérifications régulières de l'étanchéité des réseaux de collecte des eaux usées et pluviales, ... Mesures de réduction : Réalisation d'un plan de gestion des terres impactées, tri et réutilisation sur site d'une partie des terres en accord avec le projet d'aménagement, mise en place d'une couche de terre saine d'une épaisseur de 40 cm au droit des espaces verts ou mise en place d'une couverture afin d'éviter tout contact avec les remblais impactés, évacuation des terres en filières agréées si impossible de les réutiliser sur site, nettoyage des engins de chantier et des voiries souillées, réutilisation d'une partie des terres excavées lors de la réalisation des tranchées, mise en œuvre d'une procédure d'urgence « pollution ».		

Mesures de compensation : Sans objet		
Eaux souterraines	Absence de captage d'eau potable communal.	Faible
Mesures complètes décrites dans l'études d'impact. Mesures d'évitements : Mesures similaires aux sols et sous-sol, mise en place d'une plateforme en béton empêchant l'infiltration dans le sol, pas d'utilisation de « boue à huile ». Mesures de réduction : Architectures des puits normées, isolement des aquifères par cimentation des annulaires, contrôle périodique des tubages par diagraphie, mise en place d'une double protection au droit de l'aquifère de l'Albien, utilisation de boues de forage spécifiques pour éviter les pertes et contaminations, suivi réglementaire pendant toute la durée de vie des ouvrages. Mesures de compensation : Sans objet		
Eaux superficielles	Aucun cours d'eau ne traverse la ville.	Faible
Mesures complètes décrites dans l'études d'impact. Mesures d'évitements : Aucune boue à l'huile ne sera utilisée en phase forage, les zones d'activités du site seront étanches (goudronnées ou bétonnées), stockage des matières polluantes sur des rétentions adaptées, séparateur d'hydrocarbure et rétention au niveau du point de collecte des eaux de ruissellement avant rejet dans le réseau d'eau pluviale, refroidissement à 30°C des eaux avant rejet dans le réseau public d'assainissement, ... Mesures de réduction : Architectures des puits normées, utilisation de boues de forage spécifiques pour éviter les pertes et contaminations, suivi réglementaire pendant toute la durée de vie des ouvrages, contrat anti-éruption en phase exploitation, vérification régulière de l'étanchéité des réseaux, ... Mesures de compensation : Sans objet		
Paysage	Site légèrement visible depuis les routes d'accès et les infrastructures autour, il est constitué actuellement d'un couvert végétal, à proximité d'un terrain du complexe sportif Octave Lapize	Modéré
Mesures complètes décrites dans l'études d'impact. Mesures d'évitements : Les têtes de puits et les réseaux de chaleur ne seront pas visibles en phase exploitation, la centrale sera construite sur un site privé non accessible depuis la rue. Mesures de réduction : Eclairages de nuit dirigés vers le chantier, zones de stockage mise en place à l'intérieur du chantier, maintien de l'état de propreté du chantier, nettoyage régulier des voiries, la volumétrie du bâtiment sera la plus compacte possible, ... Mesures de compensation : Réhabilitation du site après la phase chantier.		
Risques naturels	Le site d'étude est concerné par un risque modéré à fort du retrait-gonflement des sols argileux. Zone de sismicité 1 (très faible). Le territoire est susceptible d'être soumis à des inondations. Les communes de Villiers-sur-Marne et Noisy-le-Grand ne sont pas soumises à un PPR Mouvement de terrain – affaissements et effondrements (cavités souterraines).	Modéré
Mesures complètes décrites dans l'études d'impact. Mesures d'évitements : Réalisation de sondages géotechniques de reconnaissance, cimentation des tubages. Mesures de réduction : Constructions réalisées en respectant les « bonnes pratiques ». Mesures de compensation : Sans objet		

Milieu naturel		
Espaces naturels et continuités écologiques	Aucun PNR, RNN, RNR, ZICO n'est présent dans un rayon de 5 km autour du projet. Le site du projet est situé en bordure de zone humide de Classe B (Zone humide probable dont le caractère humide reste à vérifier et les limites à préciser) ; le territoire communal de Villiers-sur-Marne a fait l'objet d'un inventaire des zones humides dans le cadre du SAGE Marne Confluence. Aucune zone humide fonctionnelle n'a été recensée. ; D'après le SAGE Marne Confluence, le projet ne se situe pas en zone humide, ni dans une ancienne zone humide potentielle. Le secteur du projet n'est pas concerné par le repérage de l'infrastructure d'origine artificielle présentant des caractéristiques écologiques de milieux humides identifiée par le SAGE. Un site Natura 2000 (ZPS directive Oiseau) est localisée à environ 3 km du projet. Un APPB est localisé à moins d'un kilomètre du projet. Le site du projet de géothermie n'est pas concerné par les dispositions présentées dans les arrêtés relatifs à ce Biotope. Trois ZNIEFF sont localisées pour partie sur le territoire communal : 2 ZNIEFF de type I et 1 ZNIEFF de type II. Un ENS et un EBC ont été identifiés à proximité du projet. Aucun impact du projet sur la protection liée aux ENS et aux EBC repérés sur le zonage du PLU de la commune n'est attendu.	Modéré
Mesures complètes décrites dans l'études d'impact. Mesures d'évitements : Le choix définitif du tracé du réseau de chaleur sera fondé sur la volonté d'éviter les zones à enjeux, optimisation de l'emprise de chantier afin de réduire l'emprise de la zone de travaux, réduction de la plateforme à son minimum au cours de la phase d'exploitation. Une attention particulière sera portée sur les rejets, le contrôle d'éventuelles fuites et la gestion des déchets Mesures de réduction : Sans objet Mesures de compensation : Réhabilitation du site après forage.		
Faune, Habitats et flore	Plusieurs espèces protégées au niveau de la commune. Le projet est situé à proximité de zones sensibles (secteur reconnu pour son intérêt écologique, réservoir de biodiversité, corridors, liaison à intérêt écologique	Modéré
Mesures complètes décrites dans l'études d'impact. Mesures d'évitements : Le choix définitif du tracé du réseau de chaleur sera fondé sur la volonté d'éviter les zones à enjeux, optimisation de l'emprise de chantier afin de réduire l'emprise de la zone de travaux, réduction de la plateforme à son minimum au cours de la phase d'exploitation. Une attention particulière sera portée sur les rejets, le contrôle d'éventuelles fuites et la gestion des déchets Mesures de réduction : Sans objet Mesures de compensation : Réhabilitation du site après forage.		

Milieu humain		
Caractéristiques socio-économiques	Les premières habitations sont localisées à environ 50 m du site de forage. Des établissements sensibles sont présents dans un rayon d'1 km (aire de jeu, école maternelle, primaire, lycée, hôpital). Le site est situé dans une zone urbanisée.	Fort
Mesures complètes décrites dans l'études d'impact. Mesures d'évitements : Installations des équipements à l'intérieur du bâtiment de géothermie et respect des dispositions constructives en matière d'acoustiques, travaux du bâtiment intégrant la centrale réalisés sur des horaires essentiellement diurnes, ... Mesures de réduction : Limitation des circulations de véhicules et définition des sens de circulation sur le chantier pour limiter l'usage des avertisseurs de recul, éloignement dans la mesure du possible des équipements et activités bruyantes des riverains, mise en place de bâches acoustiques proche des équipements bruyants, ... Mesures de compensation : Sans objet		
Réseaux et urbanisme	La commune ne présente pas de perspectives paysagères identifiées comme à préserver par un document de rang supérieur. La commune est concernée par le plan de paysage du SAGE Marne Confluence. La commune est concernée par un plan de prévention (installations classées et sites constituant un risque pour la sécurité et la salubrité publique La commune est concernée par un risque lié aux ressources et équipements : conduite de canalisation électrique et de gaz naturel	Faible
Mesures complètes décrites dans l'études d'impact. Mesures d'évitements : Le choix définitif du tracé du futur réseau de chaleur et de ses sous-stations sera fondé sur la volonté d'éviter les zones à enjeux. Mesures de réduction : Sans objet Mesures de compensation : Sans objet		
Patrimoine culturel et architectural	La base de données Mérimée ne recense pas de données « éléments majeurs du patrimoine bâti » au sein de la commune. La commune de Villiers-sur-Marne ne possède aucun site classé ou projet de site classé, ni aucun site inscrit ou projet de site inscrit. Plusieurs sites classés monuments historiques se trouvent sur les communes et aux alentours mais pas à proximité immédiate du projet. La commune ne fait pas l'objet d'une ZPPAUP ou d'une AVAP, ni d'un PSMV.	Faible
Mesures complètes décrites dans l'études d'impact. Mesures d'évitements : Le choix définitif du tracé du futur réseau de chaleur et de ses sous-stations sera fondé sur la volonté d'éviter les zones à enjeux. Mesures de réduction : Sans objet Mesures de compensation : Sans objet		
Transport et circulation	Trafic assez dense des voies de circulation sur la commune (A4, D231, D203, D233, D235, D903, D194) mais faible pour accéder au site (moins de 5 000 véhicules/jour).	Faible
Mesures complètes décrites dans l'études d'impact. Mesures d'évitements : Le tracé définitif du réseau de chaleur évitera le plus possible les principaux axes de communication des communes concernées, aménagement du raccordement du site à la route de sorte que les conducteurs d'engins puissent manœuvrer sans constituer d'obstacles ou de risques vis-à-vis de la circulation. Mesures de réduction : Un schéma de circulation des engins sera établi, les projecteurs utilisés de nuit seront orientés de manière à supprimer tout risque d'éblouissement, les engins seront équipés d'éclairage suffisant pour assurer les conditions de sécurité lorsque la luminosité naturelle est insuffisante, mise en place de panneaux routiers de chantier informant les usagers de la route de la sortie d'engins de chantier, contrôle du stationnement des véhicules aux abords du chantier. Mesures de compensation : Sans objet		

Commodité du voisinage	L'indice Lden sur une journée au droit du site est moyen. Ambiance sonore modérée respectant les réglementations sur la commune (sauf rare exception). Pollution lumineuse importante.	Fort
Mesures complètes décrites dans l'études d'impact. Mesures d'évitements : Livraison de matériel uniquement en journée pendant le chantier, respect des dispositions constructives en matière d'acoustique, installation des équipements bruyants à l'intérieur du bâtiment en phase exploitation. Mesures de réduction : Recours privilégié au raccordement électrique de l'appareil de forage, capotage du treuil et des pompes, les tâches les plus bruyantes comme les cimentations ne seront pas réalisées de nuit, un point de monitoring sera installé sur le chantier pendant toute la phase travaux de forage, limitation des circulations de véhicules et définition des sens de circulation sur le chantier pour limiter l'usage des avertisseurs de recul, éloignement dans la mesure du possible des équipements et activités bruyantes des riverains, mise en place de panneaux avec bâches acoustiques, aménagement des horaires des tâches bruyantes. Mesures de compensation : Sans objet		

Tableau 4 – Synthèse des enjeux du projet principales mesures d'évitement, de réduction et de compensation qui seront mises en œuvre

L'impact sur le milieu environnant du quadruplet géothermique, des réseaux et de la centrale est peu important : le projet se situe au niveau d'un complexe sportif et est en dehors :

- D'un parc naturel régional ou national,
- D'une réserve naturelle ou d'un arrêté de protection de biotope,
- De zone d'intérêt communautaire pour la protection des oiseaux (ZICO),
- De zone Natura 2000 (zones de protection spéciale et sites d'importance communautaire),
- De ZNIEFF 1 et 2 (zones d'intérêt écologique, floristique et faunistique),
- De tout périmètre de protection immédiat et rapproché de captages AEP,
- D'Espaces Naturels Sensibles et d'Espaces Boisés Classés.

Des mesures spécifiques seront prises pour empêcher tout impact du projet sur les **eaux superficielles et souterraines**. Elles comprendront a minima les précautions suivantes :

- Pendant la phase forage, l'atelier de forage est installé sur une plateforme qui empêche toute infiltration dans le sol. La plateforme est construite avec un maillage de caniveaux (notamment autour de la foreuse) en légère pente canalisant les eaux de ruissellement du chantier vers un même point.
- Les cuves de fuel alimentant les moteurs diesel sont munies de cuves de rétention d'un volume égal au volume stocké.
- Un séparateur à hydrocarbures, ainsi qu'une rétention de 10 m³ seront mis en place au niveau du point de collecte des eaux de ruissellement, avant rejet dans le réseau d'eau pluviale.
- Le rejet de l'eau géothermale dans le réseau public d'assainissement ne se fait qu'après refroidissement à 30°C, après autorisation de déversement des eaux usées autres que domestiques par le concessionnaire du réseau, et établissement d'une convention de rejet. Elle sera finalisée et signée par l'entreprise de forages retenue sur appel d'offres.
- Le refroidissement se fera par plusieurs moyens :
 - Passage dans une tour de refroidissement à convection d'air forcé,
 - Passage dans des bacs de stockage, où se fera un échange thermique avec l'atmosphère,
 - Mélange avec de l'eau du réseau (éventuellement, en dernier recours).
- La boue de forage aura toujours une pression de fond maintenue légèrement inférieure à celles des différentes nappes profondes afin d'éviter toutes pénétrations dans ces aquifères.
- En cas de difficultés liées à un éventuel artésianisme, le puits sera maîtrisé avec une saumure. De plus, le foreur mettra en place un Bloc Obturateur de Puits (BOP) permettant de contrôler le forage en toute circonstance.

- Il ne sera pas utilisé de « boues à l'huile » (contenant des hydrocarbures), qui sont parfois utilisées dans des forages pétroliers, notamment pour éviter l'hydratation de certains bancs argileux ou pour réduire le filtrat.

Pour éviter la mise en communication artificielle des niveaux aquifères entre eux, les horizons aquifères seront isolés par tubages cimentés aux terrains, de façon à éviter toutes communications entre les différentes zones perméables régionalement isolées.

Ainsi, les premiers aquifères, les plus vulnérables vis-à-vis d'éventuelles pollutions de surface, seront isolés par un télescopage de deux tubages cimentés aux terrains. L'aquifère sensible de l'Albien et du Néocomien sera également protégé par un double tubage (16'' et 10''3/4), cimenté sous pression.

Une attention particulière sera accordée aux diverses cimentations, qui sont exécutées par des équipes spécialement entraînées. L'annulaire est calculé pour permettre une parfaite circulation du laitier. La cimentation sera contrôlée par un test d'étanchéité et par des diagraphies spécifiques.

Pour améliorer la protection, il sera mis en place des tubages en acier étiré sans soudure, de nuance K55, assemblés par vissage. En outre, l'épaisseur de ces tubages est choisie de manière à leur assurer une durée de vie prolongée.

La corrosion de la face interne des tubages sera ralentie par l'injection d'un inhibiteur. La permanence du film sera vérifiée en continu au moyen d'une sonde de contrôle rétractable dans la centrale géothermale.

La commune de Villiers-sur-Marne fait partie du périmètre du SAGE Marne Confluence. Ce SAGE a été approuvé par arrêté inter-préfectoral du 2 janvier 2018.

Au droit du site, il n'y a aucun risque d'inondation, aucune rivière à proximité et aucune zone humide. Il n'y a donc aucun risque de contamination superficielle Marne et ses confluent.

Le projet est conforme au SAGE Marne Confluence, au SDAGE Seine-Normandie et avec le PLU en vigueur.

Géothermie et risque sismique

Les essais de mise en service du projet, à Vendenheim (67) ont entraîné des séismes, a priori induits, au cours des années 2019 et 2020 (séismes des 28 octobre et 12 novembre 2019 à Strasbourg, des 4 et 25 décembre 2020 à Vendenheim). Il convient de souligner les différences entre ce projet et celui qui fait l'objet de la présente demande d'autorisation.

➔ La géothermie « profonde de socle » ou « haute température » ou encore « haute énergie »

La géothermie « profonde de socle » ou « haute température » ou encore « haute énergie » vise à exploiter des eaux ayant une température généralement supérieure à 150°C et circulant dans des zones où le contexte géologique permet leur remontée à une relative faible profondeur (de 2000 à 5000 m). L'objectif est alors de produire de l'électricité à partir de la chaleur géothermique. La chaleur résiduelle peut aussi faire l'objet d'une valorisation en surface (principe de la cogénération).

Ce type d'opération relève d'une autorisation ministérielle et est traitée dans le Code Minier, dans la catégorie des opérations de puissance supérieure à 20 MW (20 000 kW).

Cette géothermie s'adresse à des sites où des conditions particulières permettant de disposer dans le sous-sol de fluides circulant à haute température. C'est le cas des contextes volcaniques, des contextes à forte activité tectonique passée ou actuelle (systèmes de failles dans le sous-sol, actives ou inactives) ou des systèmes hydrothermaux à forte profondeur (>3000 m). Très souvent à cette profondeur, les débits circulant dans le sous-sol sont faibles et des techniques consistant à injecter un flux d'eau artificiel dans le sous-sol (supérieur à celui naturellement présent) ont été développées ; ces techniques sont appelées EGS pour « Enhanced Geothermal Systems » (Systèmes Géothermiques Améliorés). Ces systèmes supposent des injections d'eau à des pressions importantes, de l'ordre de 100 bars pour permettre la circulation des fluides dans les failles du sous-sol.

Tous les projets de ce type existants en France se trouvent dans le fossé rhénan. Des permis de recherche ont aussi été déposés dans le Massif central, la Drôme, la région de Pau et le Nord, mais aucun ouvrage n'a été réalisé à ce jour dans ces régions. On citera aussi la Guadeloupe où, en association avec le contexte volcanique, des eaux entre 250 et 260 °C sont exploitées à des profondeurs comprises entre 500 et 1000 m (champ de Bouillante).

En Métropole, à la frontière entre la France et l'Allemagne, les opérations de géothermie à haute température actuelles sont liées à l'existence d'une zone tectonique très particulière. En effet, le fossé Rhénan, long de 300 km et large de 35 à 50 km, est constitué de compartiments effondrés (grabens) dans un secteur présentant de nombreuses failles. Il correspond à un rift continental (Figure 13).



Figure 13 – Schéma du fossé rhénan (source : Eduterre)

C'est ce système de failles qui permet la circulation d'eaux très chaudes (températures supérieures à 150°C) à de relativement faibles profondeurs (2000 à 5000 m), et qui explique la localisation des opérations de géothermie profonde dans ce secteur : démonstrateur EGS à Soultz-Sous-Forêts, projet

d'Electricité de Strasbourg à Illkirch-Graffenstaden, projets Vendenheim et à Eckbolsheim, projet de l'Usine Roquette à Rittershoffen.

Le fossé rhénan est l'une des régions européennes les plus actives naturellement d'un point de vue sismique. Pour autant, les incidents sismiques constatés à Vendenheim correspondent a priori à une sismicité induite par les essais de production, l'injection d'eau à haute pression dans le système de failles facilitant leur relâchement brutal. Cette sismicité induite est un phénomène qui était attendu - et surveillé -, mais dont l'ampleur connue en décembre 2020 a dépassé les prévisions. On notera que par le passé, les projets de Soultz-Sous-Forêts, Landau et Bruchsal en Allemagne, Bâle en Suisse ou encore Mol en Belgique avaient déjà connu des phénomènes sismiques comparables. Généralement, ces phénomènes sont limités dans le temps et se produisent lors de la période de mise en service du système.

➔ **La géothermie « profonde de bassin » à « faible ou moyenne température » ou encore « basse énergie »**

Ce type de géothermie couvre le domaine allant de 0 à 2000 m de profondeur. Ici, il n'est pas recherché de contexte tectonique particulier et ce sont simplement les aquifères présents dans le sous-sol à plus ou moins grande profondeur qui sont exploités, la température de l'eau souterraine augmentant avec la profondeur (en moyenne de 3°C/100 m en France). L'exemple du bassin de Paris est illustré sur la Figure 14.

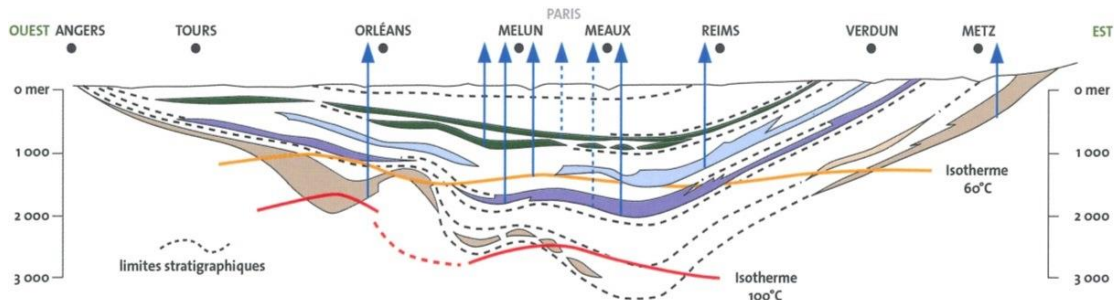


Figure 14 – Schéma du Bassin parisien (source : BRGM).

Ce type d'opérations relève d'une autorisation préfectorale au titre du Code Minier dans la catégorie des opérations de puissance inférieure ou supérieure à 20 MW (20 000 kW).

Dans ce cas, la valorisation en surface est uniquement thermique. Les températures des eaux exploitées dans ces opérations sont comprises entre 15°C et environ 80 °C. Les pressions utilisées pour la réinjection des eaux sont faibles. De nombreux ouvrages fonctionnent simplement par injection gravitaire, à la pression atmosphérique. Toutefois lorsque le niveau de la nappe est élevé, une injection sous pression est nécessaire, mais excède rarement 30 bars.

Les principales opérations existantes sont situées dans les grands bassins sédimentaires (Bassin parisien, Bassin aquitain) où l'on peut rencontrer des nappes d'eau souterraine profondes circulant au sein des terrains perméables (sables, calcaires, dolomies), sans que la présence d'un système de failles ne soit nécessaire pour permettre l'écoulement. Cette absence de système faillé, ainsi que les faibles pressions d'injection utilisées, expliquent qu'aucune sismicité induite n'ait été mise en évidence sur ce type de projets (la géothermie de ce type est exploitée industriellement depuis les années 1970 dans le Bassin parisien). Les eaux injectées circulent dans les pores du terrain sans que des phénomènes de réagencement des terrains ne soient produits du fait des faibles forces mises en jeu (pression d'injection limitée).

Actuellement, une cinquantaine de doublets/triplets de forages à 1800 m de profondeur exploitent la nappe du Dogger en région parisienne (nappe à environ 70°C, débits supérieurs à 200 m³/h) et une dizaine d'ouvrages en Aquitaine d'une profondeur entre 1000 et 1500 m, existent depuis les années 1980, sans qu'aucun phénomène de sismicité induite n'ait été rapporté.

➔ Conclusion

Ces éléments montrent qu'il est nécessaire de bien faire la différence entre les types de géothermie par rapport au risque de sismicité induite. Si la géothermie à Haute Température est sensible à ce phénomène, ce n'est pas le cas de la géothermie à Basse Température. Les cinquante années de recul disponibles en Île-de-France sur ce type de géothermie apportent une garantie forte en la matière.

Nota : En complément, le communiqué de presse de l'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG) qui aborde cette même thématique est disponible en annexe 2. Le mémoire d'analyse des risques sismiques de Villiers-sur-Marne est également disponible en annexe 3, ainsi que le mémoire de recherche et d'exploitation (annexe 4).

Glossaire

AFPG : Association Française des Professionnels de la Géothermie, a été créée le 15 juin 2010 à Paris. L'AFPG représente différents métiers de l'énergie géothermique en France métropolitaine et dans les DROM : foreurs, fabricant et installateurs de pompes à chaleur, gestionnaires de réseaux de chaleur, bureaux d'études, etc.

Aquifère : Formation géologique contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau mobilisable, constituée de roches perméables et capable de la restituer naturellement et/ou par exploitation. On distingue :

- Aquifère à nappe libre : l'aquifère reposant sur une couche très peu perméable est surmontée d'une zone non saturée en eau.
- Aquifère captif (ou nappe captive) : dans une nappe captive, l'eau souterraine est confinée entre deux formations très peu perméables. Lorsqu'un forage atteint une nappe captive, l'eau remonte dans le forage (nappe artésienne).

BOP : « Blow Out Preventer » ou Bloc Obturateur de Puits. Mesure de sécurité pour éviter toutes venues de fluide incontrôlées en cours de forage.

Boucle géothermale : Circuit de l'eau souterraine (eau géothermale) puisée dans l'aquifère et qui y retourne. Elle cède dans la centrale ses calories à la boucle géothermique.

Boue de forage : Désigne un fluide de composition spécifique qui permet de refroidir l'outil de forage, remonter les déblais, et maintenir les parois du forage.

Caliper : Mesure du diamètre du forage et localisation de cavage ou collapse : la sonde utilisée est une sonde excentrée à un bras palpeur maintenu en contact avec la paroi du trou et reliée mécaniquement, via une crémaillère, à un potentiomètre dont la résistance varie en fonction de l'écartement du bras.

Centrale géothermique : Ensemble des équipements de surface permettant la récupération de la chaleur (énergie) contenue dans le fluide géothermal et le départ vers le circuit de distribution de l'énergie (chaleur ou électricité). La centrale comprend tous les équipements nécessaires à ce transfert (systèmes de régulation, échangeurs, pompes...). Tous ces équipements peuvent être regroupés dans un même bâtiment.

Cimentation : La cimentation d'un tubage dans un forage consiste à injecter un laitier de ciment dans l'espace annulaire entre le tubage et la paroi naturelle du forage. La cimentation a pour but de sceller le tubage aux terrains traversés ce qui permet de protéger la qualité des eaux souterraines (afin éviter le mélange d'eaux de différents niveaux et l'infiltration d'eau de surface).

Colonne de production (colonne d'exhaure) : Conduite verticale disposée dans un forage servant à pomper l'eau souterraine.

Débit d'un forage : Quantité d'eau extraite d'un forage par unité de temps exprimée généralement en m³/h.

Délégation de service public : L'ensemble des contrats par lesquels une personne morale de droit public confie la gestion d'un service public dont elle a la responsabilité à un délégataire public ou privé dont la rémunération est substantiellement liée au résultat d'exploitation du service. C'est une notion

de droit français. La délégation de service public est le régime le plus fréquent de gestion déléguée des services publics, la collectivité pouvant par ailleurs opter pour une gestion directe du service (on parle alors de gestion en régie).

Dogger : Principal aquifère géothermique exploité en région parisienne, systématiquement par «association» de forages. Il se situe entre 1 500 et 2 000 mètres de profondeur et contient une eau d'une température variant en fonction de la profondeur de 55 °C à 85 °C. Le Dogger correspond à des dépôts anciens (- 175 à -154 millions d'année) à dominante calcaire du Jurassique moyen. L'eau contenue dans cet aquifère est largement minéralisée (6,5 à 35 g/l).

Doublet (géothermique) : Ensemble de deux forages associés, l'un étant dédié à la production du fluide géothermal, l'autre à la réinjection du fluide refroidi dans l'aquifère d'origine. Cette configuration présente plusieurs avantages : absence de rejets dans l'environnement (circuit en boucle fermée), pérennité du débit hydraulique, stabilité des pressions d'exploitation.

Drill Collar : Masse tige, tige de forte épaisseur placée au-dessus de l'outil pour encaisser les efforts de compression.

Drill Pipe Tige de forage

Drill rig Machine de forage

DV : Diverting Valve : Dispositif à fenêtre coulissante permettant de réaliser la cimentation d'un tubage en plusieurs passes (étages) pour limiter la pression hydraulique de mise en oeuvre. On dit aussi Differential Valve.

Échangeur de chaleur : Équipement permettant à un fluide chaud de céder sa chaleur à un fluide plus froid. Dans une pompe à chaleur, il existe deux types d'échangeur de chaleur : le condenseur et l'évaporateur.

Essais de production : Après la réalisation d'un forage, les pompages d'essais consistent en une série de tests et mesures ayant pour objectifs : de vérifier la capacité de production du forage (débit), d'évaluer l'influence du futur prélèvement sur les ouvrages voisins (rayon d'influence).

Garniture de forage : La garniture de forage c'est l'ensemble des tubulaires introduites dans le puits pour assurer un avancement de sondage, dont Les principaux objectifs sont :

- Transmettre le mouvement vers l'outil de forage.
- Appliquer un poids suffisant sur l'outil
- Mesurer la profondeur exacte du puits
- Conduire les fluides du forage du surface jusqu'à l'outil
- Réaliser les opérations liées au forage (cimentation, DST, LOGGING, perforation...).

L'unité de forage est composée d'un derrick et d'une garniture de forage (drill stem). La garniture de forage comprend les tiges de forage (DP drill pipes) et une partie inférieure appelée BHA (Bottom Hole Assembly). La BHA comprend les masses tiges (drill collar), les stabilisateurs, le moteur de fond, éventuellement un système de mesures (MWD measurement while drilling), une coulisse de battage, un absorbeur de chocs. Sous la BHA se trouve l'outil de forage proprement dit (trépan, tricône, etc.) qui sert de source sismique lors du forage.

Inhibiteur de corrosion : En traitement des eaux, désigne des produits chimiques ajoutés à l'eau qui empêchent son action corrosive sur les conduites métalliques par formation d'une pellicule protectrice sur le métal.

Niveau piézométrique : Niveau libre de l'eau observé dans un puits ou forage rapporté à un niveau de référence (repère, sol...) ; l'altitude de ce niveau est la cote piézométrique donnée par rapport au nivellement général de la France (NGF). En forage profond (géothermie), ce niveau dépend de la masse volumique, elle-même influencée par la température et la salinité de l'eau.

Perméabilité : Aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide.

Porosité : Caractéristique intrinsèque des terrains ; elle est égale au rapport du volume des vides sur le volume total de la roche, et s'exprime en pourcentage. La porosité totale d'une roche est très variable : de 1 à 50%. Plus la roche est poreuse, plus elle contiendra de l'eau. On distingue la porosité de matrice (ou d'interstice) de la porosité de fissure. Ne pas confondre porosité et perméabilité : dans une roche poreuse, si les « vides » du terrain ne sont pas interconnectés, l'eau ne pourra pas circuler. Dans ce cas, la perméabilité est faible malgré une forte porosité.

Quadruplet (géothermique) : Deux doublets géothermiques fonctionnant via une même boucle géothermale (autorisation environnementale unique).

Réseau de chaleur : Un réseau de chaleur encore appelé réseau de chauffage urbain est un ensemble de canalisations qui empruntent, en général, le sous-sol des voies publiques pour distribuer de la chaleur en milieu urbain. La chaleur est transportée, soit sous forme d'eau chaude, soit sous forme de vapeur d'eau. Les utilisateurs se raccordent au réseau pour prélever, grâce à un échangeur, une partie de cette chaleur, puis ils la distribuent dans leurs locaux. La production de chaleur pour le réseau se fait dans des centrales importantes qui utilisent de multiples énergies telles que le fioul lourd, le charbon, le gaz, la géothermie ou la chaleur provenant de l'incinération des ordures ménagères. Il existe également des réseaux de froid qui distribuent de l'eau glacée destinée au rafraîchissement des locaux.

Rotary : Le « rotary » est une méthode de forage par rotation et broyage de la roche.

Sabot : Le sabot (ou tubage de fond ou poubelle) se trouve à la terminaison du tubage de production ou des crépines. Il est censé créer une zone morte du point de vue de la circulation en cas de pompage ou d'injection. Il permet la sédimentation de particules, et la mise à l'écart de la circulation des objets qui tomberaient malencontreusement dans la colonne.

Side Track : Reprise en déviation d'un forage

Temps de percée thermique : Le temps de percée correspond à l'instant où la température des eaux pompées au puits de production est impactée par la température plus basse des eaux réinjectées dans le puits d'injection.

Transmissivité : Paramètre qui régit le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de l'aquifère, sous l'effet du gradient hydraulique ; elle dépend de l'épaisseur de l'aquifère et de sa perméabilité. La transmissivité permet d'évaluer le débit que peut capter un forage.

Tube guide ou cuvelage : Le tube guide est généralement nécessaire et peut être défini comme le tube qui isole tout le puits des terrains encaissants et qui durant les opérations contient le fluide de forage.

Tubage intermédiaire : Le tubage intermédiaire est facultatif et peut être défini comme le tubage installé dans un puits après l'installation et à l'intérieur du tubage de surface et dans lequel les opérations de forage ultérieures peuvent être effectuées à l'intérieur du puits.

Tubage de production : Le tubage de production isole l'encaissant du système d'exploitation (pompe et tiges). Ce tubage est cimenté dans l'encaissant, du moins dans la partie basse du forage si un tubage intermédiaire est utilisé.

Zone non saturée : Zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface d'une nappe libre.

Zone saturée : Zone du sous-sol dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices des roches, formant, dans un aquifère, une nappe d'eau souterraine.

ZNIEFF : Zones d'Intérêt Ecologique, Floristique et Faunistique.

Annexe 1 – Étude complémentaire de faisabilité d'un réseau de distribution de chaleur à base de géothermie sur la commune de Noisy-le-Grand depuis le réseau de chaleur de Bry-Villiers à créer



Pôle Territoires

Rapport technique

08/10/2024

Étude complémentaire de faisabilité d'un réseau de distribution de chaleur à base de géothermie sur la commune de Noisy-le-Grand depuis le réseau de chaleur de Bry-Villiers à créer



SIPPAREC
ÉNERGIES ET NUMÉRIQUE

SOMMAIRE

1	SYNTHÈSE DU DOCUMENT	4
1.1	SYNTHÈSE TECHNIQUE DU PROJET ENVISAGÉ.....	5
1.2	SYNTHÈSE FINANCIÈRE DU PROJET ENVISAGÉ	6
2	RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX RELATIFS À L'ÉTUDE	8
2.1	PRÉSENTATION DU COMITÉ DE SUIVI	8
2.2	LES INTERVENANTS OPÉRATIONNELS DE L'ÉTUDE	9
2.2.1	Maître d'Ouvrage	9
2.2.2	Assistant à Maîtrise d'ouvrage.....	9
2.2.3	Assistant à Maîtrise d'ouvrage sous-sol	10
2.3	MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE	10
3	RECENSEMENT PATRIMONIAL	11
3.1	MÉTHODE	11
3.2	CARTE DES BESOINS EN CHALEUR COLLECTIVE	12
3.2.1	Périmètre d'étude	12
4	POTENTIEL DES SOURCES D'ENR&R DU TERRITOIRE	14
5	ÉTUDE DE FAISABILITÉ DU RÉSEAU DE CHALEUR	15
5.1	POTENTIELS ABONNÉS AU RÉSEAU	15
5.1.1	Abonnés potentiels et besoins énergétiques	15
5.1.2	Puissance appelée et puissance souscrite	17
5.1.3	Sous stations à raccorder au réseau	18
5.2	TRACÉ DU RÉSEAU DE CHALEUR	19
5.2.1	Tracés du réseau	19
5.3	PRODUCTION DE CHALEUR	26
5.3.1	À partir de la ressource géothermale	26
5.4	BILAN ÉNERGÉTIQUE DE DISTRIBUTION	30
5.4.1	Scénario 1	30
5.4.2	Scénario 2	32
5.4.3	Sensibilité Scénario 2	33
5.5	BILAN ENVIRONNEMENTAL DU PROJET	34
6	ETUDE ECONOMIQUE DU RÉSEAU DE CHALEUR	35
6.1	PRIX DE CHALEUR CIBLE	35
6.2	INVESTISSEMENTS DE PREMIER ÉTABLISSEMENT	36
6.2.1	Investissement moyen de production EnR&R	36
6.2.2	Appoint et secours	37
6.2.3	Réseau de chaleur et postes de livraison	37

6.2.4	Total des investissements	38
6.3	COÛTS D'EXPLOITATION.....	38
6.3.1	Durée du projet	38
6.3.2	Charges énergies primaires P1	38
6.3.3	Charges de conduite et d'entretien courant P2	39
6.3.4	Charges de gros entretien et de renouvellement P3	40
6.4	MÉCANISMES DE FINANCEMENT MOBILISABLES.....	41
6.4.1	Le Fonds chaleur	41
6.4.2	Estimation du montant des aides au projet	42
6.5	SYNTHÈSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE	43
7	GOVERNANCE DU PROJET	44
7.1	CHOIX DE GOUVERNANCE	44
8	CONCLUSIONS.....	44
9	ANNEXES	45
10	GLOSSAIRE.....	45

1 SYNTHÈSE DU DOCUMENT

À la fin de l'année 2022, les villes de Bry-sur-Marne et Villiers-sur-Marne ont sollicité le SIPPEREC pour réaliser une étude de faisabilité concernant la création d'un réseau de chaleur alimenté par des énergies renouvelables, afin d'offrir aux communes une solution de chauffage locale, durable et à un tarif compétitif. En 2023, le périmètre de cette étude a ensuite été élargi par l'ajout de l'ouest de la commune de Noisy-le-Grand.

Les résultats de l'étude de faisabilité élargie à l'ouest de Noisy-le-Grand ont été présentés aux communes lors du Comité de Pilotage du 14/12/2023. À l'issue de cette restitution, c'est le scénario « Bry-Villiers + 28 GWh Noisy » qui a été retenu par le SIPPEREC et les collectivités.

Le présent rapport a pour objet de présenter un complément de la précédente étude de faisabilité à partir du scénario retenu, avec cette fois-ci comme périmètre d'étude l'ensemble du territoire des trois communes de Bry-sur-Marne, Villiers-sur-Marne et Noisy-le-Grand.

1.1 SYNTHÈSE TECHNIQUE DU PROJET ENVISAGÉ

Opération de **création d'un réseau de chaleur urbain sur les communes de Bry-sur-Marne, Villiers-sur-Marne et Noisy-le-Grand alimentées par deux doublets géothermiques sur Dogger.**

2030	Indicateur	Données	
Scénario		1	2
Besoins thermiques	DJU	2 300	
	Besoins de chauffage recensés	118 GWh/an	124 GWh/an
	Besoins en ECS recensés	24 GWh/an	25 GWh/an
	TOTAL des besoins recensés	142 GWh/an	149 GWh/an

	Indicateur	Données	
Global	Production annuelle	151 758 MWh/an	160 202 MWh/an
	Poids carbone production annuelle	6 107 tCO ₂ /an	7 199 tCO ₂ /an
	Taux de couverture EnR&R	76%	74%
	Tonnes de CO ₂ évitées par an (en ACV)	25 586 tCO ₂ /an	26 258 tCO ₂ /an
Géothermie	Puissance Géo+PAC	33 MW	33MW
	COP annuel moyen	4,4	4,4
	Consommation électrique	9 947 MWh /an	10 364 MWh /an
	Production de chaleur	118 073 MWh/an	121 382 MWh/an
	Poids carbone production géothermie (en ACV)	786 tCO ₂ /an	819 tCO ₂ /an
Appoint	Type d'énergie	☒ Gaz cond. ☐ Elec ☐ Autres ☐ Fioul	☒ Gaz cond. ☐ Elec ☐ Autres ☐ Fioul
	Puissance	72 MW	76 MW
	Rendement chaudière(s)	101%	101%
	Consommation de combustible	26 047 MWh PCS/an	31 230 MWh PCS/an
	Production de chaleur	23 739 MWh/an	28 457 MWh/an

	Poids carbone production gaz (en ACV)	5 321 tCO ₂ /an	6 380 tCO ₂ /an
Réseau(x)	Longueur du réseau de chaleur	29 154 mètres linéaires	33 360 mètres linéaires
	Rendement de distribution moyen	94%	93%
	Quantité de chaleur vendue en sous-station	142 203 MWh/an	136 068 MWh/an
	Densité globale du réseau	4,9 MWh/mètre linéaire	4,5 MWh/mètre linéaire
	Densité globale EnR&R	4,0 MWh/mètre linéaire	3,6 MWh/mètre linéaire
Sous-stations	Nombre de sous-stations	169	193
	Puissance installée en sous-station	97 593 kW	103 637 kW
	Nombre équiv.-logements raccordés	≈ 14 200	≈ 13 600

1.2 SYNTHÈSE FINANCIÈRE DU PROJET ENVISAGÉ

Bilan des investissements prévisionnels :

Investissements prévisionnels (k€ HT)	Scénario 1	Scénario 2
Centrale géothermie	44 716	44 716
Chaudière appoint et secours	1 494	1 912
Réseau et sous-stations	51 806	59 262
Foncier	2 000	2 000
TOTAL	100 116	107 890

Bilan des coûts d'exploitation prévisionnels (à partir de 2031) :

Postes de charge d'exploitation (k€ HT/an)	Scénario 1	Scénario 2
P1 - Coût achat électricité et appoint (gaz naturel, fioul, électricité...)	3 748	4 137
P2 - Coût des prestations de conduite, de l'entretien, montant des redevances et frais divers de la production (charges salariales comprises)	2 101	2 198

Postes de charge d'exploitation (k€ HT/an)	Scénario 1	Scénario 2
P3 - Provision pour renouvellement des installations de production	511	548
TOTAL	6 360	6 883

Bilan des aides nécessaires pour le projet :

Détermination de l'aide nécessaire	Scénario 1	Scénario 2
Aide totale déterminée (k€HT)	39 408	42 391
Taux de subventions par rapport à l'investissement <u>total</u>	39%	39%
Intensité de la subvention (€HT/MWhEnR sur 20 ans)	19	19

Prix de la chaleur payée par l'abonné :

Le prix de la chaleur payée par l'abonné est de 5% inférieur au prix défini pour la solution de référence.

	Solution référence gaz collectif	Scénario 1	Scénario 2
Prix de la chaleur HT	108 €HT/MWh	92 €HT/MWh	99€HTC/MWh
Prix de la chaleur TTC	130 €TTC/MWh	97 €TTC/MWh	99 €TTC/MWh

Plan de financement attendu :

(k€ HT)	Scénario 1	Scénario 2
Ademe	39 408	42 391
Frais/Droits de raccordement	0	0
Reste à financer (emprunts, etc.)	58 706	63 497
TOTAL	98 144	105 888

2 RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX RELATIFS À L'ÉTUDE

2.1 PRÉSENTATION DU COMITÉ DE SUIVI

L'élaboration de cette étude de faisabilité s'est faite dans la concertation de l'ensemble des acteurs.

Le Maître d'Ouvrage du projet est le SIPPEREC représenté par :

- Grégoire FOURCADE, Directeur Général Adjoint Développement
- Yves KERSUZAN, Responsable Chaleur renouvelable
- Arthur PREVOST, Ingénieur Réseaux de chaleur et géothermie.

Les villes de Bry-sur-Marne, Villiers-sur-Marne et Noisy-le-Grand sont représentées par :

Bry-sur-Marne

- Ida JARNLAND, Directrice des Services Techniques
- Julien ROBIN, Responsable fluide
- Pierre LECLERC, Adjoint au maire délégué à la transition écologique

Villiers-sur-Marne

- Jérémy PIGAULT, Directeur des Services Techniques
- Daria MARIANI, Directrice de projets
- Simon BILLEAUD, Chargé de projets Grand-Paris
- Jean-Philippe BEGAT, Adjoint au maire délégué à la transition écologique

Noisy-le-Grand

- Vanélia LINDOR, Responsable Énergie et fluides
- Laurent VIGNEL, Directeur des Services Techniques
- Johan CATOUIILLARD, Directeur Général Adjoint patrimoine bâti

2.2 LES INTERVENANTS OPÉRATIONNELS DE L'ÉTUDE

2.2.1 Maître d'Ouvrage

Le Maître d'Ouvrage de l'étude est le Sipperec, Syndicat intercommunal de la Périphérie de Paris pour les Énergies et les Réseaux de Communication. Il s'agit d'un syndicat mixte auquel les collectivités transfèrent leurs compétences « à la carte ».

Coordonnées :

SIPPEREC
 Tour Lyon Bercy - 173-175 rue de Bercy - CS 10205
 75588 PARIS Cedex 12
 Tel. 01 70 60 90 52
<http://www.sipperec.fr>

Les interlocuteurs sont les suivants :

Arnaud BRUNEL	Directeur Général	abrunel@sipperec.fr
Grégoire FOURCADE	Directeur Général Adjoint Développement	gfourcade@sipperec.fr
Yves KERSUZAN	Responsable chaleur renouvelable	ykersuzan@sipperec.fr
Arthur PREVOST	Ingénieur réseaux de chaleur et géothermie	aprevost@sipperec.fr

2.2.2 Assistant à Maîtrise d'ouvrage

La mission d'Assistance à Maîtrise d'Ouvrage pour la réalisation de l'étude de faisabilité de mise en place du réseau de chaleur est assurée par le bureau d'études Itherm Conseil.

Coordonnées :

ITHERM CONSEIL
 1 allée des Pierres Mayettes
 92230 GENNEVILLIERS
 Tél. : 01.41.11.97.89
www.ithermconseil.fr

Les interlocuteurs sont les suivants :

Pauline RAINE	Directrice Pôle Transition Énergétique des Territoires	praine@manergy.fr
Linda CALVARIN	Responsable d'Opérations	lcalvarin@manergy.fr
Camille PECHDIMALDJIAN	Chargée d'Affaires	cpechdimaldjan@manergy.fr

2.2.3 Assistant à Maîtrise d'ouvrage sous-sol

Pour la réalisation de cette étude nécessitant des compétences spécifiques en hydrogéologie, IThERMCONSEIL s'est adjoint les services du bureau d'étude sous-sol Antea Group.

Coordonnées :

ANTEA GROUP
 2-6 place du Général de Gaulle
 92160 ANTONY
 Tél. : 01.57.63.14.00
<http://www.anteagroup.fr>

Les interlocuteurs sont les suivants :

Nicolas FRECHIN	Ingénieur expert en Energie et Géothermie	nicolas.frechin@anteagroup.com
Clément CRAYSSAC	Ingénieur d'études	clement.crayssac@anteagroup.com
Margaux SAVARY	Ingénieure Géothermie	margaux.savary@ anteagroup.com

2.3 MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

Le complément d'étude a été opéré de la même manière que l'étude de faisabilité.

3 RECENSEMENT PATRIMONIAL

3.1 MÉTHODE

Cette phase a pour objectif de recenser l'ensemble des besoins énergétiques (thermiques) à l'échelle du périmètre de l'étude.

Le recensement consiste à identifier les installations ayant des besoins de chaleur (chauffage et eau chaude sanitaire principalement, et éventuellement besoins process) compatibles avec le raccordement à un réseau, c'est-à-dire disposant de réseaux intérieurs de distribution hydraulique et une installation collective de production.

La répartition géographique du patrimoine bâti (patrimoine public et privé), les principales données énergétiques et typologiques ont été répertoriées.

Communes de Bry et Villiers-sur-Marne

Dans le cadre du complément d'étude, le recensement du patrimoine de ces communes n'a pas évolué par rapport à l'étude de faisabilité initiale.

Commune de Noisy-le-Grand

Pour déterminer les consommations actuelles du patrimoine existant sur l'ensemble de la commune de Noisy-le-Grand, nous avons appliqué la même méthode que celle dans l'étude de faisabilité initiale.

3.2 CARTE DES BESOINS EN CHALEUR COLLECTIVE

3.2.1 Périmètre d'étude

La carte de chaleur ainsi présentée met en évidence les densités de chaleur du territoire des trois communes à horizon 2030. Elle permet d'identifier des zones à forte densité de besoin en chaleur collective pour lesquelles un raccordement à un réseau de chaleur urbain peut être étudié.

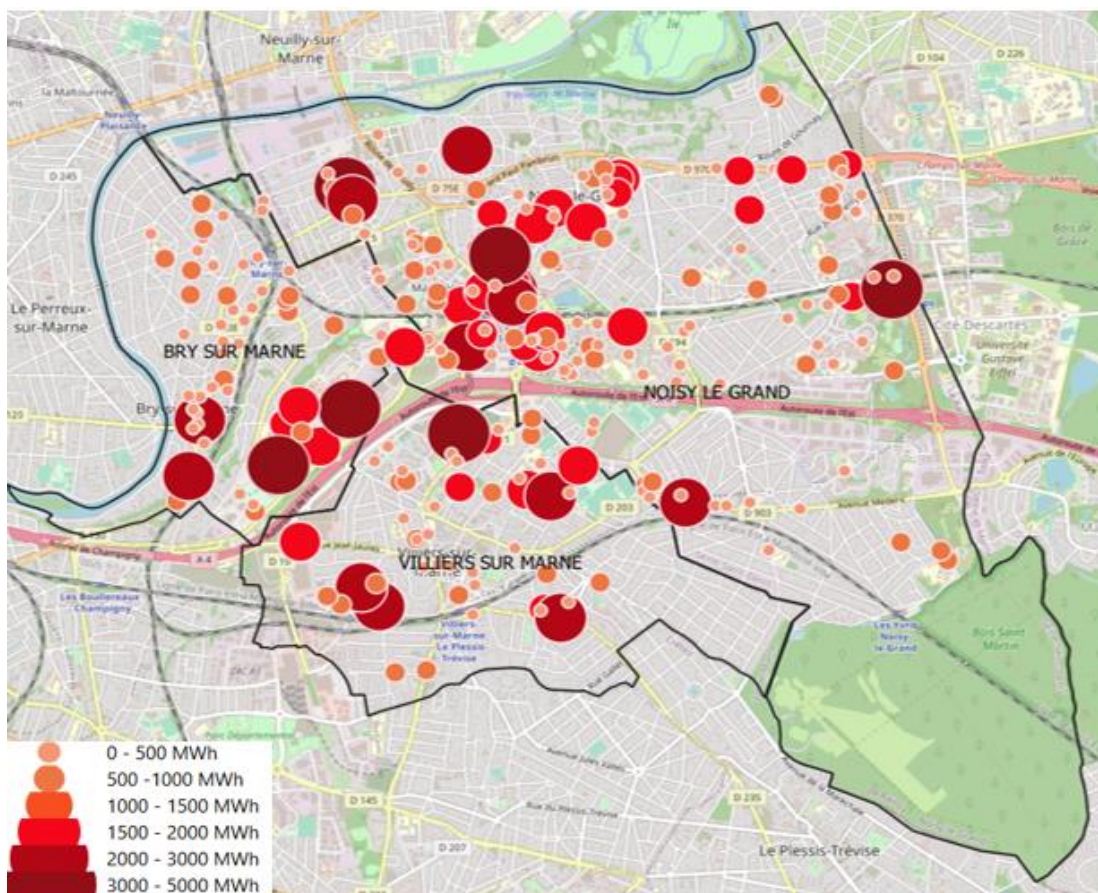


Figure 1 - Carte de chaleur du territoire

L'objectif a été de compléter davantage la carte de chaleur précédemment établie dans l'étude de faisabilité grâce à la transmission de données spécifiques à de nouveaux projets de constructions par les collectivités par exemple.

Sur l'ensemble du territoire de la commune de Noisy-le-Grand, c'est au total 132 prospects qui ont été retenus, pour des besoins de chaleur estimés 77 GWh en 2030.

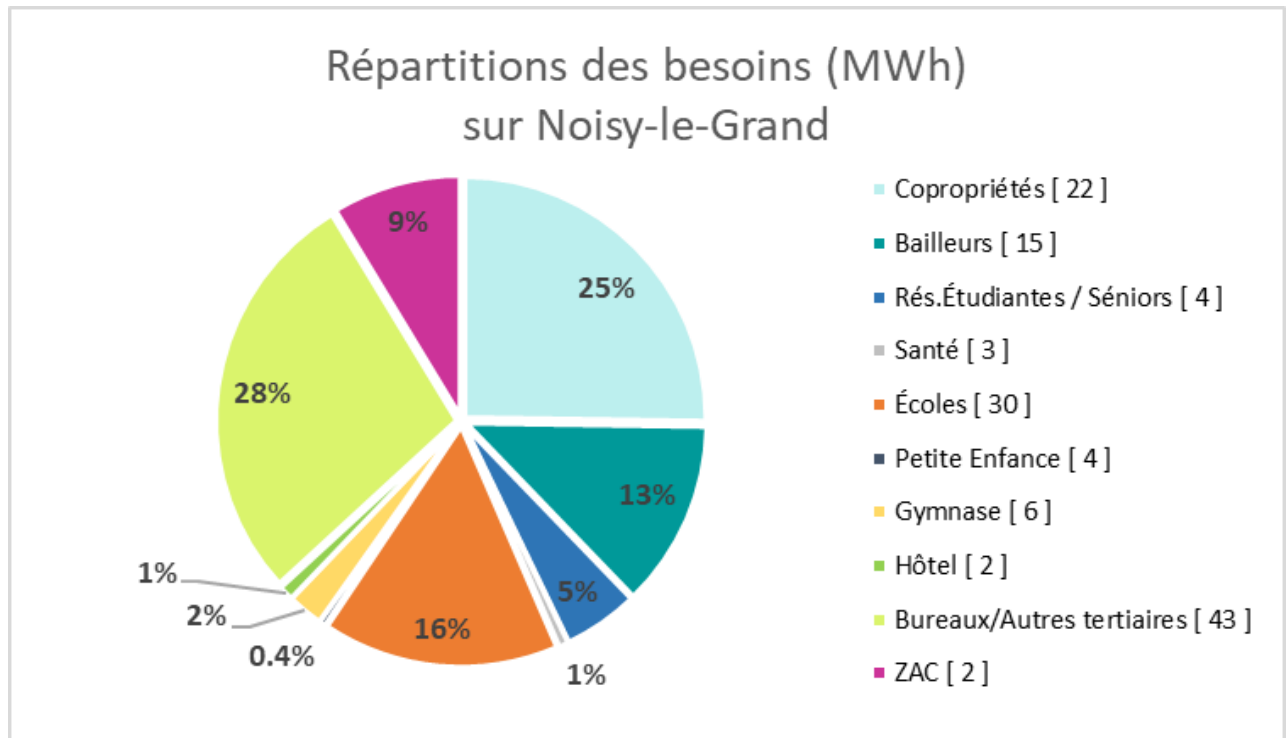


Figure 2 : Répartition des besoins issus de la prospection

La typologie des prospects retenus est majoritairement du tertiaire (48%), très présent sur Noisy-le-Grand, et de l'habitat (46%).

Le nombre indiqué à côté de chaque typologie correspond au nombre de site concernés.

Ce complément d'étude a ainsi permis d'identifier 101 sites supplémentaires sur la commune de Noisy-le-Grand, soit 57 GWh (en 2030).

4 POTENTIEL DES SOURCES D'ENR&R DU TERRITOIRE

Un état des lieux des ressources d'énergies renouvelables ou de récupération a déjà été réalisé sur le territoire des communes de Bry-sur-Marne, Villiers-sur-Marne et Noisy-le-Grand dans l'étude de faisabilité initiale. La synthèse des énergies renouvelables mobilisables y est présentée.

Une unique énergie est retenue pour l'alimentation du potentiel réseau de chaleur du territoire communal dans la suite de l'étude : la ressource géothermale au Dogger, en priorité dans le respect de la démarche EnR'Choix.

5 ÉTUDE DE FAISABILITÉ DU RÉSEAU DE CHALEUR

À partir de l'étude du potentiel EnR&R et des besoins de chaleur sur le territoire, deux scénarios à horizon 2030 ont été étudiés dans la présente étude :

- **Scénario 1** : La création de deux **doublets géothermiques au Dogger** pour desservir le réseau de chaleur à créer sur les communes de **Bry-sur-Marne, Villiers-sur-Marne et Noisy-le-Grand**.
 - Linéaire de réseau : **29 154 mètres linéaires** (en mètres de tranchée)
 - Besoins sur les **trois communes** : **142 203 MWh/an**
- **Scénario 2** : La création deux **doublets géothermiques au Dogger** pour desservir le réseau de chaleur à créer sur les communes de **Bry-sur-Marne, Villiers-sur-Marne et Noisy-le-Grand**.
 - Linéaire de réseau : **33 360 mètres linéaires** (en mètres de tranchée)
 - Besoins sur les **trois communes** : **149 264 MWh/an**

5.1 POTENTIELS ABONNÉS AU RÉSEAU

5.1.1 Abonnés potentiels et besoins énergétiques

La liste des abonnés potentiels du futur réseau de chaleur à créer ainsi que leurs consommations sont indiquées par scénario dans les **Annexes 1 et 2**.

Les tableaux en annexes présentent les besoins en chaleur collective de ces bâtiments, déterminés pour une rigueur climatique standard de 2 300 DJU.

Afin de faciliter la lecture des besoins énergétiques à horizon 2030, il en est proposé ci-dessous une synthèse par typologie d'usager :

Typologie de maître d'ouvrage	Besoins (MWh/an) Scénario 1	Besoins (MWh/an) Scénario 2
Bailleur	36 552	36 552
Copropriété	39 053	40 499
Copropriété + Bailleur	75 606	77 052
Gymnase	845	1 358
Santé	8 830	9 177

Typologie de maître d'ouvrage	Besoins (MWh/an) Scénario 1	Besoins (MWh/an) Scénario 2
Piscine	1 672	1 672
Tertiaire	35 573	37 940
Petite enfance	396	396
École	9 057	11 446
ZAC	10 225	10 225
TOTAL	142 203	149 264

Tableau 3 - Répartition des consommations par typologie de maître d'ouvrage

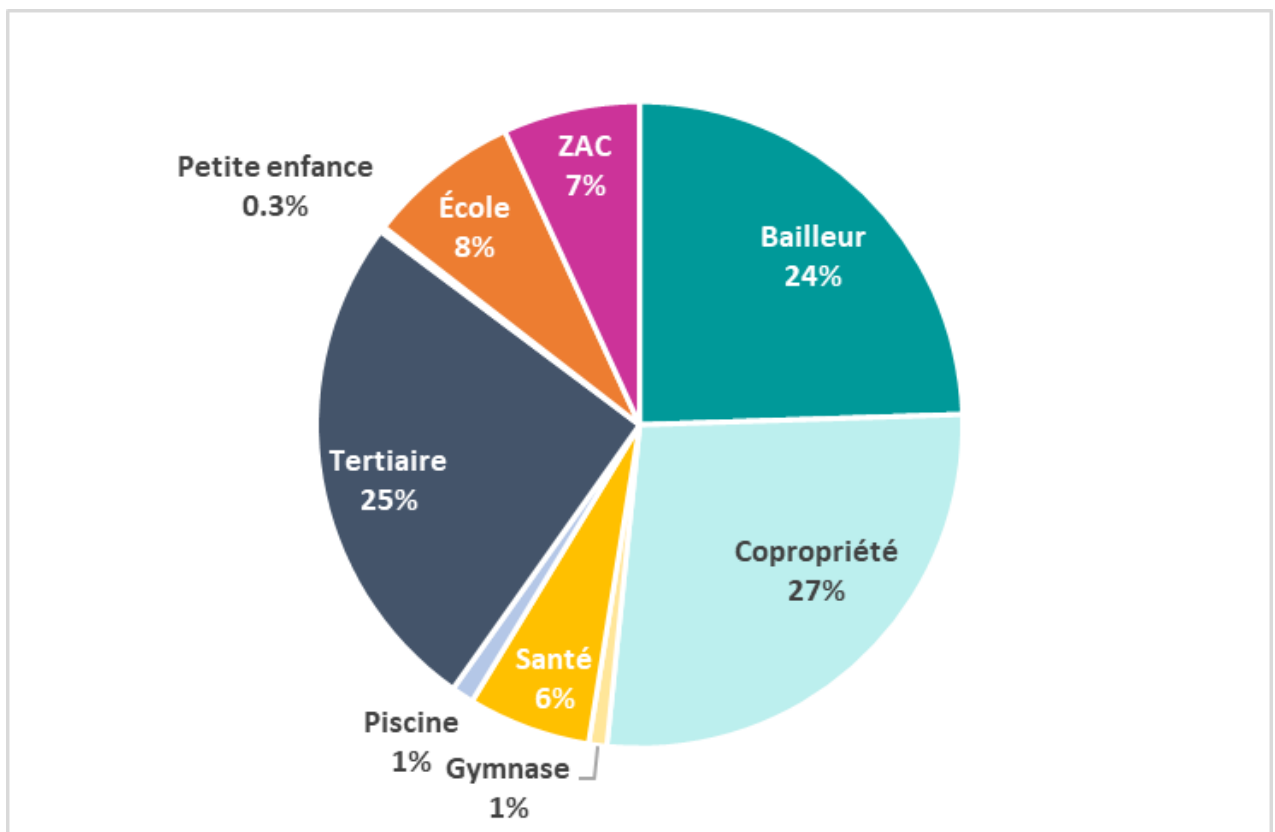


Figure 3 - Répartition des consommations par typologie de maître d'ouvrage - Scénario 1

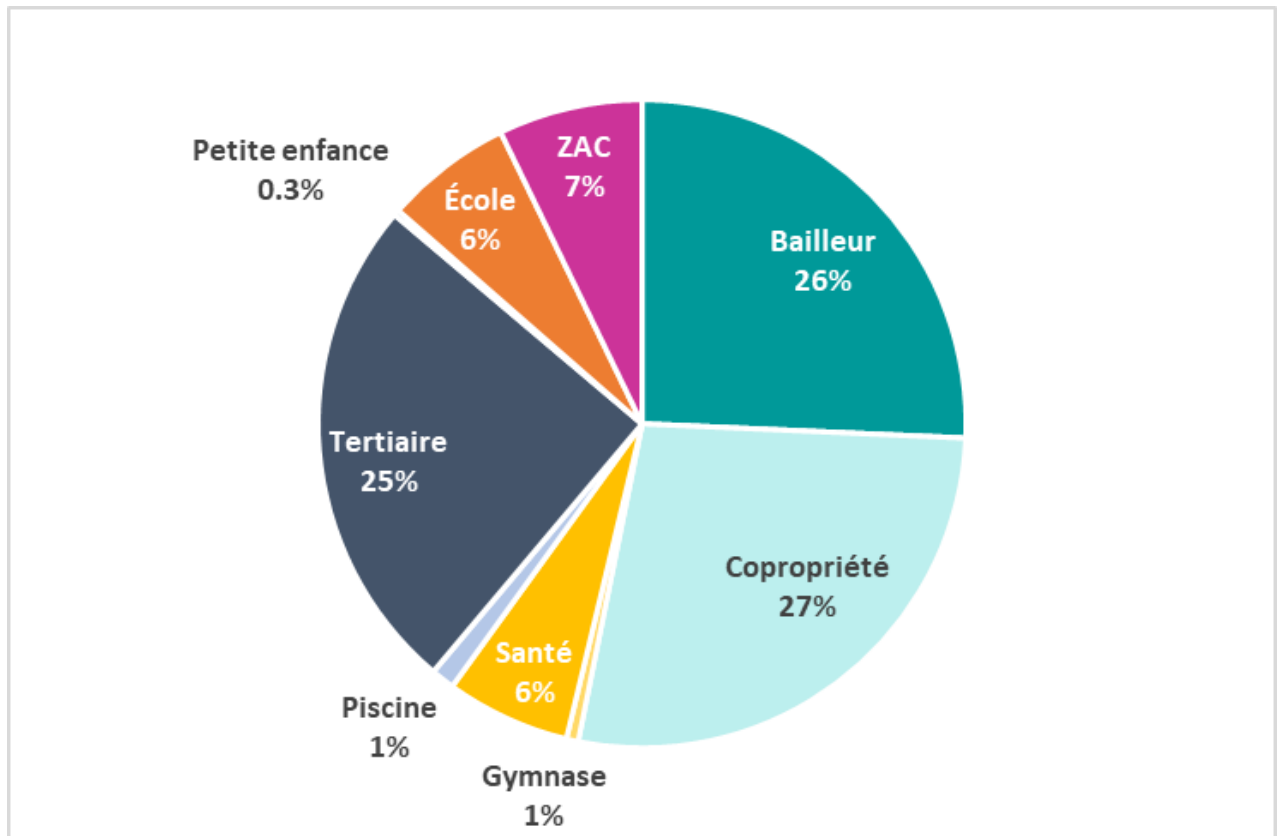


Figure 4 - Répartition des consommations par typologie de maître d'ouvrage - Scénario 2

5.1.2 Puissance appelée et puissance souscrite

Dans le cadre de l'étude, la puissance souscrite a été déterminée comme étant la somme de la puissance appelée pour le chauffage par -7°C et de la puissance appelée ECS correspondant à la consommation journalière lissée sur 8 heures, affectée d'un coefficient de surpuissance de 10%.

	Scénario 1	Scénario 2
Puissance appelée chauffage par -7°C (kW)	82 812	88 118
Puissance appelée ECS (kW)	5 908	6 097
Puissance appelée totale (kW)	88 721	94 215
Puissance souscrite (kW)	97 593	103 637

Ces puissances souscrites ne sont données qu'à titre indicatif, et les modalités de calculs seront définies contractuellement par le porteur du projet.

5.1.3 Sous stations à raccorder au réseau

5.1.3.1 Sous stations à créer

Le tableau suivant présente le nombre de sous stations du réseau de chaleur. Les bâtiments retenus pour un raccordement au réseau de chaleur correspondent aux bâtiments existants actuellement dotés d'une chaufferie collective et aux bâtiments à construire dont la date de livraison est postérieure à la date prévue de mise en service du réseau.

Typologie de maître d'ouvrage	Nombre de sites, Scénario 1	Nombre de sites, Scénario 2
Bailleur	36	36
Copropriété	35	40
Copropriété + Bailleur	71	76
Gymnase	5	7
Santé	6	7
Piscine	1	1
Tertiaire	54	63
Petite enfance	2	2
École	27	34
TOTAL	169	193

Tableau 4 – Nombre de sous-stations par type de maître d'ouvrage

Pour chacun des scénarios, le raccordement de la résidence des Hautes Noues (8 GWh) située à Villiers-sur-Marne a été envisagé en 2030.

5.2 TRACÉ DU RÉSEAU DE CHALEUR

5.2.1 Tracés du réseau

Ces tracés ont été abordés avec les services des trois communes et n'ont pas soulevé de points bloquants.

Les travaux construction des canalisations ne pouvant être réalisés en totalité sur une seule année, ils ont été répartis en trois périodes de travaux afin de limiter leur impact sur le quotidien des habitants. Ce phasage est hypothétique et pourra être adapté en fonction des contraintes spécifiques à chaque commune.

Le calendrier du projet envisage un début des travaux en 2027. En fixant une moyenne de 5 km de réseaux créés par an, nous obtenons ainsi le phasage suivant :

- Phase 1 : 2027,
- Phase 2 : 2028,
- Phase 3 : 2029.

5.2.1.1 Scénario 1

De manière à relier les abonnés au réseau de chaleur, le tracé projeté du réseau est présenté ci-dessous pour le scénario 1 de développement :

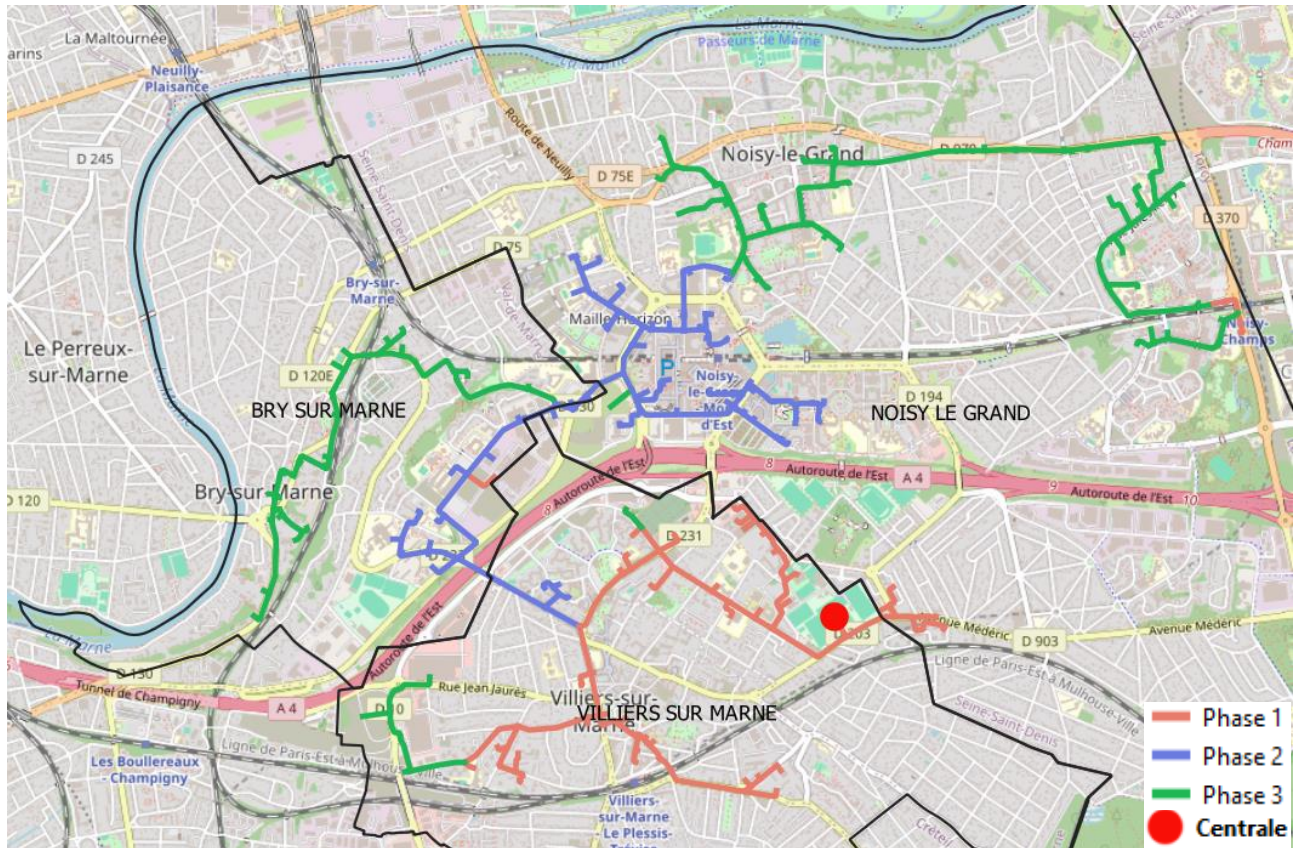


Figure 5 - Tracé prévisionnel du réseau de chaleur, scénario 1

Voici le détail pour chacune des phases :

Phase	Année	Longueur	Prospects	Besoins
1	2027	8 275 ml	40	35 GWh
2	2028	8 427 ml	57	41 GWh
3	2029	12 452 ml	72	66 GWh
Total	2030	29 154 ml	88	142 GWh

Pour rappel, le raccordement de la résidence des Hautes-Noues a été ajouté pour l'année 2030.

La densité énergétique globale de ce scénario est ainsi de **4,9 MWh/ml**. Elle est supérieure à la densité de l'étude initiale qui est de 4,5MWh/ml.

5.2.1.2 Scénario 2

De manière à relier les abonnés au réseau de chaleur, le tracé projeté du réseau est présenté ci-dessous pour le scénario 2 de développement :

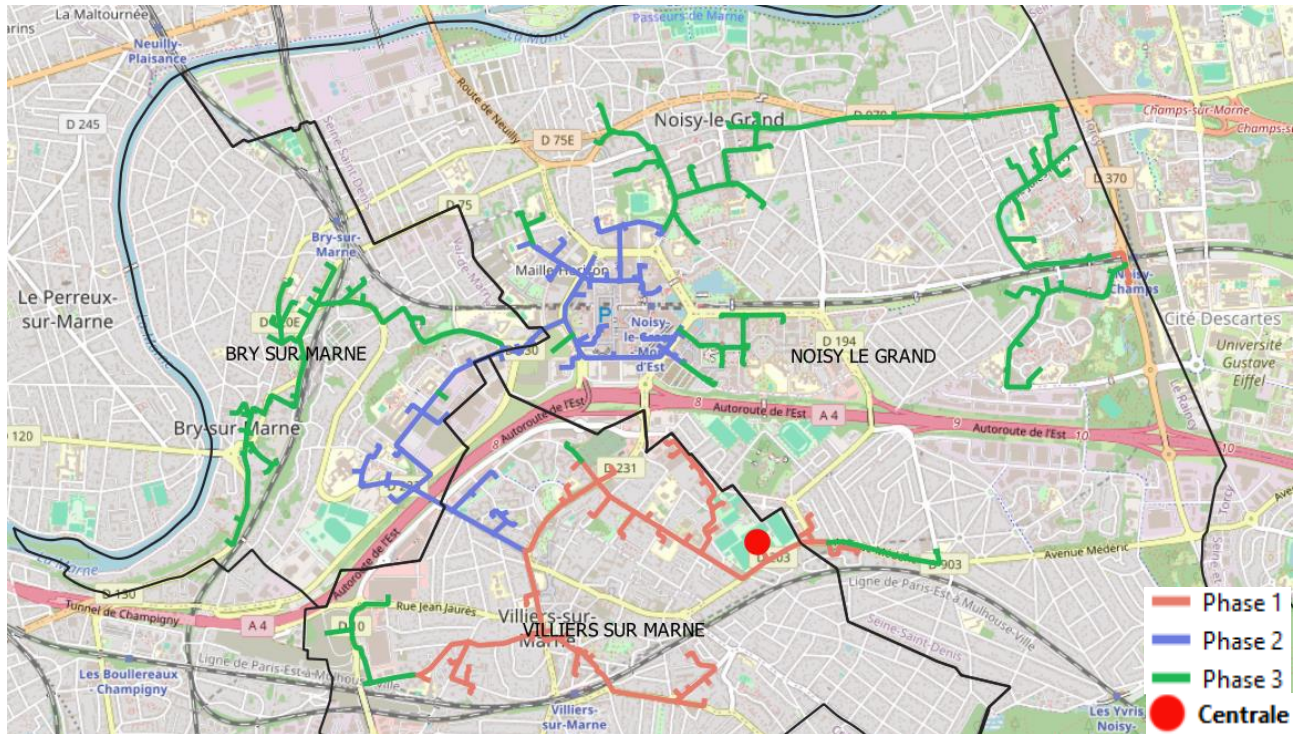


Figure 6 - Tracé prévisionnel du réseau de chaleur, scénario 2

Phase	Année	Longueur	Prospects	Besoins
1	2027	6 871 ml	35	26 GWh
2	2028	7 837 ml	44	43 GWh
3	2029	4 844 ml	28	11 GWh
Total	2030	19 552 ml	108	87 GWh

La densité énergétique globale de ce scénario est ainsi de 4,5 MWh/ml. Elle est suffisamment importante pour garantir la faisabilité du projet.

5.2.1.3 Les franchissements spécifiques

Suite au complément d'étude, de nouvelles contraintes géographiques ont été identifiées puis étudiées dans l'est de la commune de Noisy-le-Grand. Ces contraintes sont liées aux axes routiers et lignes ferroviaires traversant la commune.

5.2.1.3.1 Autoroute de l'est (A4)

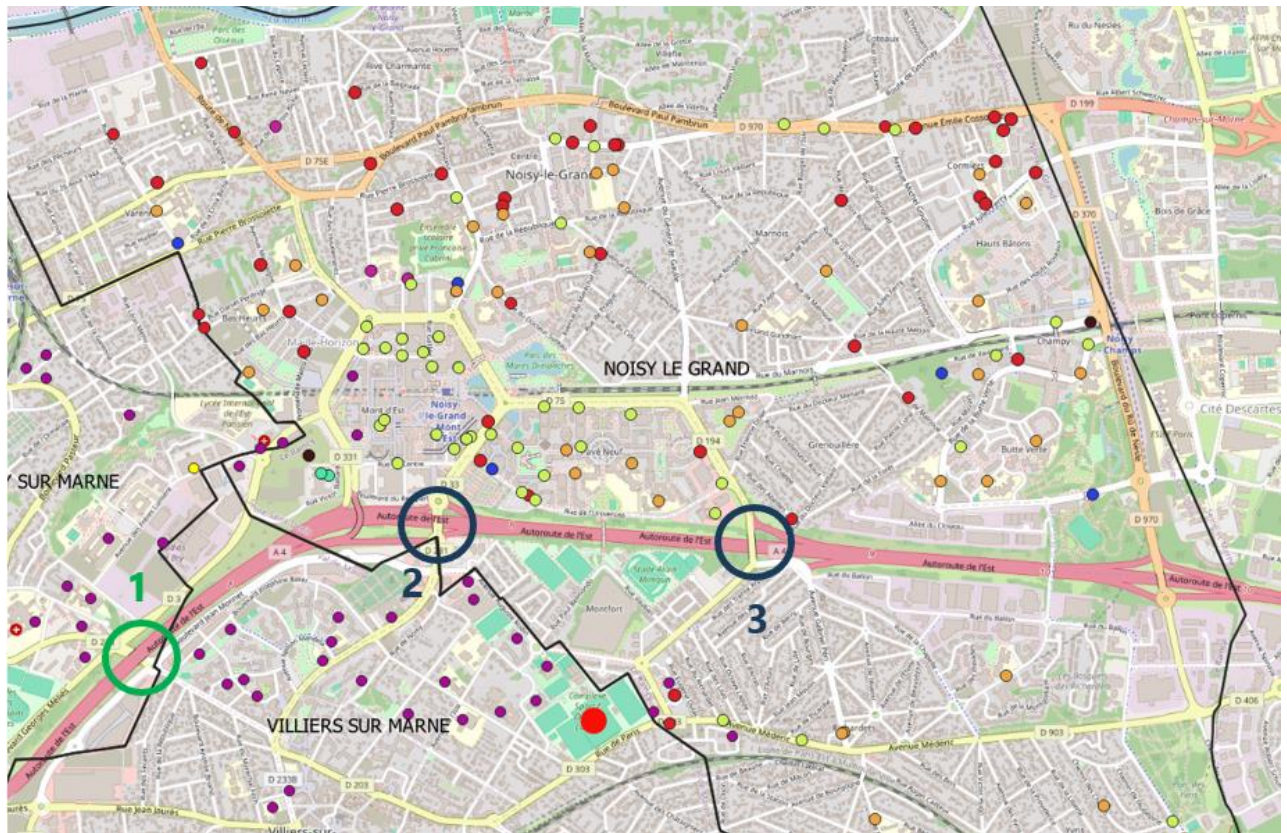


Figure 7 : Franchissements possibles de l'A4

Au total, trois possibilités de franchissement ont été identifiées. Voici leurs caractéristiques :

1. Départementale D3

- Départementale passant sous l'autoroute
- Axe double sens (2x2 voies)
- Largeurs des trottoirs : 5 m environ

2. Pont Départementale D33/Autoroute A4

- Axe double sens (2x2 voies)
- Circulation dense
- Entouré par deux ronds-points
- Largeur du trottoir : 2,4 m

3. Pont de la Départementale D194/Autoroute A4

- Axe double sens (2x2 voies)
- Circulation dense
- Faible densité de besoins de chaleur à proximité
- Largeur des trottoirs : 3m

En conclusion, seul le franchissement n°1 a été retenu comme franchissable pour le projet. Passant sous l'autoroute 4 avec une hauteur suffisante, ce franchissement avait déjà été retenu dans l'étude de faisabilité.

5.2.1.3.2 Voies ferrées du RER A

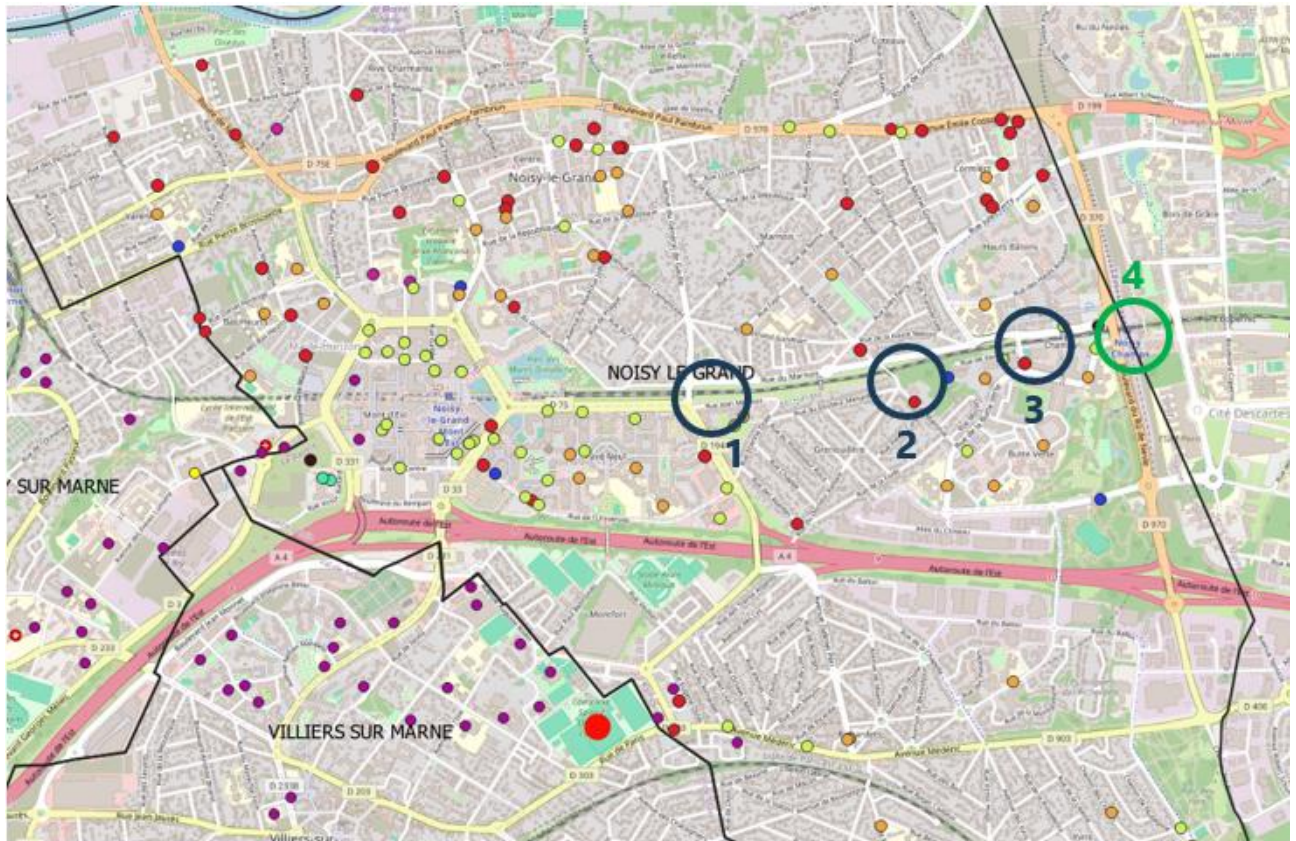


Figure 8 : Franchissement possibles au sud de Noisy-le-Grand, pour la ligne du RER A

Au total, quatre franchissements de la ligne du RER A ont été identifiés. Voici leurs caractéristiques :

1. Pont rue de Malnoue

- Pont entouré par deux ronds-points
- Axe double sens
- Largeur des trottoirs : 1,7m

2. Pont rue des Bâtons verts

- Pont situé à la sortie du pont
- Axe double sens
- Végétation environnante
- Largeur du trottoir : 5m

3. Pont promenade Michel Simon/ rue du Château

- Voie 100% piétonne
- Entrée de la gare « Noisy-Champs »
- Arrêts de bus situés à proximité
- Pont traversant un axe routier

4. Pont N370

- Axe double sens (4 voies)
- Travaux du Grand Paris en cours
- Circulation dense
- Centre Commercial du Champy à proximité
- Tablier du pont de type droit
- Largeur du trottoir : 2,4m

Les raisons pour lesquelles les franchissements n°1, 2 et 3 n'ont pas été jugés comme compatibles avec le projet sont d'ordre technique et administratif.

D'un point de vue technique, il existe différentes solutions permettant de franchir des axes routiers importants, fleuves ou voies ferrées :

- **Fonçage** : technique qui permet de s'affranchir d'obstacles sans réalisation de tranchée tout en évitant les autres réseaux souterrains

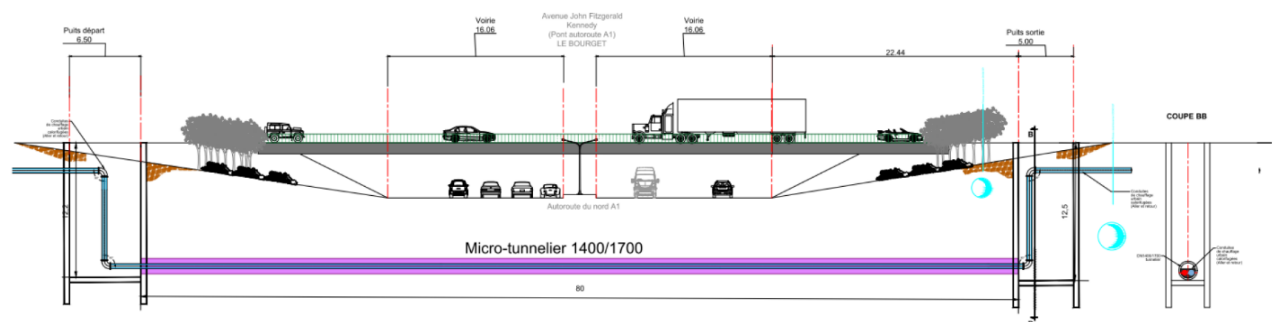


Figure 9 : franchissement par fonçage

- **Encorbellement** : construction en saillie par rapport à une paroi, reposant sur des corbeaux ou des consoles.



Figure 10 : Franchissement par encorbellement

Bien que réalisables, ces solutions restent onéreuses et auraient un impact direct sur le coût final de la chaleur. Pour ces raisons, ces solutions n'ont pas été retenues dans le cadre du complément d'étude.

D'un point de vue administratif, le nombre important d'autorisations à formuler auprès de différentes autorités cumulé aux délais de réponse peuvent retarder le calendrier global du projet. Ces autorités sont par exemple :

- **DIRIF** : Direction des routes d'Île-de-France. Impose fréquemment la reprise de l'étanchéité du pont (travaux onéreux) ;
- **SNCF** : instructions longues pour des résultats incertains
- **Ville de Noisy le Grand et Département** : selon l'impact des travaux sur la circulation et l'ancienneté de l'enrobé.

En conclusion, uniquement le franchissement n°4 a été retenu comme franchissable pour le projet. En effet, il se situe dans une zone où la densité thermique est plus importante que les 3 autres franchissements identifiés et par où le réseau passerait (dans le cas des deux scénarios de distribution étudiés).

Il reviendra au futur opérateur de réaliser une étude en vue d'arbitrer sur les meilleures solutions de franchissement possibles pour le projet de réseau de chaleur.

5.3 PRODUCTION DE CHALEUR

5.3.1 À partir de la ressource géothermale

5.3.1.1 Site de forage

La ressource au Dogger retenue permet de caractériser la disponibilité foncière nécessaire pour le projet étendu par rapport à l'étude initiale. Elle est réévaluée à :

Contraintes surfaciques pour le site de forage	
Surface en phase chantier	6 000 m ²
Surface pour maintenance lourde	2 000 m ²
Surface pour maintenance courante	800 m ²

Le site de forage précédemment identifié dans l'étude de faisabilité a été conservé dans ce complément d'étude. Il s'agit du terrain de football du Complexe Sportif Octave Lapize situé au sud-est de la commune de Villiers-sur-Marne.

Après échanges entre le SIPPEREC et la commune de Villiers-sur-Marne, les travaux de forage seront implantés sur une partie du terrain de foot Honneur du complexe sportif.

Pendant la durée des travaux, le terrain est déplacé de 20m vers le nord afin d'assurer la continuité de la pratique sportive sur le site. La centrale de géothermie sera située au sud de ce terrain.

La Ville a en effet donné son accord pour mettre à disposition ce terrain, à condition que celui-ci soit restitué dans son état actuel et que l'activité sportive à proximité ne soit pas interrompue durant la période des travaux de forage.

La figure ci-dessous présente la mise à jour de l'implantation de la plateforme de forage (ici, plateforme du foreur SMP) en phase de travaux de premier établissement :



Figure 11 - Implantation plateforme de forage au Dogger

La figure ci-dessous présente l'implantation de l'appareil de work-over SMP en phase exploitation, lors des travaux de maintenance lourde :



Figure 12 - Implantation appareil de work-over au Dogger

Dans le cadre des démarches liées à la parcelle, il restera à préciser les contours de la mise à disposition des terrains suivant les phases (chantier, exploitation, maintenance).

5.3.1.2 Boucle géothermale

La puissance thermique valorisable sur le réseau dépend essentiellement de deux paramètres :

- Le débit de la boucle géothermale ;
- La différence entre la température d'exhaure de la ressource géothermale et la température de réinjection.

Au droit de l'emplacement prévu pour le site de forage, les conditions de ressource permettent d'estimer les paramètres d'exploitation suivants :

Tableau 4 - Paramètres prévisionnels d'exploitation des aquifères ciblés

Débit maximal d'exploitation	2 x 320 m ³ /h
Température producteur, en tête de puits	69 °C

Cette température d'exhaure est une hypothèse fixe déterminée à partir de l'étude préliminaire de la ressource. L'opérateur retenu pourra être libre de mobiliser le débit maximal repris ci-dessus ou moins en fonction des optimisations technico-économiques possibles.

En revanche, la température de réinjection dépend de la température de retour du réseau de chaleur après alimentation des besoins : plus cette température retour est faible, plus la puissance valorisable est importante. Il est donc nécessaire d'optimiser le fonctionnement du réseau de chaleur de manière à ce que la température retour soit la plus basse possible (sans descendre sous les 28 °C pour ne pas réinjecter à moins de 30°C).

Comme indiqué précédemment, la température géothermale disponible en tête de puits s'élèverait à 69°C. Cette température est insuffisante et ne permet pas de couvrir les besoins en température nécessaires au chauffage et à l'ECS de bâtiments retenus dans chacun des scénarios présentés.

En outre, la puissance géothermale seule disponible ne permet pas de disposer d'une puissance suffisante pour couvrir les besoins à alimenter à plus de 65% d'EnR&R. Au vu de ces taux d'EnR&R et niveaux de température insuffisants, il est donc nécessaire de mettre en place des pompes à chaleur pour optimiser le fonctionnement de la géothermie.

5.3.1.3 Pompes à chaleur

Pour augmenter les performances d'une opération de géothermie, il est possible de lui adjoindre une pompe à chaleur (PAC).

Le choix a été fait de conserver le même montage que dans l'étude de faisabilité à savoir un montage en série.

Le choix définitif reviendra à l'opérateur du réseau de chaleur en phase d'optimisation suite à l'attribution.

5.3.1.4 Appoint/secours gaz

Les chaufferies existantes de prospects déjà identifiées ont été conservées pour réaliser une partie de cet appoint et secours au gaz. **Cette liste n'a pas été complétée suite à l'extension du périmètre dans le cadre du complément de l'étude.**

Voici la liste des chaufferies précédemment identifiées :

Site	Puissance MW
Logements	
Résidence Les Cottages	1,6
Résidence La Varenne	1,6
Résidence Les Morvrains	1,4
Résidence Les Rives	1,2
Résidence Bry Beau Parc	0,8
Résidence Les Hautes Noues	0,6
Tertiaire	
Studios Bry	10
INA	3,6
Hôpital St Camille	4,7
Hôpital privé MLV	0,9
Centre de rééducation	1,6
EHPAD Fondation Favier	1,6
EHPAD Le Colombier	0,9
Piscine l'Hippocampe	1,8
Puissance totale disponible	31,7 MW

La puissance nécessaire pour l'appoint-secours du réseau est de 72 à 76 MW selon le scénario de distribution envisagé. Près de 32 MW de délestage ont déjà été identifiés sur les communes de Bry et Villiers-sur-Marne.

Pour l'instant, il est donc nécessaire de créer une chaufferie gaz complémentaire de 40 à 44 MW pour assurer l'appoint secours du réseau par temps froid.

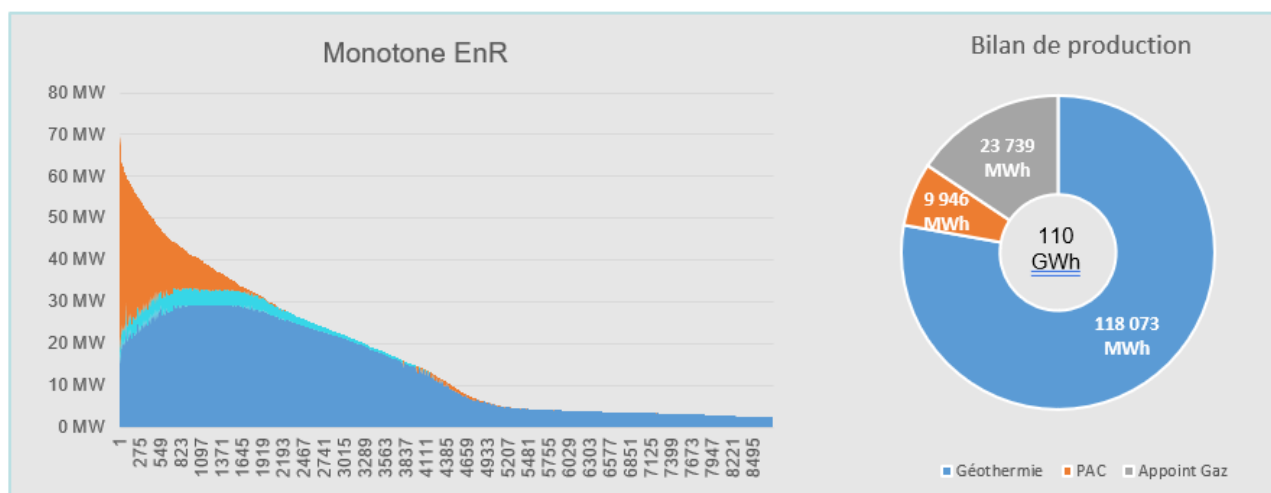
5.4 BILAN ÉNERGÉTIQUE DE DISTRIBUTION

5.4.1 Scénario 1

Les besoins annuels en chaleur estimés des futurs abonnés s'élèvent à 142 GWh/an en 2030, valeur suffisante à ce qui est, a priori, nécessaire pour financer des investissements de forage de deux doublets au Dogger à un prix de chaleur commercialisable (70 GWh/an/doublet).

Les courbes ci-dessous présentent les monotones des besoins du réseau de chaleur, après le déploiement complet du réseau de chaleur en 2030.

En régime établi du réseau de chaleur, soit après le raccordement de l'ensemble des prospects retenus et dans le cas où la production de chaleur est assurée par un doublet de géothermie au Dogger couplés à un système de pompes à chaleur en base et une chaufferie gaz en appoint/secours, les bilans énergétiques de production sont les suivants :



Ces courbes intègrent des pertes réseaux en moyenne de 7% de la chaleur produite, calculées en fonction des températures de fonctionnement prévues pour le réseau et de la longueur du réseau.

Considérant en outre que la géothermie est effectivement disponible 98% du temps, le bilan énergétique est le suivant :

<i>En MWh/an, sortie chaufferie</i>	Scénario 1	Mixité
Géothermie	118 073	78%
Électricité PAC	9 746	6%
Gaz	23 739	16%
TOTAL	151 558	100%

En régime établi, **le taux d'énergies renouvelables du réseau de chaleur serait de 76%, obtenus en considérant une disponibilité de la valorisation géothermale de 98% à l'année** permettant d'atteindre les objectifs environnementaux fixés dans le cadre du projet (supérieur à 65%).

Les données énergétiques sont :

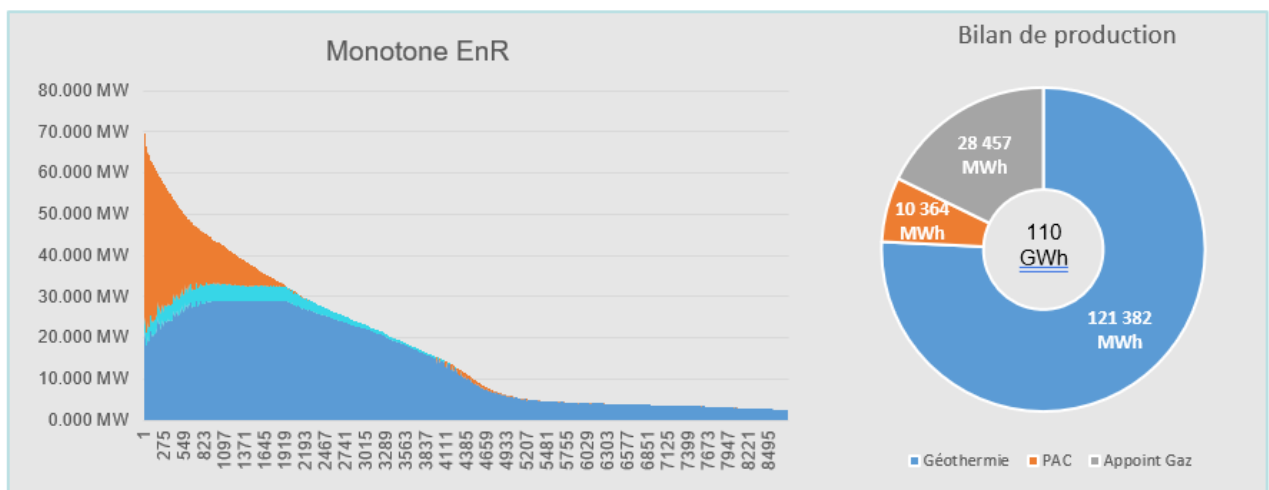
- Débit géo total : **2 x 320 m³/h**,
- Température de mélange : **70°C** (en tête de puits)
- Température de réinjection : **30°C** (en tête de puits)
- Puissance PAC chaud : **19 MW (COP=4,4)**
- Longueur du réseau : **29,2 km**
- Ventes : **142 GWh/an**
- Puissance maximale appelée en tête de réseau : **72 MW**
- Taux d'EnR&R : **76 %**
- Densité du réseau $\approx$ **4,9 MWh /ml (en 2030)**

5.4.2 Scénario 2

Les besoins annuels en chaleur estimés des futurs abonnés s'élèvent à 149 GWh/an en 2030, valeur suffisante à ce qui est nécessaire pour financer des investissements de forage de deux doublets au Dogger à un prix de chaleur commercialisable (70 GWh/an/doublet).

Les courbes ci-dessous présentent les monotones des besoins du réseau de chaleur, après le déploiement complet du réseau de chaleur en 2030.

En régime établi du réseau de chaleur, soit après le raccordement de l'ensemble des prospects retenus et dans le cas où la production de chaleur est assurée par deux doublets de géothermie au Dogger couplés à un système de pompes à chaleur en base et une chaufferie gaz en appoint/secours, les bilans énergétiques de production sont les suivants :



Ces courbes intègrent des pertes réseaux en moyenne de 7% de la chaleur produite, calculées en fonction des températures de fonctionnement prévues pour le réseau et de la longueur du réseau.

Considérant en outre que la géothermie est effectivement disponible 98% du temps, le bilan énergétique est le suivant :

En MWh/an, sortie chaufferie	Scénario 2	Mixité
Géothermie	121 382	76%
Électricité PAC	10 364	6%
Gaz	28 457	18%
TOTAL	160 202	100%

En régime établi, **le taux d'énergies renouvelables du réseau de chaleur serait de 74% obtenus en considérant une disponibilité de la valorisation géothermale de 98% à l'année** permettant d'atteindre les objectifs environnementaux fixés dans le cadre du projet (supérieur à 65%).

Les données énergétiques sont :

- Débit géo total : **2 x 320 m3/h**,
- Température de mélange : **70°C** (en tête de puits)
- Température de réinjection : **30°C** (en tête de puits)
- Puissance PAC chaud : **19 MW (COP=4,4)**
- Longueur du réseau : **33,4 km**
- Ventes : **149 GWh/an**
- Puissance maxi demandée : **76 MW**
- Taux d'EnR&R : **74 %**
- Densité du réseau $\approx$ **4,5 MWh /ml**

5.4.3 Sensibilité Scénario 2

Une sensibilité des caractéristiques géothermale a été réalisée sur le scénario 2, à partir des hypothèses suivantes (les autres caractéristiques et hypothèses du scénario 2 restent identiques) :

- 1 doublet de **350 m3/h** avec une température en tête de puits de **67,5°C**,
- 1 doublet de **370 m3/h** avec une température en tête de puits de **70,5°C**.

Après simulation énergétique, il en résulte :

- COP des PACs : **4,1**,
- Puissance PAC chaud : **23 MW**,
- Taux d'EnR&R : **77%**.

Une augmentation de la puissance des pompes à chaleur (PAC) permettrait une meilleure couverture de la géothermie en période hivernale, et donc un taux d'EnR&R plus élevé. Toutefois, un sur-débit accru des PAC, bien qu'il puisse capter davantage d'énergie renouvelable, risquerait d'entraîner un investissement disproportionné par rapport aux MWh vendus. Il est en effet crucial de considérer les surcoûts potentiels liés aux doublets géothermiques ainsi qu'à la centrale, notamment au niveau des PAC.

Dans le cadre de l'étude de faisabilité, nous avons retenu des hypothèses conservatrices afin d'évaluer et de garantir la faisabilité technico-économique du projet. C'est pourquoi l'analyse économique réalisée n'inclut pas cette sensibilité.

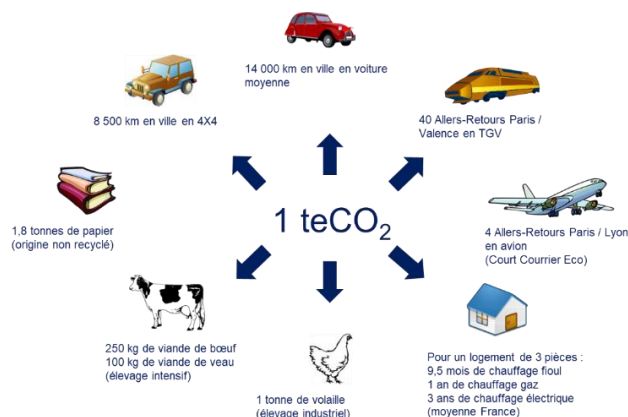
5.5 BILAN ENVIRONNEMENTAL DU PROJET

Le bilan environnemental du projet consiste à réaliser une estimation des tonnes de CO₂ équivalentes émises analyse des rejets de polluants et l'impact « climat » du projet. L'impact « climat » est l'analyse des gaz à effet de serre tel que défini par les protocoles de Kyoto (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆) mais également les gaz type CFC ou H₂O stratosphérique. Cet impact climat est classiquement exprimé en équivalent CO₂ (t éq CO₂).

Aux productions découlant du projet présenté précédemment, sont appliqués les facteurs d'émission sont issus de la base de données Bilan GES de l'Ademe :

Energie	Facteurs d'émission	Unité
Gaz	0,227	tCO ₂ /MWh PCS
Géothermie	0	tCO ₂ /MWh
Électricité	0,079	tCO ₂ /MWh

Afin d'avoir des ordres de grandeur de la tonne équivalent CO₂, le schéma ci-dessous reprend quelques ordres de grandeur standards :



L'analyse environnementale porte sur la durée de l'exploitation (soit 29 ans) du réseau de chaleur et permet ainsi d'analyser les « coûts » environnementaux globaux.

Le **scénario 1** permet une économie de **741 994 tonnes de CO₂** sur 29 années de contrat.

En tCO ₂ /an en 2030	Référence gaz collectif	Scénario 1
Gaz	31 693	5 321
Géothermie	-	0
Électricité	-	786
Total	31 693	6 107
TOTAL sur 29 ans	919 097	177 103

Le **scénario 2** permet une économie de **761 482 tonnes de CO₂** sur 29 années de contrat.

<i>En tCO₂/an en 2030</i>	Référence gaz collectif	Scénario 2
Gaz	33 457	6 380
Géothermie	-	0
Électricité	-	819
Total	33 457	7 199
TOTAL sur 29 ans	970 253	208 771

6 ETUDE ECONOMIQUE DU RÉSEAU DE CHALEUR

6.1 PRIX DE CHALEUR CIBLE

Le prix cible a été déterminé pour l'ensemble des abonnés potentiels (copropriétés, bailleurs, patrimoines des collectivités, ...). Ce raisonnement détermine une moyenne à atteindre au global du réseau à créer.

Le prix cible a été déterminé de la manière suivante :

- Détermination du prix de référence pour un bâtiment de 70 logements disposant d'un chauffage collectif au gaz
 - Prise en compte des coûts P1 et P2 primaire pour les bailleurs
 - P1, P2 primaire et P3 primaire pour les autres
- Actualisation des termes :
 - Molécule : PEG,
 - Taxe : TICGN,
 - Électron pour l'électricité.
- Décote de 5% pour obtenir un prix compétitif pour le réseau de chaleur

Pour les potentiels abonnés, une diminution de 5 % du prix de la chaleur TTC par rapport à une solution de référence gaz a été prise en compte. Cette référence est définie en fonction du maître d'ouvrage :

- Pour les bailleurs, il s'agit uniquement des charges récupérables, c'est à dire le coût d'achat de l'énergie (P1) ainsi que la diminution des charges d'exploitation P2 induite par le moindre entretien de la chaufferie (convertie en sous-station) ;
- Pour les collectivités et les copropriétés, il s'agit de l'ensemble de la facture, c'est-à-dire P1 (charges de combustible), ainsi que la diminution des charges d'exploitation (P2) et des

charges de gros entretien et renouvellement (P3) induite par la conversion des chaufferies en sous-stations.

Dans l'objectif de cadrer au plus près de la situation actualisée de l'étude, il a été pris en compte les valeurs suivantes pour l'évaluation du prix de la chaleur produite à partir du gaz :

- Molécule (PEG) : 44 €/HT/MWh PCS,
- TICGN : 8,45 €/MWh PCS,
- P0 (représentant les conditions d'approvisionnement sur le marché du gaz) : 1,0 €/HT/MWh PCS.
- P2 primaire : 50 €/HT/logement
- P3 primaire : 1,5% des CAPEX
- P4 primaire (financement de l'investissement chaudière au bout de 20 ans) : sans intérêts d'emprunt
- Abonné type : résidence composée de 100 logements

À partir de ces hypothèses, le prix cible reste identique à l'étude de faisabilité initiale et s'établit à 130 €/TTC/MWh en moyenne sur 29 ans d'exploitation, prévoyant une solution réseau de 5% inférieure aux prix moyens actuels afin de créer des conditions de commercialisation favorables.

6.2 INVESTISSEMENTS DE PREMIER ÉTABLISSEMENT

6.2.1 Investissement moyen de production EnR&R

Pour la partie production de chaleur EnR&R, les investissements nécessaires sont synthétisés dans le tableau suivant :

<i>En k€ HT</i>	Scénario 1	Scénario 2
2 doublets géothermaux au Dogger	31 022	31 022
Centrale géothermique	10 290	10 290
Foncier	2 000	2 000
Maîtrise d'œuvre (13%)	1 338	1 338
Aléas (5%)	2 066	2 066
TOTAL Production EnR&R	46 716	46 716

Le coût du foncier a été estimé à 2M€ par le SIPPEREC (la remise en état du terrain de football est comprise dans ce montant).

6.2.2 Appoint et secours

Comme explicité ci-avant, l'appoint et le secours total du réseau de chaleur seront réalisés par les chaufferie existantes des prospects identifiés. Dans tous les cas de figure (chaque scénario) il sera nécessaire de créer une chaufferie gaz dans la centrale géothermique à construire.

Le tableau ci-après reprend les coûts d'investissement nécessaires pour l'installation d'appoint et de secours :

<i>En k€ HT</i>	Scénario 1	Scénario 2
Chaufferie gaz neuve	900	1 170
Électricité et automatisme	250	250
Hydraulique	150	150
Fumisterie	50	50
Maîtrise d'œuvre (13%)	176	211
Aléas (5%)	68	81
TOTAL Production A/S	1 594	1 912

6.2.3 Réseau de chaleur et postes de livraison

Le coût du réseau de chaleur est estimé à partir du tracé projeté et des différents obstacles et contraintes de parcours. À ce stade des études, il n'a pas été réalisé de mesure des longueurs de tranchées par géomètre. Le tableau suivant détaille les coûts relatifs à :

- La création du réseau de chaleur jusqu'aux postes de livraison en pied d'immeuble des nouveaux abonnés ;
- La création du réseau de chaleur sur les zones à aménager (projets, ...) ;
- La mise en place de postes de livraison.

Pour la partie distribution et livraison de chaleur, les investissements nécessaires sont synthétisés dans le tableau suivant :

<i>En k€ HT</i>	Scénario 1	Scénario 2
Réseau	37 900	43 368
Sous-stations	6 760	7 720
Maîtrise d'œuvre (11%)	4 913	5 620
Aléas (5%)	2 233	2 554
TOTAL Distribution réseau	51 806	59 262

6.2.4 Total des investissements

Ainsi, les investissements liés à l'étude sont les suivants :

<i>En k€ HT</i>	Scénario 1	Scénario 2
Forage et centrale géothermique	44 716	44 716
Chaudière appoint et secours	1 494	1 912
Réseau et sous-stations	51 806	59 262
Foncier	2 000	2 000
TOTAL	100 116	107 890

Il est à noter qu'une ligne aléas a été intégrée dans chaque catégorie de dépense afin de prendre en compte des éventuels imprévus et les études complémentaires rendues nécessaires.

6.3 COÛTS D'EXPLOITATION

6.3.1 Durée du projet

Au vu des investissements importants à consentir, de la durée de vie prévisionnelle des installations et de manière à optimiser au mieux le prix de la chaleur finale proposé aux abonnés, il a été décidé, de manière habituelle pour les réseaux de chaleur géothermiques, de mettre en place un contrat d'une durée de 30 ans, comprenant une année de travaux suivie de 29 années d'exploitation. Cette durée permet à l'opérateur d'amortir l'ensemble des investissements sur la durée du contrat.

6.3.2 Charges énergies primaires P1

Les charges de combustibles pour l'alimentation du réseau de chaleur correspondent à :

- L'électricité pour l'alimentation des pompes à chaleur et des équipements de pompage du doublet géothermique ;
- La fourniture de gaz pour l'alimentation de la chaudière d'appoint/secours.

Les tarifs retenus dans les modélisations économiques sont :

- Pour l'électricité : 125 €/HT/MWhé en moyenne
- Pour le gaz : considérant une part « molécule » (PEG) égale à 44 €/HT/MWh PCS

Ces charges sont présentées en régime établi (2031) :

<i>En k€/an</i>	Scénario 1	Scénario 2
Gaz	1 887	2 202
Électricité géothermie	750	775
Électricité PAC	1 111	1 160
TOTAL	3 748	4 137

6.3.3 Charges de conduite et d'entretien courant P2

Les tableaux suivants présentent les coûts correspondant à la conduite quotidienne des installations ainsi qu'à la gestion administrative.

Les coûts sont indiqués en régime établi (2031) :

<i>En k€/an</i>	Scénario 1	Scénario 2
Inhibiteur de corrosion	140	140
Élec RCU & Chaufferies (hors PAC)	283	299
Maintenance équipement sous-sol	28	28
Diagraphies (producteur tous les 5 ans - injecteur tous les 3 ans)	13	13
Contrat anti-éruption des puits	10	10
Contrat de suivi des installations géothermale	70	70
Personnel	228	228
Véhicules + EPI	21	21
Eau de ville et produit d'entretien	71	75
Fournitures et consommables (y.c outillage)	152	160
Entretien des compteurs	22	25
Pompe à chaleur	29	29
Coût des locaux (entretien, espaces verts)	7	7
Réseau et GTC	21	23
Contrôles règlementaires	15	15
TOTAL P2 entretien courant	1 110	1 143

<i>En k€/an</i>	Scénario 1	Scénario 2
Assurance SAF	30	30
Assurances	102	110
Frais de siège	637	685
Contribution économique territoriale	112	118
Redevance d'occupation réseaux	15	17
Frais de contrôle de la concession	90	90
Quotas de CO2	0	0
Taxe foncière	5	5
TOTAL P2 autres charges	991	1 055

6.3.4 Charges de gros entretien et de renouvellement P3

Les charges de gros entretien et de renouvellement correspondent aux provisions à réaliser pour les opérations de maintenance lourde permettant de :

- Faire face aux imprévus de l'exploitation courante (panne, fuite, ...) ;
- Renouveler le matériel en fin de vie.

Les coûts sont indiqués en régime établi (2031) :

<i>En k€/an</i>	Scénario 1	Scénario 2
P3 Production EnR&R	257	257
P3 Appoint/Secours	19	23
P3 Réseau de distribution	174	198
P3 Sous stations	62	71
TOTAL P3	511	548

6.4 MÉCANISMES DE FINANCEMENT MOBILISABLES

Le financement des investissements peut s'effectuer à partir de 4 modalités différentes : les subventions, les droits de raccordement payés par les usagers, les apports en capitaux des parties prenantes à l'opération, et les emprunts bancaires.

Par principe, il n'a été considéré aucun droit de raccordement sur le périmètre de premier établissement pour disposer d'une visibilité sur le cout de revient complet du réseau de chaleur. En effet les droits de raccordement reviennent à transférer une partie du coût d'investissement aux usagers lors de leur raccordement et réduire ainsi l'assiette des tarifs d'utilisation du réseau.

6.4.1 Le Fonds chaleur

Le Fonds Chaleur Renouvelable est l'une des mesures majeures issues du Grenelle de l'Environnement en faveur du développement des énergies renouvelables, pérennisé par la loi sur la transition énergétique de 2015.



L'objectif du Fonds Chaleur est de permettre aux installations produisant de la chaleur à partir d'énergies renouvelables d'être économiquement compétitives par rapport aux installations utilisant une énergie conventionnelle.

Deux types d'aides peuvent être alloués :

- **L'aide à la création d'installations de production de chaleur renouvelable** : le projet répond aux règles d'éligibilité du Fonds chaleur, car il s'agit de créer une centrale géothermique ou une chaufferie biomasse,
- **L'aide à la création d'un réseau de chaleur** : le projet répond aux règles d'éligibilité du Fonds chaleur dans la mesure où le réseau sera alimenté à plus de 65% par EnR&R après réalisation du projet, les critères à respecter étant les suivants :
 - Densité thermique du réseau après extension $\geq 1,0$ MWh/ml ;
 - Impact positif pour l'abonné sur le tarif de fourniture de chaleur ;

L'enveloppe globale des subventions octroyées doit respecter les limites communautaires. L'un des critères concerne la taille de l'entreprise : le montant maximum de l'aide pour les réseaux de distribution de chaleur ne peut excéder 60% des investissements éligibles considérant que les concessionnaires seront classés comme « Grande entreprise ».

6.4.2 Estimation du montant des aides au projet

Calcul de l'aide à la création du moyen de production d'EnR&R :

Le barème 2023 de l'aide maximum Ademe pour les investissements pour la création de moyens de production d'EnR&R à partir de géothermie avec pompe à chaleur détermine une valeur plafond calculable à partir d'un ratio de 20 €/MWh EnR&R sur 20 ans.

Calcul de l'aide à la création du réseau > 65% EnR&R :

Le barème de l'aide forfaitaire Ademe pour les investissements pour les créations et extensions de réseaux de moins de 20 000 MWh/an d'EnR&R est le suivant pour 2023 :

Type de réseau	Diamètre Nominal du réseau	Aide forfaitaire €/ml
Vapeur	Tous DN	1 330
Basse Pression (eau chaude)	DN > 400	1 190
	DN > 250 à 400	770
	DN > 125 à 250	610
	DN > 65 à 125	450
	DN 65 et moins	390

Ce barème a été appliqué à chaque scénario.

Calcul de l'aide totale :

L'aide maximale a été déterminée en retenant le montant le moins élevé entre 60 % des investissements éligibles et le montant calculé selon le Fonds Chaleur décrit précédemment.

L'aide totale est exprimée en maximum pour chacun des scénarios :

En k€	Scénario 1	Scénario 2
Production EnR&R	27 250	27 250
Distribution	15 452	17 681
Maximum Fonds chaleur	42 702	44 931

Les montants d'aide retenus dans les modélisations économiques des scénarios sont :

En k€	Scénario 1	Scénario 2
Maximum Fonds chaleur	42 702	44 931
Taux d'aide / Plafond (60% maximum si > 20 GWh EnR/an)	92%	94%
Subvention retenue dans le plan d'affaire	39 408	42 391

Ce qui équivaut, sur le total des investissements éligibles à :

<i>En k€</i>	Scénario 1	Scénario 2
Subvention retenue	39 408	42 391
Investissements éligibles production	46 308	46 626
Investissements éligibles réseaux et sous-stations	51 806	59 262
Total des investissements éligibles	98 114	105 888
Taux de subvention	39%	39%

6.5 SYNTHÈSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE

Le TRI (taux de rendement interne du projet) ressortant des projections a été calculé sous contrainte d'atteindre le prix cible de la chaleur de 130 €TTC/MWh utile (vendu en sous-station) en moyenne sur la durée de la DSP :

**TRI après
impôts**

7,00 %

En ciblant ces taux de rendement, on obtient pour chaque scénario :

	Scénario 1	Scénario 2
Prix moyen (en €TTC/MWh)	97	99
Droit de raccordement (en €HT/kW)	0	0
TOTAL CA (en k€HT/an)	346 318	371 841

7 GOUVERNANCE DU PROJET

7.1 CHOIX DE GOUVERNANCE

Pour rappel, les deux modes de gestion envisagés par le SIPPEREC et les collectivités sont :

- La **Société Publique Locale** (**solution privilégiée à ce stade de l'étude**) : il s'agit d'une Société anonyme à capitaux propres entièrement publics, association entre au moins 2 collectivités locales ou EPCI.
- La **Délégation de Service Public** : la collectivité locale confie l'exploitation de l'activité de service public à un opérateur économique (public type SPL, mixte type SEML, ou totalement privé). Dans ce cadre, l'investissement est assumé par le concessionnaire et les installations sont rétrocédées à la Collectivité à l'issue de la DSP. Ce mode de gestion permet de s'appuyer sur l'expertise d'un opérateur privé expérimenté. Les possibilités de contrôle sont de ce fait plus limitées et la procédure de concurrence est assez lourde à mettre en œuvre.

Des échanges et accords seront à prévoir entre les communes et le SIPPEREC pour convenir d'un mode de gestion.

8 CONCLUSIONS

Les trois communes de Bry-sur-Marne, Villiers-sur-Marne et Noisy-le-Grand présentent des besoins en chaleur suffisants avec un taux d'EnR suffisamment élevé pour envisager la mise en place d'un réseau de chaleur sur les trois villes alimenté à partir de deux doublets de géothermie à la nappe du Dogger couplée à un système de pompes à chaleur.

Les résultats de cette étude complémentaire ont été présentés au SIPPEREC et aux trois communes lors du comité de pilotage du 23 avril 2024.

La décision de retenir un scénario en particulier n'a pas été actée durant cette restitution.

9 ANNEXES

Annexe 1 : Liste des prospects du scénario 1

Annexe 2 : Liste des prospects du scénario 2

Annexe 3 : Répartition entre les trois communes

10 GLOSSAIRE

Boucle géothermale : éléments physiques et matériels en contact avec le fluide géothermal constituant le circuit partant du puits de production et aboutissant au puits de réinjection ;

CVE / UVE : Centre de valorisation énergétique / Usine de valorisation énergétique. Statut atteint par les incinérateurs d'ordure ménagère à partir d'un certain seuil de valorisation énergétique (électricité et chaleur), permettant de diminuer la taxe générale sur les activités polluantes.

COP d'une installation géothermique : c'est le coefficient de performance de l'installation qui est défini comme le rapport de l'énergie produite sous forme de chaleur par l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de l'opération. La valeur du COP est comprise entre 20 et 45 suivant les installations.

Densité thermique : Quantité d'énergie thermique appelée par mètre de conduite du réseau de chaleur installée.

Degré Jour Unifié (DJU) : Différence de température entre la température extérieure et la température de 18°C (température intérieure des logements), multipliée par la durée de cette différence (en jours). Le DJU est une référence pour qualifier la rigueur climatique et amener ainsi des comparaisons pertinentes d'une année à l'autre lors des bilans annuels d'exploitation.

DN : Diamètre Nominal (d'une conduite)

DSP / CSP : Délégation de Service Public / Concession de Service Public

Durée équivalente à pleine puissance : Voir taux d'utilisation équivalent à pleine puissance

Échangeur de chaleur : dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre sans les mélanger. Le flux thermique traverse la surface d'échange qui sépare les fluides. Ils sont souvent de type échangeurs à plaques (les surfaces d'échange sont des plaques de métal).

ECS : Eau Chaude Sanitaire

EnR&R : Énergies nouvelles Renouvelables et de Récupération

DOE : Dossier des Ouvrages Exécutés

FOL/FOD : Fioul Lourd / Fioul Domestique

Géothermie : Utilisation de la chaleur de la terre. La récupération de cette chaleur sous forme d'énergie thermique se fait par circulation d'un fluide dans la formation ciblée. Ce fluide caloporteur peut être de l'eau injectée sous pression depuis la surface qui remontera chargée des calories ou l'eau naturellement présente au sein d'un aquifère souterrain comme l'eau du Dogger dans le Bassin parisien.

GER : Gros entretien et renouvellement

GN : Gaz naturel

Gradient géothermal : augmentation de température constatée dans le sous-sol à mesure que l'on s'éloigne de la surface.

GTA : Groupe Turbo-Alternateur – Installation visant à transformer l'énergie mécanique (rotation d'une turbine) en énergie électrique (courant alternatif).

GTC : Gestion Technique Centralisée

EPCI : Établissement Public de coopération Intercommunal

ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement. Dans le cas d'une chaufferie cela concerne les installations dont la puissance est supérieure à 2 MW.

IRIS : Ilots Regroupés pour l'Information Statistique. Découpage du territoire en mailles de taille homogène d'environ 2 000 habitants réalisé par l'INSEE.

kWh/MWh : voir Wh

MWh_é/MWh_{élec} : MWh électrique

MWh_{ut} : MWh_{utile}, quantité d'énergie ne nécessitant pas d'être transformée pour être utilisée. Par opposition aux MWh_{PCS} et MWh_{PCI} des énergies fossiles.

PCI/PCS : Pouvoir Calorifique Inférieur/Supérieur (d'un combustible)

PE TGAP : Indicateur de valorisation énergétique (Performance Énergétique) servant de base pour la détermination du montant de la TGAP.

P1/P2/P3/P4 : Dénominations standards des charges d'exploitation dans le chauffage collectif correspondant respectivement à :

- l'achat de combustible,
- l'entretien courant,
- les charges de Gros Entretien et Renouvellement,
- le financement.

Rendement d'un réseau de chaleur : Rapport entre la quantité de chaleur livrée en sous-stations et la quantité de chaleur produite en tête de réseau, permettant d'évaluer les pertes thermiques du réseau

Réseau géothermique : par opposition à la boucle géothermale, le circuit géothermique est composé des éléments en contact avec un fluide propre (eau brute traitée) qui véhicule la chaleur prise au fluide géothermal. L'échangeur thermique constitue la frontière physique entre géothermal et géothermique.

Réseau primaire : Partie du réseau de chaleur située en amont des sous-stations, reliant celles-ci aux centrales de production de chaleur

Réseau secondaire : Réseau situé en aval des sous-stations, permettant de relier celles-ci aux locaux à chauffer. Le réseau secondaire ne fait pas juridiquement partie du réseau de chaleur géré par le délégataire.

RT (2005/2012 ...) : Règlementation Thermique

SIAAP : Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne

Sous-station : Interface entre le réseau primaire et le réseau secondaire, la sous-station est le lieu où la chaleur est livrée par le fournisseur du service de chauffage urbain. Physiquement, il s'agit d'un échangeur thermique, situé en général en pied d'immeuble.

STEP : Station de traitement des Eaux Polluées

Taux de couverture de la géothermie : Rapport de l'apport géothermie par les besoins

Taux d'utilisation équivalent à pleine puissance : Aussi appelé facteur de charge, il s'agit du ratio entre l'énergie effectivement produite par un moyen de production et l'énergie qui aurait été produite si ce moyen de production fonctionnait à pleine puissance en permanence. En multipliant ce taux par le nombre d'heure annuel, on obtient la durée équivalente à pleine puissance.

TGAP : Taxe Générale sur les Activités Polluantes.

TICGN/TICPE : Taxe Intérieure sur la Consommation de Gaz Naturel / de Produits Énergétiques

Température de base : Température extérieure de référence pour la réalisation des bilans thermiques. Elle correspond à la température minimale (constatée au moins 5 jours dans l'année) d'un lieu donné.

URF : Unité de Répartition Forfaitaire, pouvant être utilisée comme unité de facturation de la part fixe R2 d'un réseau de chaleur.

UIDND, ex-UIOM : Usine d'Incinération des Déchets Non Dangereux

UVE : Voir CVE

VNC : Valeur Nette Comptable, montant des biens restant à amortir à la fin de la délégation

Wh : Unité de mesure d'énergie, correspondant à l'énergie produite par une puissance de 1 watt en une heure. On rencontre plus souvent le kWh (échelle d'un logement) ou le MWh (échelle d'un réseau de chaleur).

Annexe 2 – Communiqué AFPG sur la sismicité en géothermie profonde

Paris, le 07 décembre 2020

L'AFPG revient sur les épisodes sismiques survenus depuis octobre 2020 dans la métropole de Strasbourg en lien avec les activités de géothermie profonde

Une série d'événements sismiques ressentis par la population, de magnitude comprise entre 2,1 et 2,6 entre le 28 octobre et le 11 novembre 2020, a été suivie d'un événement de magnitude 3,5 le 4 décembre au matin. Ces événements sont directement en lien avec les activités de mise en route de la centrale géothermique « Geoven », filiale de FONROCHE Géothermie à Vendenheim (67).

Suite à l'évènement du 4 décembre et à la demande des autorités, l'opérateur a décidé de procéder à l'arrêt progressif et complet de la circulation d'eau géothermale entre les deux puits forés à 5 km de profondeur. Il procédera ensuite aux analyses détaillées avec les experts de l'Etat, des milieux académiques et industriels pour comprendre l'origine de ce phénomène et en tirer toutes les conséquences.

La géothermie profonde dans les réservoirs géologiques de la Plaine du Rhin a montré que la sismicité est un processus associé principalement aux phases de test sur les forages et de mise en route. Cette sismicité est mesurée et contrôlée durant toute la phase de construction des installations et également en phase d'exploitation, durant laquelle les événements ne sont généralement pas ressentis.

Les travaux des opérateurs sont strictement encadrés par les autorités et sont réalisés en concertation avec les acteurs (opérateurs, DREAL et services de l'Etat, collectivités, ...) de manière à pouvoir agir et informer rapidement en cas de problèmes. C'est ce qui a été fait sur le site de Vendenheim.

L'AFPG souhaite préciser que :

- Cette opération de Vendenheim s'inscrit dans le cadre d'une filière récente de géothermie profonde dans les réservoirs géologiques du Bassin rhénan, elle est **totale**ment distincte :
 - des opérations de **géothermie de surface** comprise entre 0 et 200 mètres de profondeur qui alimentent en chaud et en froid des milliers d'habitations depuis des décennies sur l'ensemble du territoire français ;
 - des opérations de **géothermie profonde sur des nappes aquifères situées dans des couches géologiques sédimentaires** qui en France chauffent depuis plus de 50 ans plus d'un million d'habitants sur une grande partie du territoire.
- Ces épisodes sismiques ne remettent pas en cause la pertinence de la géothermie profonde dans ce type de géologie comme **solution décarbonée** pour la transition énergétique des territoires français. Des sites en exploitation dans le bassin rhénan existent déjà depuis plusieurs années en France (Rittershoffen, Soultz-Sous-Forêts) et en Allemagne (Landau, Insheim).

- Un **groupe de travail** composé des professionnels de la filière a été mis en place au sein de l'AFPG pour, de façon collégiale, faire avancer les règles de l'art de cette géothermie à fort potentiel et également pour répondre aux problématiques d'acceptabilité sur tous les territoires français concernés. Il est important de tirer toutes les leçons de ce qui s'est passé à Vendenheim, telle la démarche entreprise sur le site pilote de Soultz-Sous-Forêts. Cette démarche est d'autant plus nécessaire qu'elle permettrait à la France de disposer d'atouts importants pour faire face au colossal défi des enjeux climatiques.
- La filière française de géothermie profonde doit poursuivre le développement d'une expertise reposant sur des **solutions innovantes** développées par son industrie et susceptibles de constituer une valeur ajoutée pour non seulement les futurs projets en France, mais aussi ceux qui sont possibles à l'**export**.
- Une montée en puissance de la filière est engagée sur le long terme pour répondre aux enjeux de la politique énergétique française pour non seulement la production de chaleur renouvelable, mais également pour l'extraction de minéraux stratégiques comme le **lithium**.

L'AFPG en bref :

Créée en juin 2010, l'AFPG fédère aujourd'hui une centaine d'entreprises représentant les métiers de l'énergie géothermique en France métropolitaine et dans les Territoires d'Outre-Mer, ainsi que les différentes parties-prenantes majeures de la filière (pôle de compétitivité, autres syndicats de l'énergie, enseignement supérieur...)

Le rôle de l'AFPG est de promouvoir et accélérer le recours à l'énergie géothermique, cette dernière étant disponible 24h/24 et pouvant servir à la production de chaleur et d'électricité ainsi qu'à la climatisation le tout en ayant un impact environnemental négligeable.

Les missions de l'AFPG s'articulent autour de trois grands axes :

- Représenter et fédérer les professionnels de la filière
- Informer les collectivités, les industriels et les particuliers des ressources et de la diversité de l'offre géothermique,
- Accompagner les Pouvoirs Publics en matière de réglementation, de législation et de qualification.

Par ailleurs, dans ses missions d'information, l'AFPG se positionne en ressource d'informations, de données, d'images et de mise en relation pour les médias et relais d'information.

Annexe 3 - Mémoire de risque sismique à Villiers-sur-Marne



Mémoire de risque sismique

Mesures mises en œuvre pour comprendre les phénomènes sismiques susceptibles d'être activés pendant les travaux de forage



Sommaire

1. Introduction à la géothermie de basse température	3
2. Sismicité induite en géothermie profonde.....	5
2.1. Sismicité naturelle et sismicité induite.....	5
2.2. Définition du système géothermique.....	8
2.3. Aléa et risque sismiques.....	9
2.4. Phénomène de sismicité induite dans les systèmes aquifères à travers le monde	12
3. Mesures mises en œuvre pour connaître la géologie du sous-sol impacté par les travaux de forage	13
4. Conclusions.....	14

Table des figures

Figure 1 – Principe de fonctionnement d'un doublet géothermique (source : ADEME/BRGM)	3
Figure 2 – Réseaux de chaleur géothermiques en Île de France en 2019 (source : étude de marché AFPG 2021)	4
Figure 3 - Sollicitations d'origine anthropique auxquelles peut être soumis le sous-sol (Contrucci et Klein, 2017 d'après Ellsworth, 2013 et McGarr et al., 2022)	5
Figure 4 - Zonage sismique du territoire français (Source : Géorisques)	7
Figure 5 : Les différentes causes de sismicité induite (source : HiQuake)	8
Figure 6 : Classification des systèmes géothermiques (Source : INERIS & BRGM d'après Moeck, 2014)9	
Figure 7 : Définition du risque sismique (source : INERIS & BRGM)	9
Figure 8 : Niveau d'aléa sismique induite en fonction du type de système géothermique (source : INERIS & BRGM)	10
Figure 9 : Influence des facteurs intrinsèques et opérationnels sur le niveau d'aléa sismique en fonction du type de système géothermique (source : INERIS & BRGM).....	11

1. Introduction à la géothermie de basse température

L'objectif de ce mémoire est de préciser les mesures mises en œuvre et celles envisagées pour connaître la géologie du sous-sol impacté par les travaux et comprendre les phénomènes naturels, notamment sismique, susceptibles d'être activés par les travaux en réponse à l'article de la LOI n°2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets.

La géothermie basse température ou basse enthalpie consiste en l'extraction d'une eau à une température comprise entre 60°C et 85°C, à partir de gisements situés entre 1 500 et 2 500 mètres de profondeur. L'essentiel des réservoirs exploités se trouve dans des bassins sédimentaires comme le Bassin de Paris. L'exploitation de ce type de géothermie repose sur un fonctionnement en doublet, avec un forage de production et un forage d'injection (Figure 1) :

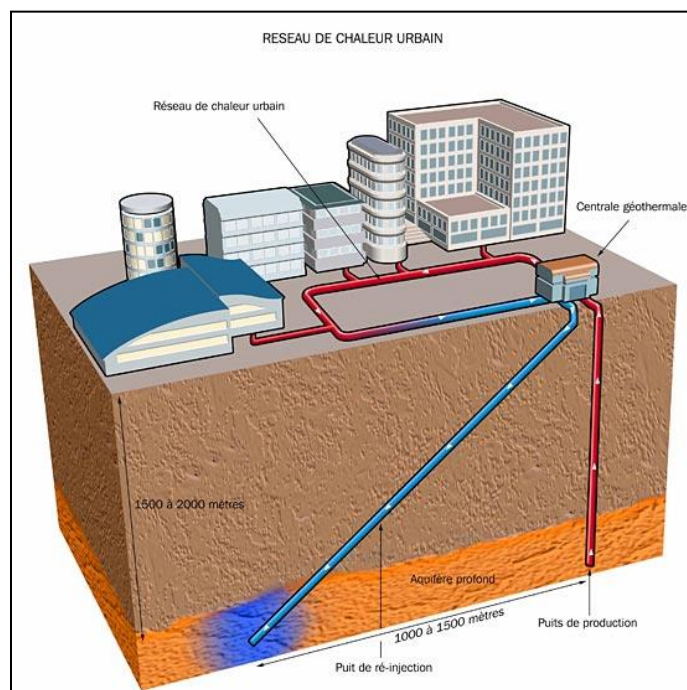


Figure 1 – Principe de fonctionnement d'un doublet géothermique (source : ADEME/BRGM)

L'Île-de-France est riche d'une cinquantaine d'exploitations géothermiques de ce type, et constitue une région pilote en France (et en Europe). Leurs positions sont rappelées sur la Figure 2.

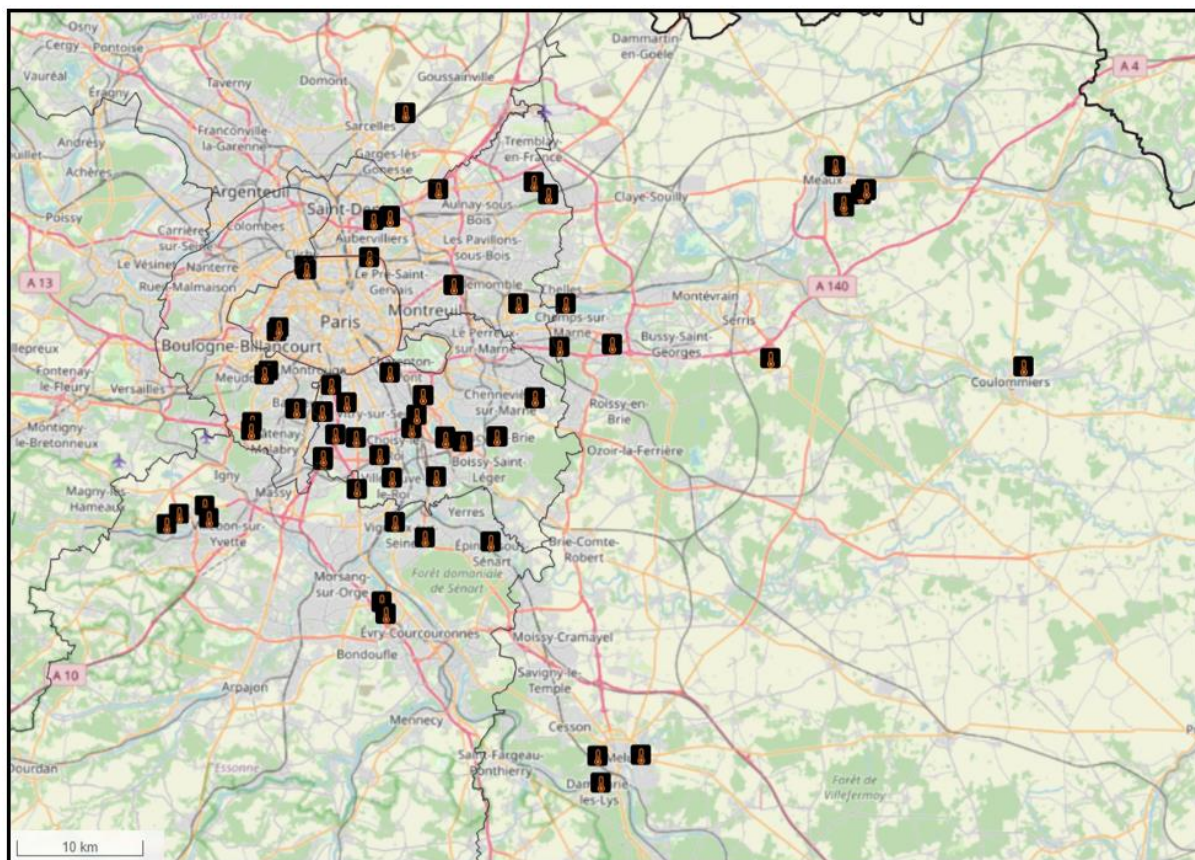


Figure 2 – Réseaux de chaleur géothermiques en Île de France en 2019 (source : étude de marché AFGP 2021)

Le projet se situe sur la commune de Villiers-sur-Marne, dans le Val-de-Marne (94) dans le cadre de l'alimentation du réseau de chaleur des communes de Bry-sur-Marne, Villiers-sur-Marne et Noisy-le-Grand. Dans ce contexte, le forage d'un quadruplet géothermique est envisagé. Il s'agit d'atteindre l'aquifère du Dogger, formation rocheuse sédimentaire peu profonde et perméable où le fluide géothermique peut circuler naturellement, ce qui permet le transfert de chaleur par conduction.

Comme d'autres activités industrielles d'exploitation du sous-sol, la géothermie profonde peut conduire à l'occurrence d'événements sismiques d'origine anthropique, c'est-à-dire de séismes se développant en réponse aux opérations humaines. Cette sismicité, inhérente au processus d'exploitation de la ressource géothermique, est généralement de faible magnitude ($M < 2$). Cependant, dans certains cas, des événements de magnitude plus importante, parfois ressentis en surface, peuvent être observés. A titre d'exemple, les essais de mise en service à Vendenheim (67) auraient entraîné des séismes, a priori induits, au cours des années 2019 et 2020.

Le contexte géologique du projet de Villiers-sur-Marne est connu et largement différent du type de géothermie qui entre en jeu dans le fossé rhénan. **Si la géothermie à Haute Température est sensible à ce phénomène, ce n'est pas le cas de la géothermie à Basse Température. Les cinquante années de recul disponibles en Île-de-France sur ce type de géothermie apportent une garantie forte en la matière. Les travaux réalisés dans le cadre de l'exploitation du Bassin de Paris n'ont mis en évidence aucune problématique en lien avec une sismicité induite.**

2. Sismicité induite en géothermie profonde

Cette partie s'appuie notamment sur le « Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde », rédigé par le BRGM et l'INERIS.

2.1. Sismicité naturelle et sismicité induite

Un séisme est provoqué par la rupture soudaine des roches à la suite de la modification de l'état de contrainte du sous-sol. Le mouvement qui en résulte provoque le déplacement d'un ou d'une partie de massif rocheux le long d'un plan de faille. Ce phénomène engendre des ondes sismiques qui se propagent dans le sol et peuvent arriver en surface. Un séisme se produit naturellement, mais on sait aujourd'hui que certaines activités d'origine humaine peuvent engendrer des séismes. Ainsi, on distingue la sismicité naturelle, qui n'est pas reliée à l'activité humaine, de la sismicité anthropique. Les sources de cette sismicité induite peuvent être diverses (injection ou extraction de fluide, chargement gravitaire ou extraction minière) (Figure 3).

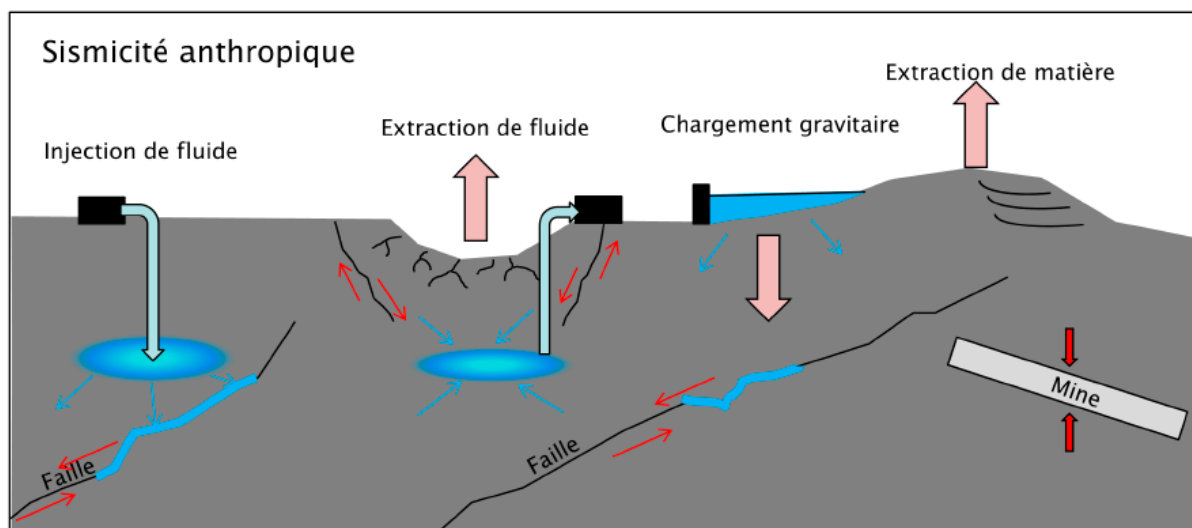


Figure 3 - Sollicitations d'origine anthropique auxquelles peut être soumis le sous-sol (Contrucci et Klein, 2017 d'après Ellsworth, 2013 et McGarr et al., 2022)

La sismicité naturelle ne se répartit pas de manière uniforme sur le territoire français. La réglementation en vigueur s'appuie sur une carte de l'aléa sismique réalisé à l'échelle nationale. Elle se traduit par un zonage sismique qui donne pour chaque commune son niveau d'exposition au risque (Figure 4).

Le dernier zonage sismique de la France est entré en vigueur le 22 octobre 2010 avec l'arrêté « relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite à risque normal » complété par les décrets n°2010-1254 relatif à la prévention du risque sismique et n°2010-1255 portant sur la délimitation des zones de sismicité du territoire français. Ce zonage découpe le territoire en 5 zones de sismicité (très faible, faible, modérée, moyenne et forte). Dans les

zones 2 à 5, les règles de construction parasismique sont applicables aux bâtiments et ponts « à risque normal ».

En compléments, les arrêtés du 24 janvier 2011 et du 15 février 2008 fixent les règles parasismiques applicables à certaines installations classées en se fondant sur ce zonage sismique. Les installations nucléaires relèvent d'une réglementation spécifique (RFS 2001-01).

Le projet de Villiers-sur-Marne est localisé en région Ile-de-France, **une zone de sismicité très faible (niveau 1)**. Il s'inscrit dans le cadre du développement d'un réseau de chaleur sur plusieurs communes et n'entrent pas dans les règles spécifiques aux installations classées et aux installations nucléaires.

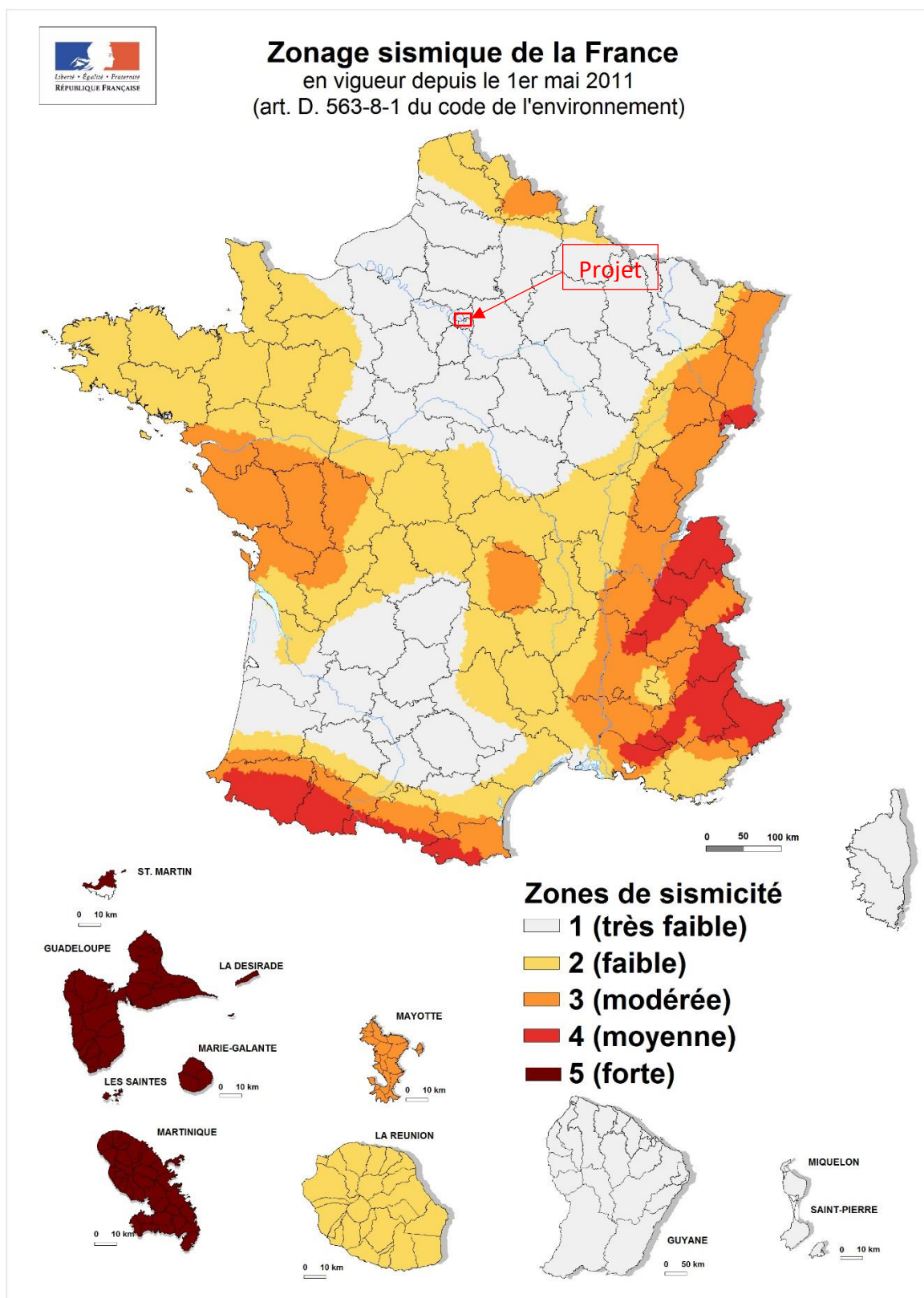


Figure 4 - Zonage sismique du territoire français (Source : Géorisques)

La géothermie représente environ 6% de la sismicité induite à travers le monde (Figure 5).

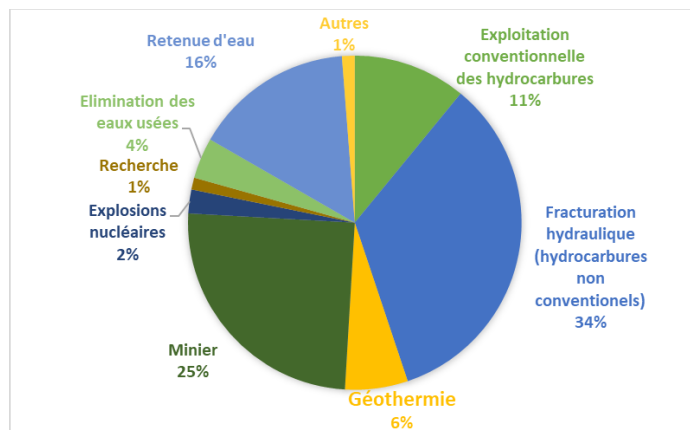


Figure 5 : Les différentes causes de sismicité induite (source : HiQuake)

2.2. Définition du système géothermique

Il existe plusieurs classifications des différents systèmes géothermiques à travers le monde. Ces classifications reposent sur le contexte géothermal, l'organisation de l'exploitation de la ressource ou encore les caractéristiques hydrogéologiques et/ou pétrophysiques du réservoir. La Figure 6 reprend la classification issue de Moeck (2014). Elle est basée sur le type de transfert de chaleur, le contexte géothermal et notamment les gammes de température. Cela permet de définir le type de système géothermique par lequel le réservoir du projet peut être approché.

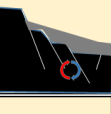
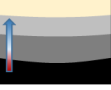
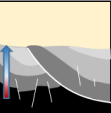
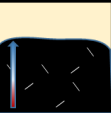
Transfert de chaleur	Contexte géothermal	Illustration	Gammes de températures (T) et de profondeurs (P) les plus couramment exploitées	Exemples	Type de système géothermique
Convection 	Volcanique actif <i>Systèmes se développant dans les zones volcaniques actives</i>		T : 70-350° P : 500 m-3000 m	Bouillante, Guadeloupe, France	Contrôle failles/fractures
	Plutonique récent <i>Systèmes se développant autour de plutons magmatiques récemment intrudés et refroidis</i>		T : 100-350°C P : 1500 m – 4000 m	Larderello, Italy	
	Domaine en extension <i>Systèmes se développant à la faveur d'une dynamique tectonique extensive, se traduisant par la formation de fossés d'effondrements</i>		T : 150-240°C P : → 5 000 m	Soultz-sous-Forêts, France	
Conduction 	Bassin intracratonique <i>Systèmes associés à des couches sédimentaires aquifères, en zone tectonique non-active</i>		T : < 150°C P : 500 m – 2 000 m	Bassin de Paris, France	Contrôle porosité matricielle
	Ceinture orogénique <i>Systèmes associés à des couches sédimentaires plus ou moins aquifères et à des failles et fractures issues d'une activité tectonique importante</i>		T : < 160°C P : 500 m – 3500 m	Bassin molassique bavarois, Allemagne	Contrôle mixte porosité matricielle et failles/fractures
	Système pétrothermal de socle <i>Système se développant dans un massif rocheux peu perméable d'un craton*</i>		T : 150-320°C P : → 5000 m	Cooper Basin, Australie	Contrôle failles/fractures

Figure 6 : Classification des systèmes géothermiques (Source : INERIS & BRGM d'après Moeck, 2014)

Le projet de Villiers-sur-Marne se trouve dans un système où le transfert de chaleur s'effectue par conduction, dans un contexte géothermal de bassin intracratonique avec des gammes de température inférieures à 150°C et des profondeurs d'exploitation comprises entre 500 et 2000m. **Le système géothermique est un système contrôlé par une porosité matricielle.**

2.3. Aléa et risque sismiques

Le risque sismique est le produit de l'occurrence d'un séisme (=aléa) sur un enjeu (=vulnérabilité) vis-à-vis d'infrastructures, de la population ou de l'environnement. (Figure 7).



Figure 7 : Définition du risque sismique (source : INERIS & BRGM)

L'aléa de sismicité induite en géothermie est associé à des paramètres intrinsèques (directement lié au système géothermique concerné) et opérationnels (au cours des différentes phases d'exploitations des projets).

Ainsi, un aléa contrôlé par une porosité matricielle est considéré comme faible, à l'inverse, celui d'un système contrôlé par failles et fractures est caractérisé par un aléa fort. Le système à contrôle mixte (CM) se situe dans un intermédiaire entre ces deux pôles (Figure 8).

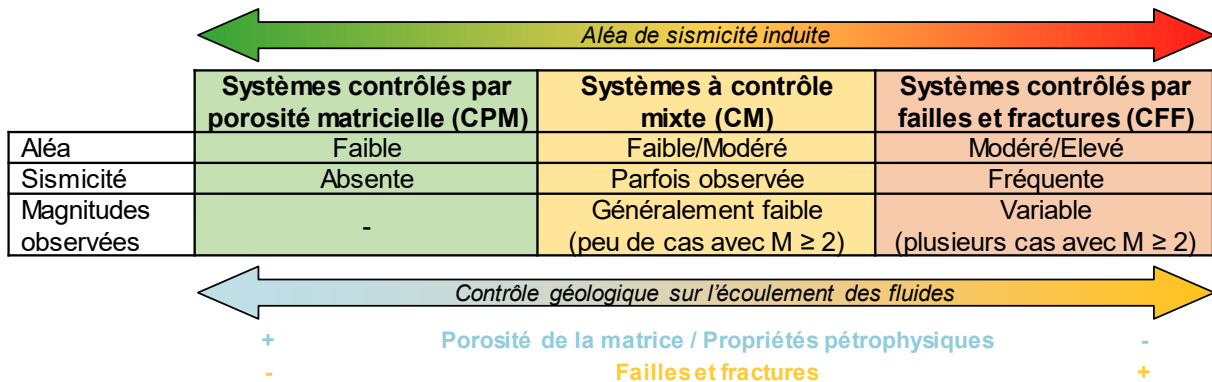


Figure 8 : Niveau d'aléa sismique induite en fonction du type de système géothermique (source : INERIS & BRGM)

Les influences intrinsèques et opérationnelles qui s'appliquent à ces systèmes sont résumés dans la Figure 9.

		Aléa de sismicité induite		
		Systèmes contrôlés par porosité matricielle (CPM)	Systèmes à contrôle mixte (CM)	Systèmes contrôlés par failles et fractures (CFF)
Facteurs intrinsèques	Ecoulement des fluides	Contrôlé par porosité matricielle	Contrôle mixte par porosité et par failles/fractures	Contrôle par failles et fractures
	Convection (transfert chaleur)			Bonnes propriétés hydrauliques
	Conduction (transfert chaleur)			Mauvaises propriétés hydrauliques
	Présence de failles dans un état de contrainte critique et favorablement orientées	Généralement non observé	Peut être fréquent	Peut être fréquent
	Connexion hydraulique avec le socle	Généralement non observé	Peut être fréquent	Forages à proximité ou atteignant le socle
	Distance socle réservoir	Généralement à distance du socle	Généralement à proximité du socle	Forages à proximité ou atteignant le socle
	Aléa sismique naturel	Faible	Moyen	Elevé
	Température du réservoir	Faible	Moyen	Elevé notamment pour systèmes CFF-CV
Paramètres opérationnels	Méthodes d'exploitation	Sites non-EGS	Aucun cas de sismicité observé	Très peu de cas de sismicité observés
		Sites EGS		
		Champs non-EGS		
		Champs EGS		
	Opérations	Circulation	Aucun cas de sismicité observé	Très peu de cas de sismicité observés
		Production-injection		
		Injection/Stimulation		
		Shut-in	Aucun cas de sismicité observé	Plusieurs cas de sismicité observé
		Volume net injecté	Faible	Moyen
		Pression d'injection	Faible	Elevé
		Injectivité	Elevée	Elevée
				Faible

Figure 9 : Influence des facteurs intrinsèques et opérationnels sur le niveau d'aléa sismique en fonction du type de système géothermique (source : INERIS & BRGM)

Le système géothermique du Dogger est un système contrôlé par une porosité matricielle, l'aléa sismique induit est donc faible.

2.4. Phénomène de sismicité induite dans les systèmes aquifères à travers le monde

Dans les systèmes aquifères, les phénomènes de sismicité induite sont très rares. Tous les sites géothermiques développés dans ces systèmes aquifères sont caractérisés par la quasi-absence de sismicité induite : c'est le cas du Bassin parisien (aquifère du Dogger) et du Bassin aquitain.

Pour les séismes observés en Californie, Suisse, Allemagne et Belgique, c'est la présence dans le socle de failles soumises à des contraintes élevées, mais aussi l'existence d'une connexion hydraulique entre la zone d'injection et les couches plus profondes, qui jouent un rôle primordial dans le déclenchement des événements sismiques.

La littérature ne fait état d'aucun événement sismique ressenti en surface lorsque l'exploitation des réservoirs se fait dans des roches sédimentaire poreuses, ce qui sera le cas pour le projet de Villiers-sur-Marne dans le Bassin parisien. En effet, la réinjection s'effectuera dans un réservoir calcaire oolithique avec porosité primaire.

3. Mesures mises en œuvre pour connaître la géologie du sous-sol impacté par les travaux de forage

La nature même des travaux de forage permet la collecte de données au cours des opérations. Les caractéristiques géologiques et hydrauliques suivantes seront relevées et étudiées :

- Les cuttings fourniront des informations sur la lithologie des horizons géologiques rencontrés.
- Les pertes de boue étayeront les caractéristiques des unités géologiques traversées par les ouvrages.
- Les paramètres de forage seront interprétés en veillant à identifier les changements brutaux de ces paramètres (WOB, ROP, torque, ...)
- Les diagraphies conventionnelles réalisées au cours et en fin de forage permettront de caractériser les horizons géologiques. Plus particulièrement, la diagraphie de température sera interprétée afin de caractériser les zones de venues et de pertes d'eau froide ou chaude.
- La géochimie des fluides sera étudiée
- Les essais de débit seront interprétés pour caractériser les paramètres physiques du réservoir.

D'après le retour d'expérience dans le Bassin de Paris, les travaux de pompage d'essai n'ont pas mis en évidence d'influence des failles de la région. Il n'a pas été observé une quelconque sismicité induite par les travaux de forages géothermiques depuis les années 80 dans la région parisienne.

4. Conclusions

Les différents travaux et opérations géothermiques menés depuis les années 80 dans le Bassin de Paris n'ont pas fait l'objet d'évènement sismiques induits. Ainsi, les projets de géothermie profonde du Bassin parisien doivent être distingués des projets de géothermie de socle comme ceux dans le fossé rhénan. Les 40 années d'exploitation en Ile-de-France apportent une forte garantie concernant les risques de sismicité induite.

Par ailleurs, les projets de géothermie autour du futur quadruplet avec en particulier les projets Rosny-sous-Bois Neuilly-sur-Marne, Chelles, Val Maubuée, Champs-sur-Marne et Champigny 1 et 2, n'ont pas engendré ou révélé de sismicité induite ou tout autre phénomène problématique dans le cadre de la LOI n°2021-1104 du 22 août 2021.

Le risque de sismicité induite est donc négligeable au regard des éléments présentés dans ce mémoire.



Acteur majeur de l'ingénierie de l'environnement
et de la valorisation des territoires



Annexe 4 – Mémoire de recherche et d'exploitation pour connaître la géologie du sous-sol

Mémoire relatif aux méthodes de recherches et d'exploitation envisagés pour connaître la géologie du sous-sol susceptibles d'être impactée par les travaux

1. Introduction

Le SIPPAREC a lancé une étude de faisabilité pour alimenter en chaleur le réseau de Bry-sur-Marne, Villiers-sur-Marne et Noisy-le-Grand par la géothermie. L'étude a conclu à la faisabilité de réaliser un quadruplet géothermique. Le futur site de forage est localisé le complexe sportif Octave Lapize sur la commune de Villiers-sur-Marne. Une centrale géothermique (où s'effectue l'échange de chaleur) sera intégrée à proximité des forages (Figure 1).

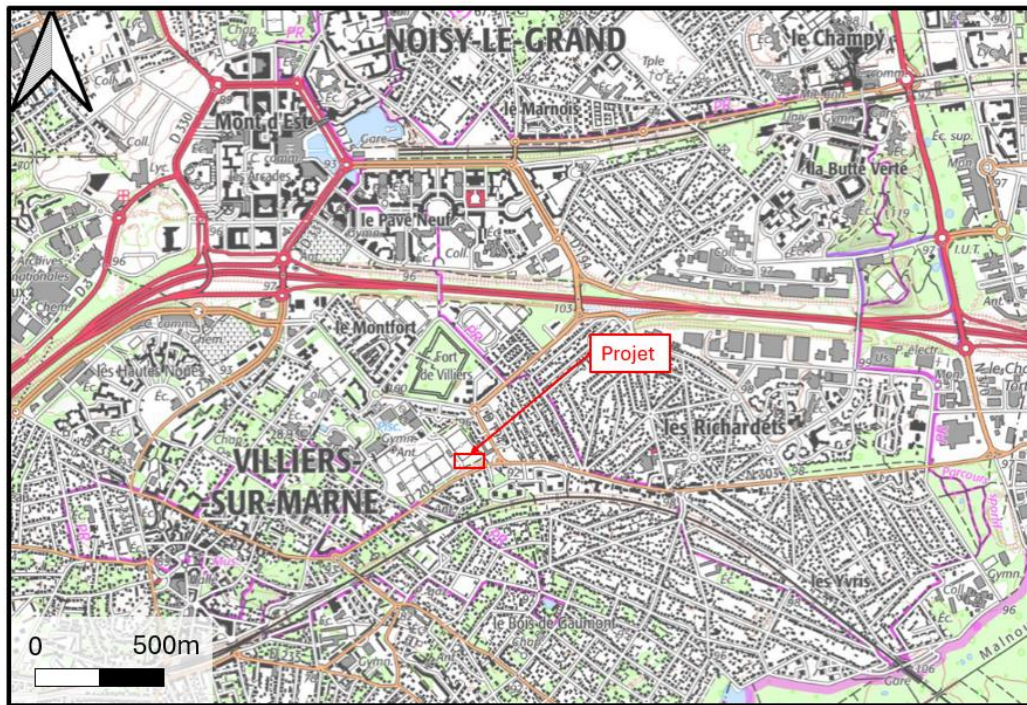


Figure 1 : Zone d'implantation des forages et de la centrale géothermique (source : Géoportail)

Ce document constitue le mémoire relatif aux méthodes de recherches ou d'exploitation envisagées, tel que prévu à l'article L. 164-1-2 du code minier, précisant les mesures mises en œuvre et celles envisagées pour connaître la géologie du sous-sol impacté par les travaux et comprendre les phénomènes naturels, notamment sismiques, susceptibles d'être activés par les travaux.

2. Sismicité

2.1. Géothermie et risque sismique

Les essais de mise en service du projet Fonroche à Vendenheim (67) ont entraîné des séismes, a priori induits, au cours des années 2019 et 2020 (séismes des 28 octobre et 12 novembre 2019 à Strasbourg, des 4 et 25 décembre 2020 à Vendenheim). Il convient de souligner les différences entre ce projet et celui qui fait l'objet de la présente demande d'autorisation.

➤ La géothermie « profonde » ou « haute température » ou encore « haute énergie »

La géothermie « profonde » ou « haute température » ou encore « haute énergie » vise à exploiter des eaux ayant une température généralement supérieure à 150°C et circulant dans des zones où le contexte géologique permet leur remontée à une relative faible profondeur (de 2000 à 5000 m). L'objectif est alors de produire de l'électricité à partir de la chaleur géothermique. La chaleur résiduelle peut aussi faire l'objet d'une valorisation en surface (principe de la cogénération).

Ce type d'opération relève d'une autorisation ministérielle et est traitée dans le Code Minier, dans la catégorie des opérations de puissance supérieure à 20 MW (20 000 kW).

Cette géothermie s'adresse à des sites où des conditions particulières permettent de disposer dans le sous-sol de fluides circulant à haute température. C'est le cas des contextes volcaniques, des contextes à forte activité tectonique passée ou actuelle (systèmes de failles dans le sous-sol, actives ou inactives) ou des systèmes hydrothermaux à forte profondeur (>3000 m). Très souvent à cette profondeur, les débits circulant dans le sous-sol sont faibles et des techniques consistant à injecter un flux d'eau artificiel dans le sous-sol (supérieur à celui naturellement présent) ont été développées, ces techniques étant appelées EGS pour Enhanced Geothermal Systems (Systèmes Géothermiques Améliorés). Ces systèmes supposent des injections d'eau à des pressions importantes, de l'ordre de 100 bars pour permettre la circulation des fluides dans les failles du sous-sol.

Tous les projets de ce type existants en France se trouvent dans le fossé rhénan. Des permis de recherche ont aussi été déposés dans le Massif Central, la Drôme et la région de Pau, mais aucun ouvrage n'a été réalisé à ce jour dans ces dernières régions. On citera aussi la Guadeloupe où, en association avec le contexte volcanique, des eaux entre 250 et 260 °C sont exploitées à des profondeurs comprises entre 500 et 1000 m (champ de Bouillante).

En Métropole, à la frontière entre la France et l'Allemagne, les opérations de géothermie à haute température actuelles sont liées à l'existence d'une zone tectonique très particulière. En effet, le fossé Rhénan, long de 300 km et large de 35 à 50 km, est constitué de compartiments effondrés (grabens) dans un secteur présentant de nombreuses failles. Il correspond à un rift continental.

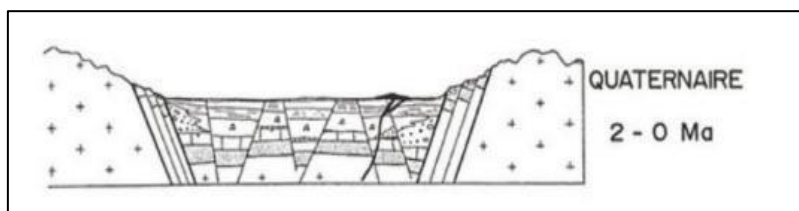


Figure 2 – Schéma du fossé rhénan (source : Eduterre)

C'est ce système de failles qui permet la circulation d'eaux très chaudes (supérieures à 150°C) à faible profondeur (2000 à 5000 m) et qui explique la localisation des opérations de géothermie profonde dans ce secteur : démonstrateur EGS à Soultz-Sous-Forêts, projet d'Electricité de Strasbourg à Illkirch-Graffenstaden, projets Fonroche à Vendenheim et à Eckbolsheim, projet de l'Usine Roquette à Rittershoffen.

Le fossé rhénan est l'une des régions européennes les plus actives naturellement d'un point de vue sismique. Pour autant, les incidents sismiques constatés à Vendenheim correspondent a priori à une sismicité induite par les essais de production, l'injection d'eau à haute pression dans le système de failles facilitant leur relâchement brutal. Cette sismicité induite est un phénomène qui était attendu - et surveillé -, mais dont l'ampleur connue en décembre 2020 a dépassé les prévisions. On notera que par le passé, les projets de Soultz-Sous-Forêts, Landau et Bruchsal en Allemagne ou encore à Bâle en suisse avaient déjà connu des phénomènes sismiques comparables. Généralement, ces phénomènes sont limités dans le temps et se produisent lors de la période de mise en service du système.

➤ **La géothermie « de surface » à « faible ou moyenne température » ou encore « basse énergie »**

Ce type de géothermie couvre le domaine allant de 0 à 2000 m de profondeur. Ici, il n'est pas recherché de contexte tectonique particulier et ce sont simplement les aquifères présents dans le sous-sol à plus ou moins grande profondeur qui sont exploités, la température de l'eau souterraine augmentant avec la profondeur (en moyenne de 3°C/100 m en France). L'exemple du bassin de Paris est illustré sur la figure ci-dessous.

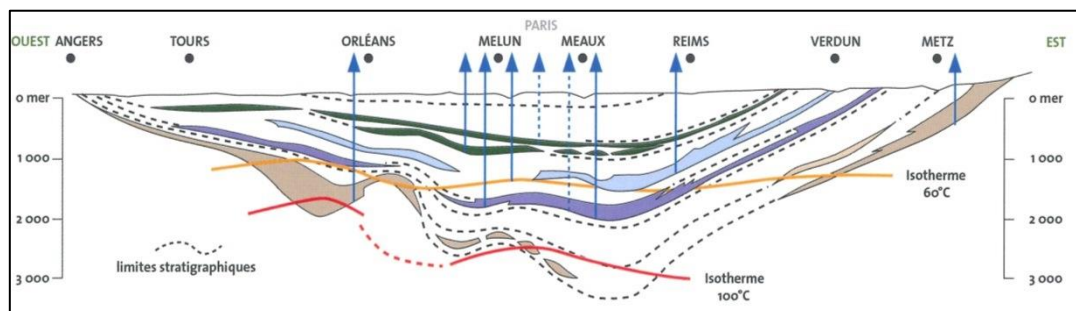


Figure 3 – Schéma du Bassin parisien (source : BRGM)

Ce type d'opérations relève d'une autorisation préfectorale au titre du Code Minier dans la catégorie des opérations de puissance inférieure à 20 MW (20 000 kW).

Dans ce cas, la valorisation en surface est uniquement thermique. Les températures des eaux exploitées dans ces opérations sont comprises entre 15°C et environ 80 °C. Les pressions utilisées pour la réinjection des eaux sont faibles. De nombreux ouvrages fonctionnent simplement par injection gravitaire, à la pression atmosphérique. Toutefois, lorsque le niveau de la nappe est élevé, une injection sous pression est nécessaire, mais excède rarement 30 bars.

Les principales opérations existantes sont situées dans les grands bassins sédimentaires (Bassin parisien, bassin aquitain) où l'on peut rencontrer des nappes d'eau souterraine profondes circulant au sein des terrains perméables (sables, calcaires, dolomie), sans que la présence d'un système de failles ne soit nécessaire pour permettre l'écoulement. Cette absence de système faillé, ainsi que les faibles pressions d'injection utilisées, expliquent qu'aucune sismicité induite n'ait été mise en évidence sur ce type de projets (la géothermie de ce type est exploitée industriellement depuis les années 1970 dans le Bassin parisien). Les eaux injectées circulent dans les pores du terrain sans que des phénomènes de

réagencement des terrains ne soient produits du fait des faibles forces mises en jeu (pression d'injection limitée).

Actuellement, 47 doublets ou triplets de forages à 1800 m de profondeur exploitent la nappe du Dogger en région parisienne (nappe à environ 70°C, débits supérieurs à 200 m³/h) et une dizaine d'ouvrages en Aquitaine d'une profondeur entre 1000 et 1500 m, existent depuis les années 1980, sans qu'aucun phénomène de sismicité induite ne soit rapporté.

➤ Conclusion

Ces éléments montrent qu'il est nécessaire de bien faire la différence entre les types de géothermie et leur relation aux risques de sismicité induite. Si la géothermie à Haute Température est sensible à ce phénomène, ce n'est pas le cas de la géothermie à Basse Température. Les cinquante années de recul disponibles en Île-de-France sur ce type de géothermie apportent une forte garantie en la matière.

2.2. Aléas sismiques

Les opérations de géothermie dites de Basse température relèvent généralement d'une autorisation préfectorale au titre du Code Minier dans la catégorie des opérations de puissance inférieure à 20 MW (20 000 kW).

Dans ce cas, la valorisation en surface est uniquement thermique. Les températures des eaux exploitées dans ces opérations sont inférieures à 80 °C. Les pressions utilisées pour la réinjection des eaux sont faibles. Lorsque le niveau de la nappe est élevé, une injection sous pression est nécessaire, mais excède rarement 30 bars.

Les principales opérations existantes sont situées dans les grands bassins sédimentaires (Bassin parisien, Bassin aquitain) où l'on peut rencontrer des nappes d'eau souterraine profondes circulant au sein des terrains perméables (sables, calcaires, dolomie), sans que la présence d'un système de failles ne soit nécessaire pour permettre l'écoulement. Cette absence de système faillé, ainsi que les faibles pressions d'injection utilisées, expliquent qu'aucune sismicité induite n'ait été mise en évidence sur ce type de projets (la géothermie de ce type est exploitée industriellement depuis les années 1970 dans le Bassin parisien). Les eaux injectées circulent dans les pores du terrain sans que des phénomènes de réagencement des terrains ne soient produits du fait des faibles forces mises en jeu (pression d'injection limitée).

Actuellement, 47 doublets ou triplets de forages à 1800 m de profondeur exploitent la nappe du Dogger en région parisienne (nappe à environ 70°C, débits supérieurs à 200 m³/h) et une dizaine d'ouvrages en Aquitaine d'une profondeur entre 1000 et 1500 m, existent depuis les années 1980, sans qu'aucun phénomène de sismicité induite ne soit rapporté.

Ces éléments montrent qu'il est nécessaire de bien faire la différence entre les types de géothermie et leur relation aux risques de sismicité induite. Si la géothermie à Haute Température est sensible à ce phénomène, ce n'est pas le cas de la géothermie à Basse Température. Les cinquante années de recul disponibles en Île-de-France sur ce type de géothermie apportent une forte garantie en la matière.

Ainsi, le risque sismique étant nul, aucune mesure n'est prévue pour connaître la géologie du sous-sol qui serait impacté par les travaux et comprendre les phénomènes naturels, notamment sismiques, susceptibles d'être activés par les travaux, afin de minimiser leur probabilité, leur intensité ainsi que les risques de réapparition de tels phénomènes après leur survenance éventuelle.

3. Méthodes mises en œuvre pour connaître la géologie du sous-sol

La synthèse bibliographique réalisée pour connaître la géologie de la région permet d'appréhender les grandes structures géologiques mises en jeu ainsi que leur relation les unes par rapport aux autres. Les informations qui ont permis d'arriver à la compréhension géologique de la région sont tirées principalement des travaux menés par le BRGM dans la région Ile-de-France mais également les données issues des installations et puits géothermiques et pétroliers alentours (Saint-Denis, Villeneuve-la-Garenne 1, Villetaneuse, La Courneuve, ...) et des retours d'expériences de projets géothermiques similaires dans le Bassin de Paris.

Cette synthèse permet, en outre d'apprécier les qualités hydrogéologiques du réservoir du Dogger en estimant les valeurs de température, de transmissivité, de salinité et la profondeur du réservoir et d'estimer la valeur du débit mobilisable en surface pour alimenter les besoins en chaleur de l'usine. Cela permet un dimensionnement optimal des ouvrages (architecture conventionnelle, multidrain, forage en petit diamètre, en sur-diamètre, ...) et de limiter les incertitudes sur la qualité de la ressource.

Le projet est localisé dans la région Ile-de-France, largement exploitée pour la géothermie depuis plusieurs dizaines d'année. La structure du Bassin de Paris est bien connue : il n'est pas prévu dans le cadre de ce projet d'acquisition sismique ou d'autres études géophysiques supplémentaires.

4. Méthodes d'exploration envisagées dans le cadre des forages

Les forages des puits GBVN1, GBVN2, GBVN3 et GBVN4 vont permettre d'acquérir des données complémentaires afin d'affiner la géologie du sous-sol localement et de comprendre le comportement du Dogger.

4.1. Les tests de production

Pour chaque puits, des essais de débit auront lieu en phase terminale afin d'évaluer la productivité de l'aquifère. En effet, ces essais vont permettre d'établir les paramètres définitifs d'exploitation et de parfaire les réglages de l'asservissement et de l'alimentation. Ils pourront ensuite être réutilisés pour d'éventuels autres projets géothermiques futurs à proximité de celui de Villiers-sur-Marne/

Les pompages d'essais comporteront donc trois phases principales :

- Des essais par paliers, avant et après chaque acidification, de manière à établir l'index de productivité de l'ouvrage,
- Des essais de flowmétrie, avant acidification et après, visant à localiser les niveaux producteurs,
- Un essai de longue durée visant à éclairer sur les limites du réservoir, la transmissivité de ce dernier, et le facteur de skin de l'ouvrage. La durée de cet essai sera calibrée de manière à ce que le réservoir puisse être sollicité dans un rayon de l'ordre assez large.

4.2. Les diagraphies

Les diagraphies suivantes seront réalisées, pour chaque phase de forage :

- Diagraphies de forage (avancement, rotation, WOH, WOB¹, couple, débits pompes, paramètres boue...) et contrôle continu de trajectoire en phase de build-up, périodique en phase stabilisée.
- Diagraphies différées : **après chaque phase de forage** : diamètreur, Gamma naturel, sonique ou induction électrique et **pour le tubage de la phase précédente** : Composition de colonne (ITT...), thermométrie (cimentation étagée) et CBL²/VDL ou imagerie sonique type USIT. Pour les tubages en 13''3/8 et 9''5/8, face aux cimentations de densité 1,2, il sera systématiquement réalisé une diagraphie CBL et une diagraphie USIT.
- Après forage du Dogger (trou nu) : Trajectométrie finale, gamma naturel, porosité neutron + tentative de flowmétrie et thermométrie et pression de fond en phase d'essai de production.
- Deux tests de tenue en pression des tubages seront réalisés par forage (une dans le tubage 13''3/8, une dans le 9''5/8) avant reforage du sabot.

¹ WOH = Weight on hook = poids au crochet, WOB = Weight on bit = poids sur outil

² CBL = Cement Bond Logging = diagraphie de contrôle de cimentation

L'objectif des diagraphies est double. Elles visent à assurer l'état des puits, la qualité de la cimentation, le profil du puits, le contrôle de la trajectoire mais également de renseigner sur la géologie rencontrée. Ces données serviront également de base pour les futurs projets à venir dans le secteur.

Les diagraphies permettent également d'identifier les zones de fractures et d'appréhender le champ de contraintes.

4.3. Les rapports géologiques

En fin de forages, un rapport est établi, comprenant :

- Une coupe géologique du forage indiquant la cote exacte de la tête de puits, la profondeur, l'épaisseur et la nature des divers horizons géologiques traversés, les cotes (toit et mur) des niveaux aquifères traversés et du réservoir recherché (emplacement des niveaux productifs) ;
- Un plan positionnant avec précision la tête de puits et le fond du trou de forage ;
- Une coupe technique précise ;
- L'analyse physico-chimique, PVT et bactériologique du fluide géothermal ;
- Les résultats définitifs des essais réalisés ;
- Les diagraphies de cimentation et de réception des tubages.