Mémoire précisant les mesures mises en œuvre et 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.

La présente Annexe est le mémoire 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, en réponse à l'article 74 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.

1. Introduction à la géothermie profonde

La France métropolitaine possède des aquifères profonds dans ses bassins sédimentaires et fossés d'effondrement. Ils se situent essentiellement dans le sous-sol des bassins parisien et aquitain, des fossés rhénan et rhodanien, de la Limagne (Massif Central) et du Hainaut (région de Valenciennes et Maubeuge dans le département du Nord) (Cf. Figure suivante).

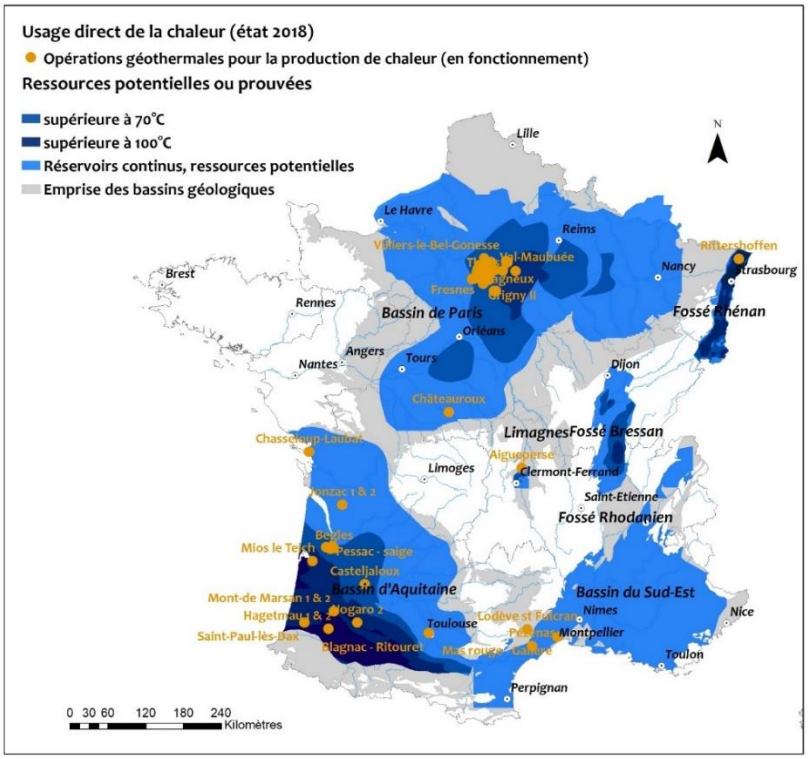

Figure 1 : Ressources en aquifères profonds en métropole et opérations (BRGM)

La géothermie profonde consiste à exploiter la ressource géothermale du sous-sol, à des profondeurs généralement supérieures ou égales à 1000 mètres, pour la production d'électricité et/ou de chaleur. Les réservoirs géothermiques présentent des caractéristiques assez différentes selon l'environnement

géologique et tectonique et l'on distingue généralement trois grandes catégories de systèmes géothermiques :

1. les aquifères en zones sédimentaires où le fluide géothermal, généralement en phase liquide, présente des températures variables entre environ 30°C et 150°C. **Le projet de Saint-Denis s'inscrit dans cette catégorie ;**
2. les réservoirs à dominante vapeur et liquide mixte, en roches sédimentaires, volcaniques ou métamorphiques fracturées, à haute température (> 150°C), associés aux phénomènes volcaniques (avec ou sans magmatisme) ;
3. les réservoirs en roches cristallines (socle) ou mixtes, denses et à haute température (entre 150°C et 200°C) caractérisées par l'absence ou par des volumes relativement faibles de fluide géothermal.

Les technologies nécessaires à l'exploitation de la ressource géothermale sont variables selon le type de réservoir cible, mais toutes requièrent la réalisation d'un ou plusieurs puits pour remonter le fluide géothermal à la surface, ainsi que d'un ou plusieurs puits pour l'injection ou la réinjection dans le réservoir.

1.1 La géothermie haute température ou 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 faire l'objet d'une valorisation de la chaleur en surface.

Ce type d'opération relève d'une autorisation ministérielle et traitée dans le Code Minier, dans la catégorie des opérations de puissance généralement supérieure à 20 MW. Cette géothermie s'adresse à des sites où des conditions particulières permettent de disposer dans le sous-sol de fluides 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 (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 pression importantes pour permettre la circulation des fluides dans les failles du sous-sol.

En métropole, à la frontière allemande, les opérations à haute température actuelles sont liées à l'existence d'une zone tectonique 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.

Le système de failles présent permet la circulation d'eaux très chaudes et qui explique la localisation des opérations de géothermie profonde dans le secteur alsacien (Soultz-Sous-Forêts, Illkirch-Graffenstaden, Rittershoffen, projets Fonroche à Vendenheim et Eckbolsheim).

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'y a été réalisé à ce jour.

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).

1.2 La géothermie de surface à « faible ou moyenne température »

Ce type de géothermie couvre le domaine allant de 0 à 2000 m de profondeur où il n'est pas recherché de contexte tectonique particulier. Ce sont les aquifères présents à plus ou moins grande profondeur qui sont exploités.

La température de l'eau souterraine augmentant avec la profondeur selon le gradient géothermique naturel du secteur (en moyenne 3°C/100 m en France). L'exemple du Bassin de paris est illustré sur la figure suivante.

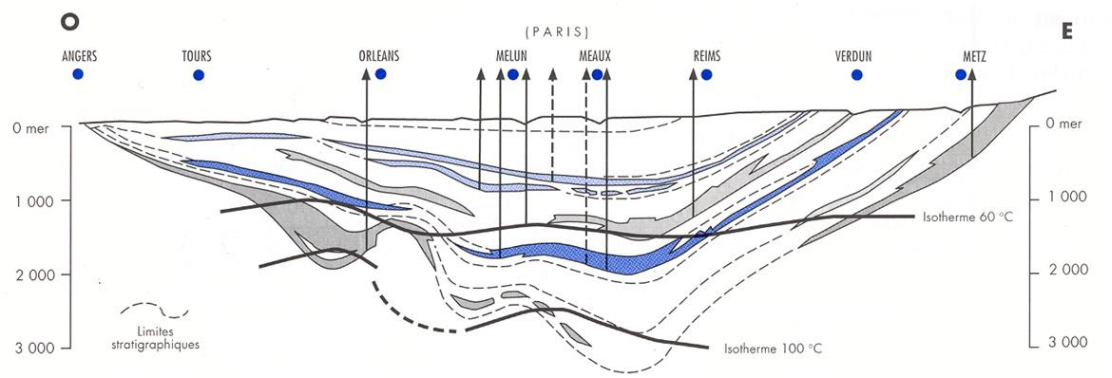

Figure 2 : Coupe et schéma du Bassin Parisien (BRGM)

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.

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 grand bassins sédimentaires (bassin parisien, bassin aquitain) où l'on peut rencontrer des nappes d'eau souterraines profondes circulant au sein des terrains perméables (sables, calcaires, dolomie …), sans que la présence de failles ne soit nécessaire pour permettre l'écoulement.

Le Bassin Parisien, où sera réalisé le projet de doublet géothermique au Dogger de Saint-Denis (93) est un bassin sédimentaire. Il s'agit d'un système de formation rocheuse sédimentaire peu profond (1 – 2 km) et perméable où le fluide géothermal peut circuler naturellement par porosité du milieu.

2. Le risque de sismicité anthropique dans le contexte de la géothermie

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 non tectoniques se développant en réponse aux opérations humaines.

Cette sismicité, inhérente au processus d'exploitation de la ressource géothermale, 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 du projet Fonroche à Vendenheim (67) auraient entrainé 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).

En Référence aux incidents sismiques survenus dans le département du Bas Rhin (commune de Vendenheim) début décembre 2020, ayant conduit, par arrêté, la préfète du département à prononcer l'arrêt des opérations de forage, de stimulation hydraulique et de test qui avaient été autorisées pour la société Fonroche géothermie.

Le fossé rhénan est l'une des régions européennes les plus actives d'un point de vue sismique. Pour autant, les incidents sismiques constatés à Vendenheim correspondent à une sismicité induite par les essais de production, 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 sont généralement considérés comme induits s'ils sont suffisamment proches, à la fois dans l'espace et dans le temps, de l'activité industrielle.

La région parisienne apparait comme une zone stable (bassin sédimentaire intracratonique faiblement tectonisé) sans sismique historique rapportée. Selon le décret n° 91-461 du 14 mai 1991 relatif à la prévention du risque sismique, la totalité de la région Ile-de-France est classée en zone 1 (Cf. Figure suivante), qui correspond à la catégorie du risque le plus faible (risque négligeable de séismes pouvant occasionner des dommages sévères).

Cette absence de système de failles, ainsi que les faibles pressions d'injection utilisées, expliquent qu'aucune sismicité induite n'ait été mise en évidence sur ce type de projets.

Les aquifères sédimentaires sont généralement exploités par doublets géothermiques, comme à Saint-Denis. Le doublet est un couple de puits, l'un injecteur et l'autre producteur, entre lesquels le fluide géothermal est mis en circulation à faibles pressions. Des stimulations chimiques (acidifications) peuvent être employées avant la mise en circulation, sans qu'aucun phénomène de sismicité induite n'ait été observé.

La géothermie au Dogger notamment en Ile de France est exploitée industriellement depuis les années 1970. 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 mise en jeu. Actuellement, une

cinquantaine de 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 m^3/h) et une dizaine d'ouvrages en Aquitaine, existent depuis les années 1980, sans qu'aucun phénomène de sismicité induite ne soit rapporté.

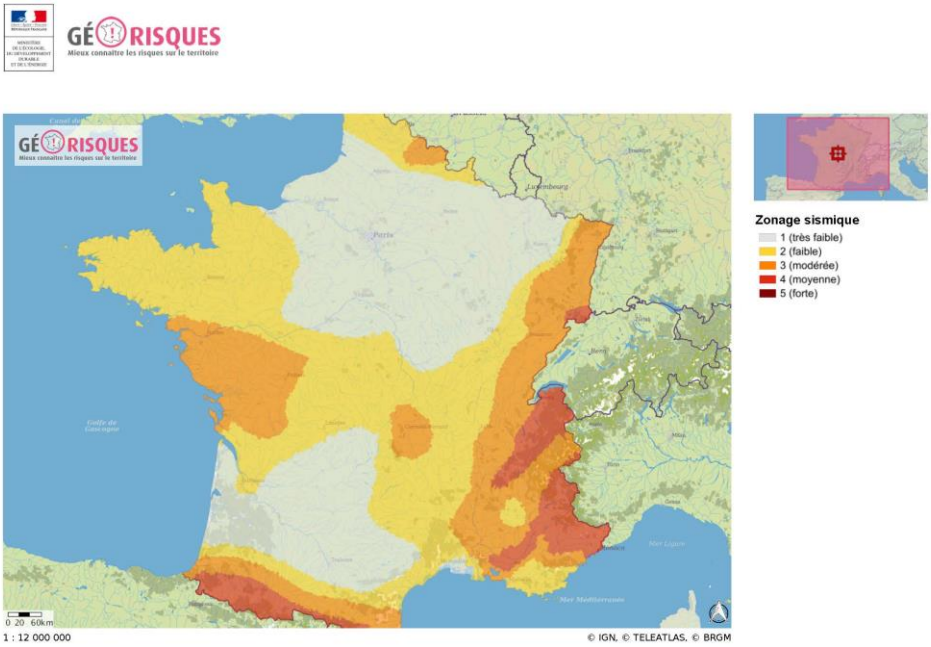

Figure 3 : Carte du risque sismique en France (géorisques.gouv.fr)

Le projet de Saint-Denis cible un réservoir géothermique de type aquifère sédimentaire, dans un contexte géologique très différent et non-comparable de celui du Fossé Rhénan. La technique envisagée est relativement proche de celle des forages d'eau potable, la capacité de production de la nappe est suffisamment développée naturellement sans qu'il soit nécessaire de l'améliorer artificiellement.

Elle diffère cependant par sa profondeur, ce qui induit des moyens matériels important pour sa mobilisation. Le projet du SMIREC consiste donc à exploiter le potentiel thermique de couches géologiques homogènes et stables mécaniquement du Dogger.

Le risque sismique n'impose donc pas de prescriptions particulières sur la commune de Saint-Denis. S'appuyant sur une expérience au Dogger éprouvée pendant plus de 40 ans, ce type d'opération n'a jamais fait apparaitre le moindre risque de micro-sismicité, tant lors de la réalisation que de l'exploitation. On rappellera également qu'aucune stimulation hydraulique n'est prévu pour ce type de géothermie.

Le projet n'est pas concerné par le risque de sismicité induite (Cf. Communication AFPG).

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

Du point de vue structural, la zone d'étude se trouve sur le flanc nord de l'anticlinal de Beynes Meudon et au cœur de la fosse de Saint-Denis où le pendage des couches géologiques du Dogger est faible et plonge vers le sud-est et où l'absence de phénomène tectonique majeur est observée.

L'aquifère du Dogger fait l'objet d'un suivi réglementaire de la ressource, de nombreuses recherches et est exploité dans le secteur depuis plus de 40 ans.

Le réservoir géothermique du Dogger est isolé par des formations marno-argileuses imperméables.

La nature même des travaux de forage permettra de mieux connaître la géologie du sous-sol et d'en comprendre les phénomènes naturels :

- Remontée des cuttings (débris issus de la foration) permettant de dresser une coupe géologique précise du sous-sol,
- Réalisation de diagraphies pour préciser les propriétés du sous-sol (densité, teneur en argiles, porosité etc.)
- Réalisation d'essai de puits et de pompage d'essai et d'essai d'injection pour connaitre les limites de l'aquifère, les propriétés hydrogéologiques des réservoirs, et l'identification de limites potentielles dans le sous-sol.

Le contexte géologique du projet géothermique de Saint-Denis est très bien appréhendé par la connaissance précise du sous-sol compte tenu des nombreux ouvrages existants à proximité. L'aquifère du Dogger a fait l'objet de nombreux travaux et d'exploitation de forages géothermiques sur le territoire francilien et de la Seine-Saint-Denis.