

### *3.5.2. Définition du volume d'exploitation*

L'épaisseur d'aquifère sollicitée est définie par deux côtes en mètres par rapport au sol (voir Chapitre 2.7.3) :

- La côte du sabot du tubage le moins profond (au toit du réservoir pour le puits GVZ2), soit à la côte prévisionnelle de 1 475 m de profondeur verticale (1 923m foré) ;
- La côte de fond du forage le plus profond (puits GVZ1), soit à la cote prévisionnelle de 1 600 m de profondeur verticale (2 280 m foré).

L'épaisseur d'aquifère sollicité prévisionnelle est estimée à 125 m. L'épaisseur finale sera définie dans le Dossier des Ouvrages Exécutés à la suite des travaux de forage.

Le volume d'exploitation est compris entre les plans horizontaux correspondant à ces deux côtes et a pour projection horizontale l'enveloppe convexe des gélules présentée en Figure 60 soit 5,86 km<sup>2</sup>. Le volume d'exploitation prévisionnelle serait d'environ 732,7 .10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

### 3.6. Dispositifs de mobilisation de la ressource

#### 3.6.1. Introduction

La mobilisation de la ressource géothermale locale s'articule succinctement selon le phasage suivant :

- Élaboration d'un programme de développement en accord avec l'adéquation entre la ressource géothermale (débit, température) attendue et les besoins du réseau de chaleur, objet des études d'APS/APD et les missions normalisées de maîtrise d'œuvre.
- Définition d'un schéma minier (type doublet), d'une architecture puits et d'une boucle géothermale (interface puits/réseau) aptes à sécuriser l'objectif de production (mission PRO).
- Affrètement d'un appareil et d'une dotation de forage appropriés dont l'empreinte au sol et la signature acoustique permettront de sélectionner un site de forage compatible avec les contraintes logistiques (accès, transports) et environnementales (habitats, végétation, faune) locales.
- Engagement des travaux de Génie Civil préparatoires à l'installation de l'appareil et de la dotation de forage.
- Réalisation du programme de forage, complétion et essais validant la ressource et son exploitation ultérieure.
- Établissement du cahier des charges des équipements, prestations et services requis par la mise en œuvre de la boucle géothermale.
- Réception des travaux et équipements.
- Mise en service du doublet géothermique de chauffage urbain.

Lors de ces deux phases, les paramètres prévisionnels d'exploitation des forages sont les suivants (Tableau 23). Le calcul de la puissance thermique maximum est présenté en (1).

**Tableau 23 : Paramètres prévisionnels d'exploitation.**

Température en tête de puits ( $T_{tdp}$ )	Température d'injection ( $T_{injection}$ )	Delta T	Débit maxi/moyen	Puissance thermique maxi ( $P_{th-max}$ )
63,5°C	24 °C	39,5°C	400/250 m <sup>3</sup> /h	18,3 MW

$$(1) P_{th-max}(Watt) = 1.161 * Q * (T_{tdp} - T_{injection}) \text{ où } T_{tdp} (\text{°C}), T_{injection} (\text{°C}) \text{ et } Q \left(\frac{m^3}{h}\right)$$

#### 3.6.2. Emprise au sol des travaux de forage et aménagement de la plateforme

L'emprise au sol de l'appareil de forage SMP 104, de capacité au crochet à 250 tonnes, sur le site retenu est représentée sur la Figure 61. L'implantation de la plateforme est commandée par des contraintes spécifiques au site (développés dans le Chapitre 4) qui déterminent la sélection d'un appareil de forage et d'une dotation adaptée afin de s'inscrire dans un périmètre autorisé.

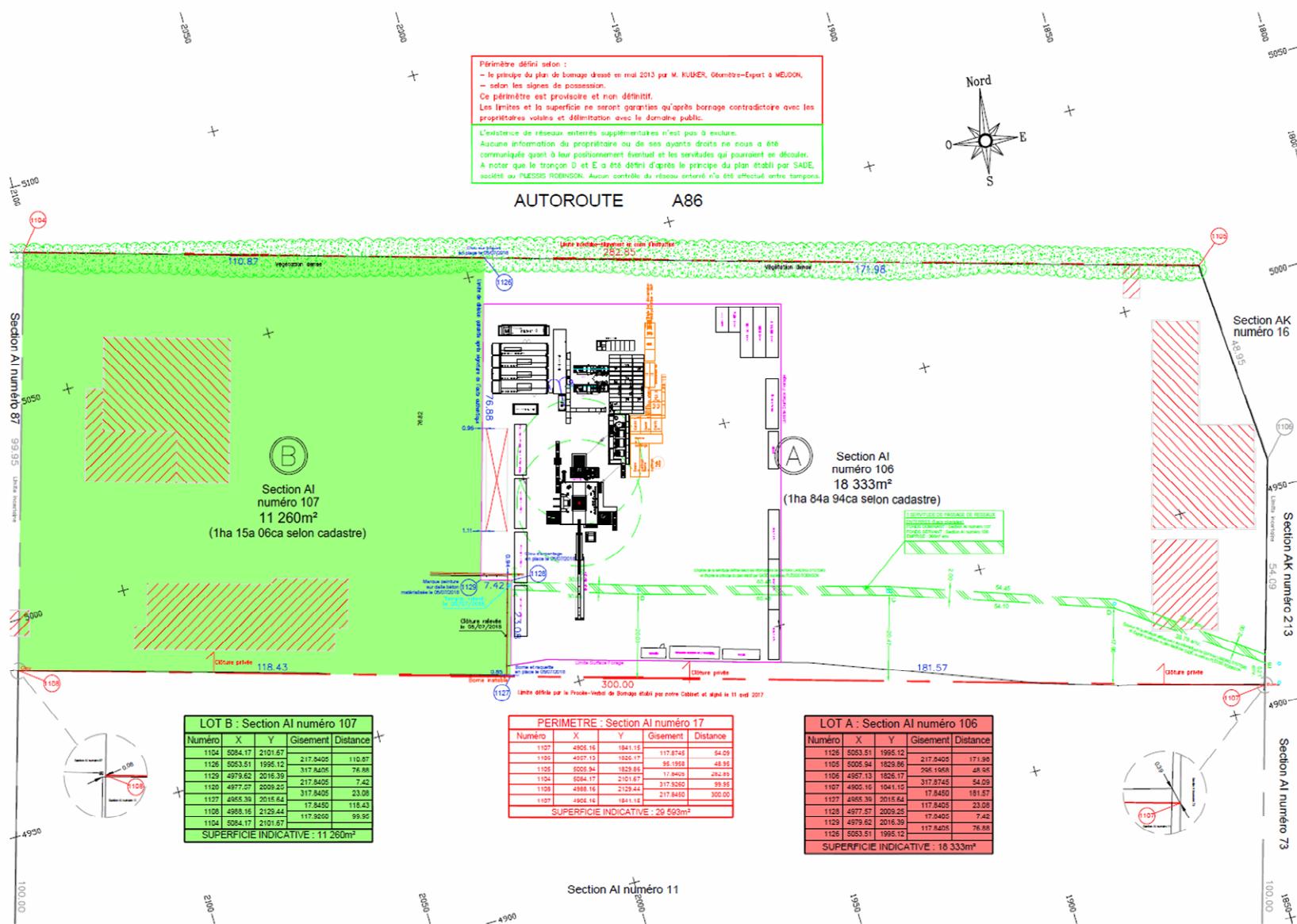


Figure 61 : Positionnement de l'appareil de forage SMP104 sur la tête de puits située le plus au Sud de la parcelle.

### 3.6.3. Description sommaire des ouvrages du sous-sol

Le profil des nouveaux puits et leur coupe technique prévisionnelle respective ont été définis à partir de la synthèse de la coupe géologique prévisionnelle (Tableau 9) et des résultats de la modélisation. Le déplacement latéral du point d'impact au réservoir par rapport à la verticale est de 1 250 mètres environ pour les deux puits.

Ce projet fait appel à la technologie du doublet géothermique, à plateforme unique et trajectoires déviées pour des puits multi drain. Succinctement on retrouve :

- Un puits de production tubé 9"5/8 avec :
  - Une double protection, tubée 20" x 13"3/8 jusqu'à 500 m/sol.
  - Une double protection, tubée 13"3/8 x 9"5/8, jusque 180 m sous les aquifères sensibles (eau douce) de l'Albien/Néocomien.
  - Une chambre de pompage 13"3/8 arrêtée à une profondeur de 450 m/sol (télescopage 9"5/8).
  - Une cimentation de l'annulaire tubage 20" x formation 26" jusqu'à la surface.
  - Une cimentation des entrefers 20" x 13"3/8 et 13"3/8 x 9"5/8 et de l'annulaire tubage 9"5/8 x formation 12"1/4.
  - Pour réservoir objectif le Dogger exploité en découvert via trois drains GVZ1, GVZ1-ST1 et GVZ1-ST2. Le premier drain pilote permettra à la suite de test d'évaluer les niveaux producteurs du réservoir. Les trajectoires des drains ST1 et ST2 seront ensuite affiné à la suite de ces tests et seront forés en dirigé avec un RSS.
  
- Un puits injecteur tubé 9"5/8 avec :
  - Une triple protection 20" x 13"3/8 x 9"5/8 jusqu'à 448 m/sol.
  - Une double protection, tubée 13"3/8 x 9"5/8, jusque 180 m sous l'Albien/Néocomien.
  - Une cimentation de l'annulaire tubage 20" x formation 26" jusqu'à la surface.
  - Une cimentation deux étages de l'entrefer 13"3/8 x 9"5/8 et de l'annulaire tubage 9"5/8 x formation 12"1/4.
  - Pour réservoir objectif le Dogger injecté en découvert via trois drains GVZ2, GVZ2-ST1 et GVZ2-ST. Le premier drain pilote permettra à la suite de test d'évaluer les niveaux producteurs du réservoir (donc une plus forte injectivité). Les trajectoires des drains ST1 et ST2 seront ensuite affiné à la suite de ces tests et seront forés en dirigé avec un RSS.

En termes de trajectoire on retrouve :

- Pour le puit GVZ1 :
  - Une phase verticale entre la surface et 511 m de profondeur.
  - Une phase durant laquelle l'inclinaison croît progressivement jusqu'à 50° par rapport à la verticale à 1261m MD, à raison de 2° par 30 mètres.
  - Une phase allant de 1261 m MD à 1482 m MD où cet angle de 50° est maintenu.
  - Une quatrième phase durant laquelle l'inclinaison croît progressivement jusqu'à 80° par rapport à la verticale jusqu'à 1932m MD, à raison de 2° par 30 mètres.

- Enfin après une section allant jusqu'à 2012 m MD où l'angle de 80 degrés est maintenu, un drop off est réalisé à raison de 2° par 30 mètres pour revenir à un angle de 62° environ à 2282 m MD pour le premier drain pilote. Les autres drains seront forés en SideTrack (ST), en trou ouvert, sous le sabot du dernier cuvelage, à l'aide d'un outil de déviation (Moteur ou RSS). Dans ce cas le drain doit être démarré vers le bas (en baissant l'inclinaison) afin de sortir du trou pilote avant de remonter en inclinaison et tourner en Azimut. Ce procédé est éprouvé et peu risqué (voir Chapitre 3.4).
- Pour le puit GVZ2 :
  - Une phase verticale entre la surface et 487 m de profondeur.
  - Une phase durant laquelle l'inclinaison croît progressivement jusqu'à 50° par rapport à la verticale à 1237m MD, à raison de 2° par 30 mètres.
  - Une phase allant de 1237 m MD à 1459 m MD où cet angle de 50° est maintenu.
  - Une quatrième phase durant laquelle l'inclinaison croît progressivement jusqu'à 80° par rapport à la verticale jusqu'à 1909m MD, à raison de 2° par 30 mètres.
  - Enfin après une section allant jusqu'à 1989 m MD où l'angle de 80 degrés est maintenu, un drop off est réalisé à raison de 2° par 30 mètres pour revenir à un angle de 62° environ à 2264 m MD pour le premier drain pilote. Les autres drains seront forés en SideTrack (ST), en trou ouvert, sous le sabot du dernier cuvelage, à l'aide d'un outil de déviation (Moteur ou RSS). Dans ce cas le drain doit être démarré vers le bas (en baissant l'inclinaison) afin de sortir du trou pilote avant de remonter en inclinaison et tourner en Azimut. Ce procédé est éprouvé et peu risqué (voir Chapitre 3.4).

Le programme de forage est développé dans la demande d'autorisation d'ouverture de travaux de forage (Chapitre 4). Les coupes prévisionnelles (Figure 62 et Figure 63) tiennent compte des éléments de dimensionnement évalués en relation avec le cahier des charges de l'exploitation (réglementation sur l'eau, puissance, entretien, pérennité etc.). La protection de l'aquifère stratégique de l'Albien/Néocomien est assurée par le double cuvelage 13''<sup>3/8</sup> et 9''<sup>5/8</sup>.



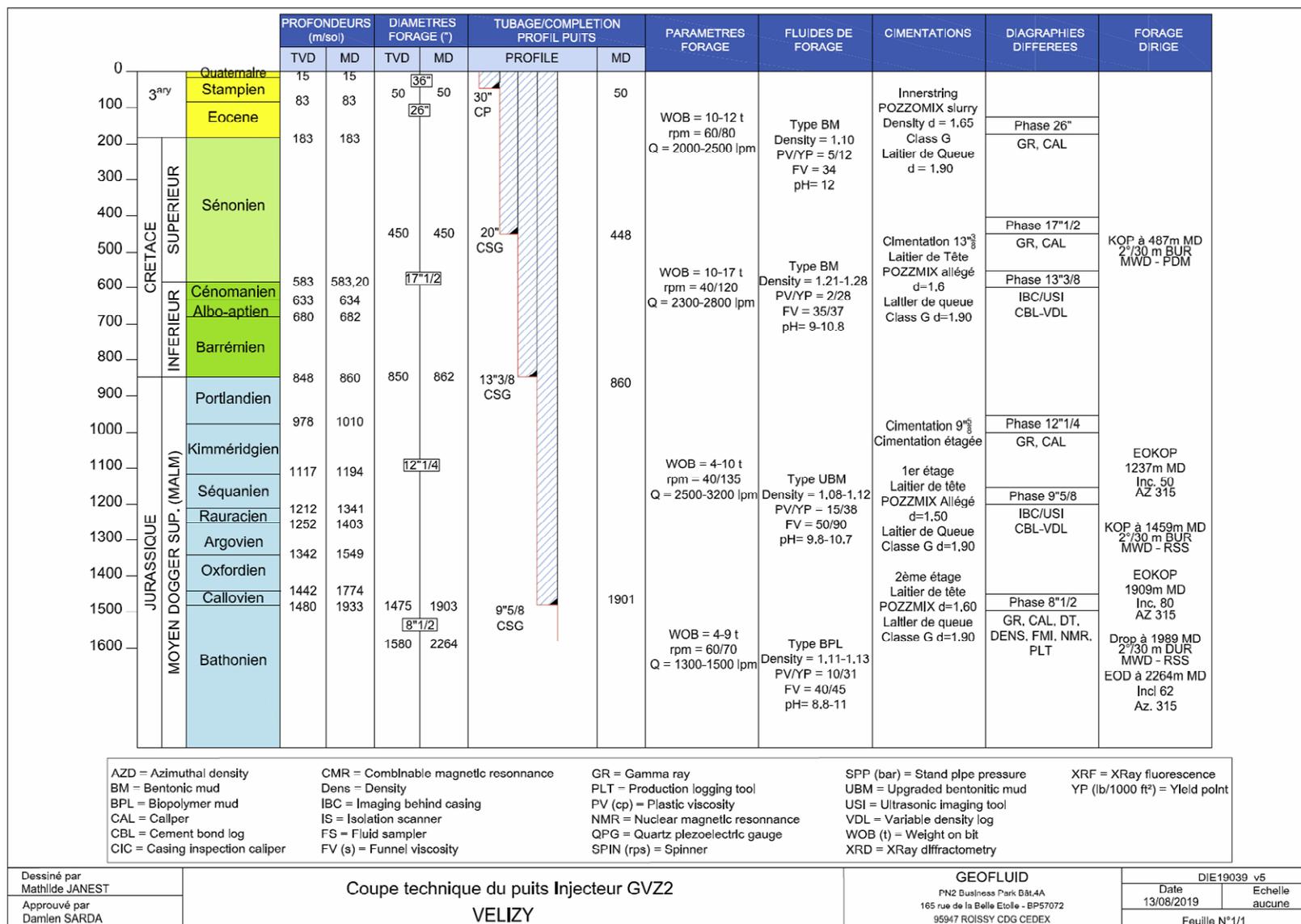


Figure 63 : Coupe technique du puits GVZ2.



### 3.6.4. Description et fonctionnement de la boucle géothermale

#### 3.6.4.1. Généralités

La boucle géothermale, ou circuit primaire sera constituée d'un doublet de forages (GVZ1 producteur et GVZ2 injecteur) permettant l'extraction d'eau géothermale puis sa réinjection dans le même aquifère. La chaleur est extraite de l'eau géothermale au moyen d'un échangeur de chaleur situé entre le circuit primaire ou boucle géothermale (puits, équipements de tête de puits, conduite de surface, filtres, échangeurs) et le circuit secondaire ou boucle géothermique (réseau de distribution de chaleur).

#### 3.6.4.2. Les équipements de complétion

Les équipements nécessaires à la mise en production de la boucle géothermale sont décrits succinctement par sous-ensembles fonctionnels, depuis le puits d'exhaure jusqu'au puits d'injection dans le Tableau 24. Dans ce tableau sont présentées également, les durées de vie moyenne des équipements, données d'entrée indispensable à l'évaluation des coûts de gros entretien exposés dans le Chapitre 4.

Les échangeurs de chaleur constituent la limite entre la boucle géothermale et la boucle géothermique.

Les spécifications techniques des équipements seront déterminées pour un fonctionnement au débit maximum de 400 m<sup>3</sup>/h pour le puits GVZ1, et une température exhaure de 63,5°C.

Les sous-ensembles fonctionnels sont les suivants :

- **Pour ce qui concerne les équipements du sous-sol (jusqu'en têtes de puits) :**
  - Un dispositif de traitement anticorrosion en fond de puits ;
  - Un groupe électropompe de production immergée ;
- **Pour ce qui concerne les équipements situés en surface (boucle géothermale) :**
  - Une station d'injection du traitement anticorrosion ;
  - Des conduites de surface, filtres et robinetterie jusqu'à l'échangeur de chaleur ;
  - Des équipements électriques d'alimentation du groupe de pompage de réinjection depuis le Tableau Général Basse Tension (TGBT) ;
  - Des échangeurs de chaleur à plaques ;
  - Un groupe de pompage de réinjection ;
  - Des conduites de surface et robinetterie entre échangeur et les têtes de puits d'injections ;
  - Une régulation et un contrôle des puits, des installations de surface et du fluide.

Les caractéristiques des équipements fixes de la boucle géothermale (puits, équipements de tête de puits, dispositif de traitement inhibiteur, conduite de surface, filtres, échangeurs) seront déterminées

pour résister aux contraintes physiques et chimiques des fluides (eau géothermale, inhibiteur de corrosion) et limiter les pertes de charge.

Les caractéristiques des éléments de pompage de la boucle géothermale (pompes et variateurs associés) seront déterminées pour réguler la production d'eau géothermale en fonction des besoins en chaleur. Leur dimensionnement sera tel qu'il permettra d'anticiper une possible dégradation des caractéristiques des puits par augmentation des pertes de charge.

La durée de vie des équipements d'une boucle géothermale va dépendre de plusieurs facteurs :

- La qualité des matériels à l'achat ;
- Le choix de matériaux adaptés à la corrosivité du fluide géothermal ;
- La maintenance et la conduite des équipements ;
- L'efficacité du traitement inhibiteur de corrosion ;
- Les caractéristiques techniques des équipements, qui seront précisées au stade des études de projet.

**Tableau 24 : Descriptif sommaire des équipements de la boucle sous-sol du doublet de Vélizy-Villacoublay et estimation des fréquences de renouvellement.**

Sous-ensembles fonctionnels	Fonction	Durée de vie moyenne
Dispositif d'injection d'inhibiteur en fond de puits - Station de traitement associée	Lutter contre les phénomènes de corrosion et de dépôts dans les puits et dans les installations de surface.	10 ans
Groupe électropompe de production	Augmenter le débit artésien naturel au débit souhaité.	4 ans
Régulation et contrôle des puits, des installations de surface et du fluide	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Régulation des pressions et des débits en fonction des besoins.</li> <li>- Sécurité.</li> <li>- Contrôle des paramètres du fluide.</li> </ul>	15 ans
Équipements électriques d'alimentation depuis le tableau TGBT	Alimentation électrique du groupe de pompage de production	20 ans
Filtration réseau géothermal	Éliminer des éléments pouvant réduire la durée de vie des échangeurs.	10 ans
Échangeurs de chaleur à plaques titane	Transférer l'énergie thermique du fluide primaire (réseau géothermal) au fluide secondaire (réseau géothermique).	20 ans
Groupe de pompage de réinjection et équipements électriques d'alimentation depuis le TGBT	Réinjecter la totalité du volume extrait. Vaincre les pertes de charge cumulées des tubages d'injection et du réservoir.	20 ans
Réseaux d'eau géothermale de surface	Relier les deux forages du doublet en traversant les échangeurs de chaleur	25-30 ans

### 3.6.5. Contraintes liées au fluide

#### 3.6.5.1. *Corrosion*

La nature agressive de l'eau du Dogger est en partie due à sa composition chlorurée sodique avec une salinité de l'ordre de 27 g/l (10 g/l à 20 g/l attendu sur ce site), qui lui donne un caractère corrosif. Des facteurs aggravants de la corrosion tels que l'activité bactérienne ou la teneur en sulfure, sont connus dans cet aquifère. La présence de gaz est également dommageable aux équipements, dès lors qu'un fonctionnement au-dessus de la pression de point de bulle n'est pas respecté.

Le suivi de la corrosion sur les doublets est réalisé au moyen de coupons témoins immergés dans le fluide géothermal et dont la pesée différentielle (avant et après séjour dans l'eau géothermale), tous les 3 mois, permet une estimation de la vitesse moyenne de corrosion des tubages sur la durée considérée. La corrosivité de l'eau du Dogger non traitée est de l'ordre de quelques dixièmes à quelques mm/an sur l'acier au carbone.

La mise en œuvre d'un traitement par inhibiteur de corrosion, dès la mise en service des installations, dans le puits de production est une nécessité dans le cas de réalisation de puits en acier. Il permet de diviser par un facteur d'environ 5 à 10 les vitesses de corrosion sur l'acier au carbone des cuvelages. Ce dispositif consiste en un tube de traitement de petit diamètre descendu dans le puits producteur jusqu'au sabot du tubage et injectant en continu un produit inhibiteur. Il est relié en surface à une station d'injection dont le fonctionnement est asservi au débit d'exploitation.

La mise en place de ce traitement ne justifie pas l'abandon de certaines règles de l'Art en matière d'exploitation, telles que le respect de la pression de point de bulle ou le choix de matériaux adéquats par exemple.

En outre, les processus de corrosion constituent un risque vis-à-vis de l'intégrité des cuvelages et donc de pollution des aquifères sus-jacents au Dogger, en particulier celui de l'Albien. Au droit de cet aquifère, un double tubage est mis en place et l'espace annulaire est cimenté afin de constituer une barrière étanche et minimiser ainsi le risque de perforation des cuvelages.

En tout état de cause, les paramètres de la corrosion font l'objet, en cours d'exploitation, d'un suivi rigoureux dont le contenu et la fréquence sont intégrés à l'arrêté préfectoral d'exploitation.

#### 3.6.5.2. *Risques de dépôts*

La composition chimique de l'eau du Dogger induit un risque de dépôts de sulfures de fer et de carbonates (de fer et de calcium), dès lors que l'eau est refroidie et/ou dégazée.

Le niveau de risque est quantifié par l'indice de saturation du fluide vis-à-vis de chaque phase minérale susceptible de précipiter. Cet indice évolue en fonction du pH, de la température et de l'état d'oxydation de l'eau (potentiel redox). Le maintien d'une pression, en tout point de l'installation, supérieure à la pression de point de bulle, permet de limiter ce risque.

#### 3.6.5.3. *Filtration*

Une filtration des fines particules doit être mise en place en entrée de centrale et si besoin en entrée des échangeurs afin d'éviter le colmatage de ces derniers.

En effet, à la production, l'eau du Dogger véhicule des particules dont la granulométrie et la quantité varient en fonction de la lithologie des niveaux producteurs et des vitesses d'écoulement dans la formation et les cuvelages.

A la réinjection, l'aquifère calcaire est relativement tolérant quant à la teneur en particules du fluide.

### **3.7. Contrôles périodiques et suivi de l'exploitation**

Le contrôle se conformera à l'arrêté préfectoral autorisant l'exploitation. Les permis actuels exigent les mesures exposées ci-après.

#### **3.7.1. Contrôle périodique de l'installation et des équipements**

Les installations et équipements constituant la boucle géothermale doivent être maintenus en permanence en état de propreté et de bon fonctionnement.

Un suivi des paramètres électromécaniques des équipements de production constituant la boucle géothermale (variateurs de fréquence, vannes, échangeurs...) sera réalisé.

Ces auscultations permettent de détecter des dérives ou l'évolution de paramètres symptomatiques de dysfonctionnements de matériel ou l'évolution des paramètres hydrodynamiques de l'ensemble réservoir/puits. Toute dérive fait l'objet d'une analyse conduisant, si besoin, à l'organisation d'une intervention d'entretien ou de renouvellement.

Les éléments suivants sont rapportés et comparés avec ceux de l'auscultation précédente tous les trois mois :

- La productivité des puits d'exhaure (niveau hydrodynamique et rabattement) ;
- L'injectivité du puits d'injection ;
- L'état du groupe de pompage d'injection (consommation électrique, puissance, rendement) ;

Chaque intervention sur site fera l'objet d'un rapport détaillé où seront reportées les mesures réalisées, les observations particulières, les recommandations et toute suggestion relative à un éventuel désordre. Le rapport sera diffusé à la DRIEE, au maître d'ouvrage et aux entreprises impliquées dans l'exploitation.

Par ailleurs, un contrôle régulier des éléments suivants sera réalisé par l'exploitant :

- Le bilan thermique des échangeurs (efficacité, pertes de charge) ;
- L'état des dispositifs de sécurité et de mesure : vannes de barrage en tête de puits, clapets anti-retour, manomètres, thermomètres...
- L'état des régulations.

### 3.8. Contrôles périodiques de la ressource

L'exploitant de surface réalise quotidiennement un relevé des débits, températures, pressions et de l'énergie thermique transférée au réseau. Cette surveillance permet de s'assurer du bon fonctionnement des installations et d'optimiser l'appoint sur le réseau. Les données sont enregistrées soit de façon numérique, soit dans un registre papier. Elles sont ensuite mises à disposition sur la base de données en ligne *Gestion du Dogger* du BRGM, par envoi trimestriel du tableau suivant complété (Tableau 25).

**Tableau 25 : Tableau de suivi des paramètres d'exploitation, à envoyer chaque trimestre au BRGM**

Opération géothermique de :  
Informations/Observations sur les conditions d'exploitation

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
jour et heure (jj/mm/aaaa hh:mm)	Flag état fonctionnement de la boucle GTH/On-Off : 1=OK ; 2=indisponible ou non représentatif ; - 1=faux ou incohérent	Pression Aspiration Production /Pap/bar	Pression Refoulement Production/Pp/bar	Pression Aspiration Injection /Pai/bar	Pression Aspiration Injection /Pai2/bar	Pression Refoulement Injection/Pi/bar	Pression Refoulement Injection/Pi2/bar	Température extérieure/Text/°C	Température de Production/Tp/°C
commentaires				si puits injecteur unique d'un doublet ou 1er puits injecteur d'un triplet	si second puits injecteur d'un triplet	si puits injecteur unique d'un doublet ou 1er puits injecteur d'un triplet	si second puits injecteur d'un triplet		

0	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
jour et heure (jj/mm/aaaa hh:mm)	Température supplémentaire 1 - Départ réseau T1/°C	Température supplémentaire 2 - Retour réseau T2/°C	Température d'Injection/Ti/°C	Puissance Electrique Production/Wp/kW	Puissance Electrique Injection/Wi/kW	Puissance Electrique Injection/Wi2/kW	Débit Géothermal de Production Qp/m <sup>3</sup> /h	Débit Géothermal d'Injection Qi1/m <sup>3</sup> /h	Débit Géothermal d'Injection Qi2/m <sup>3</sup> /h	Sonde de Corrosion/Cor/mm/an
commentaires					si puits injecteur unique d'un doublet ou 1er puits injecteur d'un triplet	si second puits injecteur d'un triplet		premier puits injecteur d'un triplet	second puits injecteur d'un triplet	

Tous les évènements dont les interventions telles que les nettoyages de filtre, les contrôles particuliers et les incidents survenus sur la boucle géothermale, y sont également enregistrés.

Les mesures, les enregistrements et les évènements relevés au cours des cinq dernières années sont tenus à la disposition des agents de la DRIEE. Ces données doivent lui être transmises annuellement et une synthèse trimestrielle doit être produite.

### 3.8.1. Contrôles périodiques des ouvrages

#### 3.8.1.1. *Corrosion*

En complément du suivi chimique des paramètres indicateurs de la corrosion (fer et sulfures), le suivi de la corrosion sur ce doublet géothermal sera réalisé au moyen de coupons témoins immergés dans le fluide géothermal et dont la pesée différentielle (avant et après séjour dans l'eau géothermale) tous les 3 mois permet une estimation de la vitesse moyenne de corrosion des tubages sur la durée considérée. Les coupons témoins sont réalisés dans un métal de même nuance que le tubage équipant les puits géothermiques. Ils permettent donc de simuler l'effet de la corrosion de l'eau géothermale.

Une estimation de la cinétique des phénomènes de corrosion sera présentée tous les trois mois à la DRIEE pour l'estimation de la cinétique des phénomènes de corrosion/dépôts dans la partie de la boucle en surface.

#### 3.8.1.2. *Suivi hydrodynamique des puits*

L'objectif du contrôle des caractéristiques des ouvrages et équipements de pompage est d'identifier des variations de fonctionnement et d'en diagnostiquer les origines possibles.

Les mesures des caractéristiques des puits et leurs évolutions sont les principaux indicateurs de l'état des puits et des performances du réservoir.

Les mesures de consommations, puissance électriques et rendement des pompes informent sur le fonctionnement des équipements de pompage. Ces mesures sont alors complétées par des mesures trimestrielles de pertes de charge en surface afin d'identifier des encrassements éventuels qui auraient un impact sur les performances des équipements.

#### 3.8.1.3. *Etat des tubages et principes de diagraphies différées*

Le principe d'une diagraphie est de faire remonter à faible vitesse le long du tubage un outil de mesure afin de mesurer les variations d'épaisseur du tubage dues aux dépôts ou à la corrosion.

Les parois des tubages des puits sont maintenues dans un état de surface suffisant pour assurer la validité des contrôles visés ci-dessous. Dans l'éventualité où l'épaisseur des dépôts sur les parois des tubages dépasse 2 cm, le titulaire procède au nettoyage des puits ou adresse au préfet des Yvelines et à la DRIEE un argumentaire justifiant le report de l'opération de nettoyage à une échéance donnée.

#### **Calibration des tubages**

Classiquement, pour vérifier l'état des tubages, ce sont les diagraphies de diamétrage qui sont utilisées. Elles mettent en œuvre des outils multi bras (40 ou 60 bras pour les plus courants) qui sont descendus au fond des puits et communiquent en surface, via une télémétrie et un câble de suspension, les valeurs des rayons du tubage. Ces mesures permettent de mesurer les phénomènes de corrosion et de dépôts pouvant affecter les puits.

Les inspections sont réalisées tous les 3 ans et à l'issue de chaque opération de nettoyage des parois sur les puits d'injection et tous les 5 ans sur les puits de production (ainsi qu'à l'occasion d'une

opération de remontée d'équipements tels que la pompe, le tube d'injection d'inhibiteur si le dernier contrôle date de plus de 3 ans, ou après chaque opération de nettoyage des parois).

### **Contrôle de cimentation**

A la demande de la DRIEE pourront être mis en œuvre des diagraphies de contrôle de cimentations des annulaires entre tubages et formations et entrefers entre deux tubages mettant en œuvre des outils de type CBL-VDL ou imageurs USIT/URS.

Les comptes rendus de ces différentes diagraphies sont diffusés dans un délai de deux mois après leur réalisation au maître d'ouvrage et aux entreprises impliquées dans l'exploitation et le suivi ainsi qu'à la DRIEE.

### ***3.8.2. Contrôles périodiques du fluide géothermal***

L'objectif du suivi chimique de la qualité du fluide géothermal est d'identifier d'éventuels problèmes survenant en sous-sol à partir de mesures faites en surface.

Les paramètres physico-chimiques, mesurés sur site, sont les premiers indicateurs de stabilité ou d'évolutions des propriétés de l'eau géothermale produite. Les mesures des teneurs en ions majeurs, réalisées en laboratoire, complètent ces mesures en quantifiant pour chaque ion l'évolution de sa teneur dans l'eau géothermale. La mesure des gaz dissous contribue à l'évaluation des modifications des propriétés de l'eau géothermale.

Les mesures des éléments significatifs de la corrosion (fer et soufre), la recherche bactériologique ainsi que la mesure des teneurs en matières en suspension informent sur l'évolution des phénomènes de corrosion/dépôts affectant le puits producteur et par conséquence le puits injecteur.

Les analyses physico-chimiques et bactériologiques seront réalisées selon la fréquence présentée dans le Tableau 26.

**Tableau 26 : Fréquence des contrôles périodiques des paramètres physico-chimiques du fluide géothermal**

<b>Paramètres</b>	<b>Périodicité</b>
Fer total et dissous, sulfure, mercaptans Température, pH, Eh, conductivité	6 fois par an
SiO <sub>2</sub> , Na, Ca, K, Mg, HCO <sub>3</sub> , Cl, SO <sub>4</sub> , Mn, NH <sub>4</sub> , Sr, F Comptage des particules microniques – Mesure de la filtrabilité et des matières en suspension Détermination de la présence de bactéries sulfatoréductrices et de ferrobactéries	3 fois par an
Mesure des teneurs en gaz libres et dissous : N <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, CO <sub>2</sub> Recherche des traces d'O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> – Contrôle de la valeur du point de bulle Détermination du rapport gaz/liquide (GLR)	Une fois par an

A l'issue de chaque série de mesures, les éléments sont rapportés et comparés avec ceux de la visite précédente. Les mesures sont interprétées en termes de :

- Variation de la composition chimique du fluide et notamment de sa conformité avec les caractéristiques de l'eau du Dogger au droit du site ;
- Évolution de la quantité et de la qualité du gaz et implication sur les conditions d'exploitation ;
- Examen des indicateurs de corrosion/dépôts ;
- Évolution de la charge solide ;
- Nature et abondance des colonies bactériennes.

Les interprétations conduisent, selon les cas, à des mesures correctives d'exploitation ou à des diagnostics de désordres nécessitant des actions curatives.

Le rapport sera diffusé trimestriellement à la DRIEE, au maître d'ouvrage et aux entreprises impliquées dans l'exploitation.

### 3.9. Conditions d'arrêt d'exploitation du gîte géothermique (pour chacun des puits)

Trois cas d'arrêt d'exploitation peuvent survenir :

- Si, en fin de travaux de forage, après stimulation du réservoir, les tests de production produisent des résultats insuffisants, ceux-ci ne pouvant être améliorés par les moyens disponibles ; l'exploitant peut décider de mettre à profit la présence de l'appareil de forage sur le site pour procéder à la fermeture de l'ouvrage. Dans ce cas, l'exploitant fait parvenir, suffisamment à l'avance, au directeur régional de l'industrie, de la recherche et de l'environnement le programme définitif de fermeture avec l'ensemble des éléments lui permettant de juger de l'efficacité des dispositions prévues.
- Si la température en tête de puits de production ou la productivité du puits producteur chute de manière importante, de telle sorte que la chaleur géothermale n'est plus valorisable et compétitive par rapport à des modes de production d'énergie conventionnels ;
- Si l'état des puits est tel qu'il ne permet plus d'assurer la production de la ressource géothermale dans le respect des normes environnementales requises, sans qu'une solution technique et économique soit envisageable.

Une déclaration d'arrêt d'exploitation et une procédure d'abandon et de sécurisation des ouvrages doivent alors être adressées au Préfet par le maître d'ouvrage.

La décision d'abandon d'un ou de plusieurs puits prend en compte des mesures de préventions des risques pour les aquifères superficiels, qui impliquent des protocoles de cimentation ad hoc.

Cette déclaration sera accompagnée des éléments suivants :

- Un résumé des conditions conduisant à la décision de fermeture du ou des puits ;
- Un plan de position des ouvrages concernés et leur coupe technique avant rebouchage ;
- La procédure d'abandon de puits appliquée (coupe après rebouchage) ;
- Les mesures de prévention des risques identifiées, notamment celles concernant la protection des aquifères superficiels ;

### 3.9.1. Protocoles d'abandon

Avant de réaliser la cimentation des tubages au droit des zones à risque, en vue de l'abandon du puits, il est indispensable d'effectuer le curage des puits afin de déterminer l'état complet de l'acier des cuvelages (sous dépôts) et de placer judicieusement les bouchons de ciment.

Le cas échéant et en fonction de la qualité de la cimentation des cuvelages au droit de l'aquifère sensible de l'Albien / Néocomien, des bouchons supplémentaires peuvent être mis en place.

L'abandon sera réalisé dans le respect des règles de l'art en matière d'abandon de puits profonds et dans les conditions optimales de sécurité par rapport à la protection des aquifères sensibles, en évitant par conséquent toutes connexions hydrauliques entre aquifères.

*Exemple de programme d'abandon type dans le cas d'un puits dont l'intégrité du tubage est assurée :*

- Neutralisation de l'artésianisme du puits,
- Installation de l'appareil de workover et de sa dotation,
- Nettoyage hydromécanique de la phase tubée,
- Diagraphies diamétrage et CBL-VDL du tubage,
- Mise en place d'un gel visqueux colmatant dans le découvert ou mise en place d'un Bridge Plug au sabot du tubage en fond de puits,
- Mise en place de bouchons de ciment vis-à-vis des aquifères producteurs ou cimentation totale du puits avec un coiled tubing,
- Découpe de la *casing head* et soudure d'une plaque de fermeture.

Les travaux de curage représentent à eux seuls la majeure partie du coût global d'abandon. Ces coûts prennent en compte l'ensemble des travaux d'abandon des ouvrages qui nécessitent :

- l'amené-repli et les charges opérationnelles d'un appareil de forage sur site ;
- les coûts d'ingénierie et de supervision des travaux.

Les coûts s'élèvent habituellement à **690 000 € HT** par puits soit **1 380 000 € HT** pour un doublet.

Pour la remise en état du site les têtes de puits de production et d'injection sont arasées à hauteur des *casing heads*, une bride pleine est posée et les pompes vide caves et échelles d'accès sont retirées.

Les caves sont comblées par du gravier, une couche géotextile et complétées sur les 50 cm supérieurs par une grave béton, éventuellement coiffée par un revêtement bitumé à niveau de la dalle béton de la plateforme de forage.

Concernant la conduite géothermale, il est généralement procédé à l'enlèvement de la conduite et au comblement du caniveau par du gravier et, le cas échéant par une grave béton.

Concernant la centrale géothermale proprement dite, enfin il est procédé au démantèlement des unités et équipements spécifiques à la géothermie, à leur réutilisation/revente éventuelle, sinon à leur destruction assortie d'un recyclage pour les matériaux/métaux récupérables sur un site conforme à la réglementation industrielle et environnementale en vigueur et agréée par l'administration de tutelle compétente.

Tout cela est réalisé afin de restituer le site dans son état initial.



# **4. DEMANDE D'AUTORISATION D'OUVERTURE DE TRAVAUX DE FORAGE (DOUBLET)**

#### 4.1. Mémoire exposant les caractéristiques principales des travaux prévus pour la réalisation des puits GVZ1 et GVZ2.

Ce chapitre est consacré à la présentation du programme technique de réalisation des puits GVZ1 et GVZ2, appartenant au futur doublet de Vélizy-Villacoublay.

Les contextes géologique et hydrogéologique ont été présentés précédemment (Chapitre 3).

Ce projet de Vélizy - Villacoublay permettra de concrétiser le concept d'architecture puits multidrains qui constituera **une première mondiale en ingénierie géothermique**. L'objectif étant d'atteindre une productivité maximale de 400 m<sup>3</sup>/h, avec un rabattement en pression inférieur à 25 bars, dans un contexte géologique de basse transmissivité de l'aquifère du Dogger, mis en évidence par les quelques forages de l'Ouest du bassin Parisien. Ce projet participera également à améliorer les connaissances du réservoir Dogger dans cette partie du bassin qui reste encore peu explorée.

Comme mentionné dans le Chapitre 2.5, deux programmes de forages ont été réalisés. Le premier dit « industriel » comprend le forage des deux puits GVZ1 et GVZ2 jusqu'au toit du Dogger ainsi que le forage de l'ensemble des drains dans le réservoir. Le programme de test et de diagraphe reste un programme classique de doublet géothermique dans le réservoir du Dogger dans le bassin Parisien. Ce programme de forage s'étendrait sur 128 jours (mobilisation et démobilitation de l'appareil de forage incluses) l'ensemble des drains étant testés à la fin des forages des puits GVZ1 et GVZ2, soit seulement 2 tests de productions.

Le second programme dit « démonstrateur » se veut beaucoup plus complet et innovant et se réalisera dans la mesure où une subvention innovation venait à lui être attribué. Il permettrait non seulement de réduire au maximum les risques induits par la réalisation des drains latéraux mais également d'appliquer de nouvelles techniques innovantes pour la filière géothermie comme :

- Le LWD (*logging while drilling*) et RSS (*Rotary steerable system*).
- L'Acquisition des diagraphies RMN (Résonance Magnétique Nucléaire) dans les drains pilotes.
- L'utilisation de la métrologie analytique élémentaires XRF (*X-Ray Fluorescence*) / XRD (*X-Ray Diffraction*)
- Stimulation des drains par Unité *Coiled Tubing* et essais différentiels

Ce programme de forage s'étendrait sur 152 jours (mobilisation et démobilitation de l'appareil de forage incluses), les drains étant testés un par un (soit 6 tests de productions) et le programme d'acquisition de données dans le réservoir étant plus complet (Figure 65).

#### 4.1.1. Fiche résumée des travaux prévus pour la réalisation des puits GVZ1 et GVZ2

<b>Intitulé du projet</b>	<b>Réalisation d'un doublet géothermique de chauffage urbain pour la commune de Vélizy-Villacoublay</b>	
<b>Département</b>	Yvelines (78)	
<b>Localisation du site d'implantation</b>	Parcelle cadastrée AI 106, 3 Rue du Général Valérie André, 78140 Vélizy-Villacoublay	
<b>Objectif</b>	Réalisation de deux puits (un injecteur et un producteur) pour constituer un doublet géothermique	
<b>Maître d'Ouvrage</b>	Engie Réseau	
<b>Délégataire</b>	Vélidis (filiale d'Engie Réseaux)	
<b>Maîtrises d'œuvre</b>	Surface : en cours de désignation Sous-sol : en cours de désignation	
<b>Classification minière</b>	Forage de gîte géothermique	
<b>Aquifère cible/ressource sollicitée</b>	Calcaires oolithiques du Dogger (Bathonien)	
<b>Type d'ouvrage</b>	Déviés, orientés, radiaux multi-drains	
<b>Profondeur finale</b>	GVZ1 (drain pilote) 1600 (m TVD) 2280 (m MD)	GVZ2 (drain pilote) 1580 (m TVD) 2264 (m MD)
	Les profondeurs finales pourront être inférieures ou supérieures en fonction des résultats observés.	
<b>Production géothermale</b>	Puissance thermique maximale : 18,3 MW Taux de couverture ENR ≈ 69%	
<b>Calendrier prévisionnel</b>	Voir planning suivants (Figure 64 et Figure 65)	
<b>Date prévisionnelle de début des travaux</b>	Deuxième trimestre 2020 après la notification des autorisations administratives	
<b>Durée prévisionnelle des travaux sur site</b>	522 jours (viabilisation du terrain, puits et centrale géothermique)	
<b>Durée prévisionnelle des travaux de forage (mobilisation et démobilitation de l'appareil de forage incluses)</b>	128 jours (programme industriel) 152 jours (programme démonstrateur)	
<b>Date prévisionnelle de mise en service</b>	Saison de chauffe 2022	

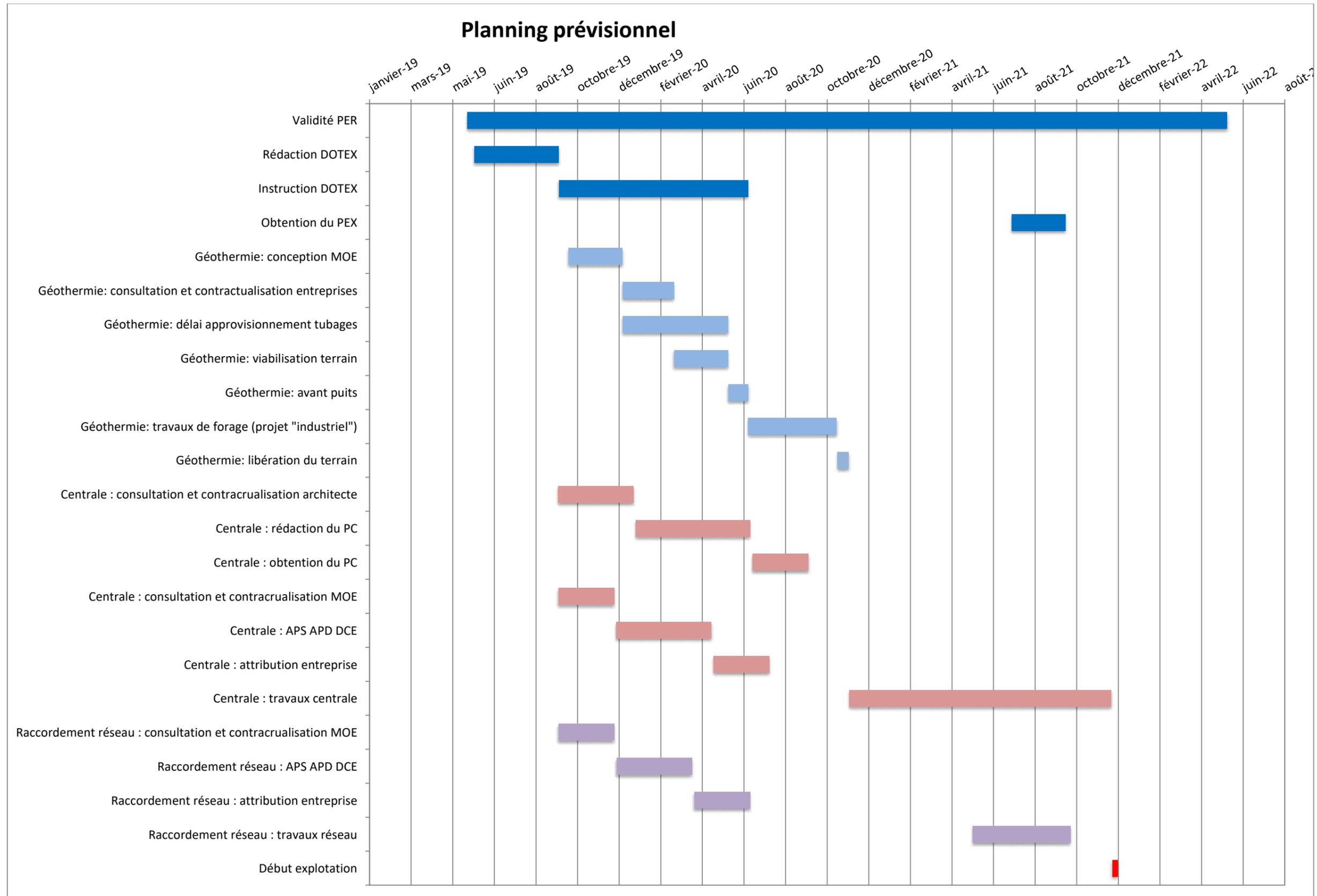


Figure 64 : Planning prévisionnel en considérant le programme industriel.

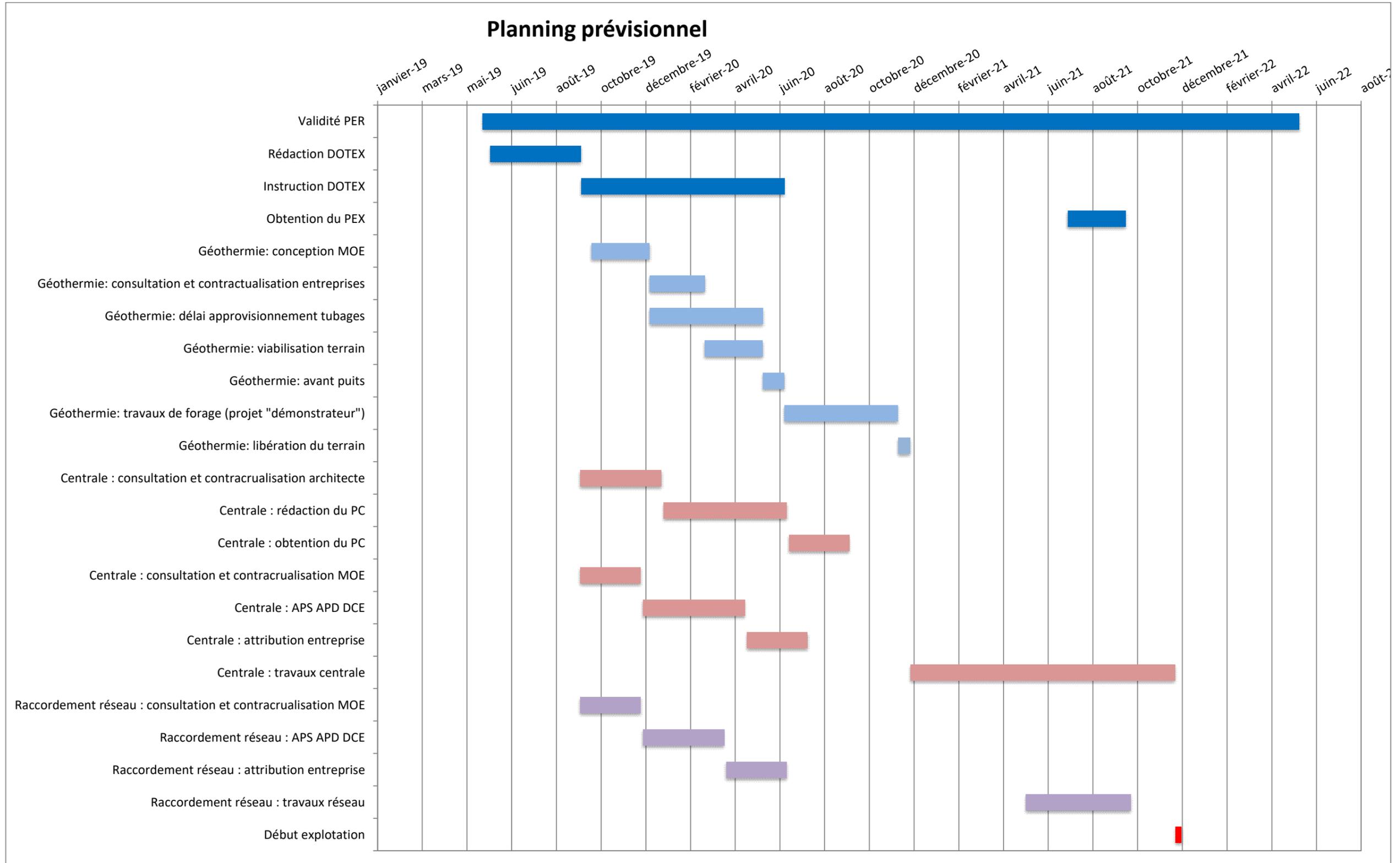


Figure 65 : Planning prévisionnel en considérant le programme démonstrateur.

#### 4.1.2. Implantation des nouveaux forages GVZ1 et GVZ2.

Les nouveaux puits GVZ1 (producteur) et GVZ2 (injecteur) seront implantés sur la commune de Vélizy-Villacoublay (département des Yvelines, 78), au niveau du site du futur centre technique municipale, localisé au Sud de l'autoroute A-86. Il s'agit de la parcelle cadastrée AI 106 située au 3 Rue du Général Valérie André, 78140 Vélizy-Villacoublay qui s'étend sur une superficie de 18 299 m<sup>2</sup>.

L'accès au site se fera par un chemin d'accès se situant à l'Est et accessible depuis la rue du Général Valérie André.

La centrale géothermique se situera au Nord-Ouest de la parcelle et s'étendra sur une surface de 1250 m<sup>2</sup>. Les têtes de puits seront localisées au Sud de la centrale et espacées de 10 mètres suivant une orientation Nord-Sud. Une surface de 2300 m<sup>2</sup> sera réservée pour la maintenance courante et lourde des puits. L'extension total de la zone de forage réservée sera de 6000 m<sup>2</sup>. A l'Est, une grande partie de la parcelle AI 106 sera réservée au futur Centre Technique Municipale (Figure 66).

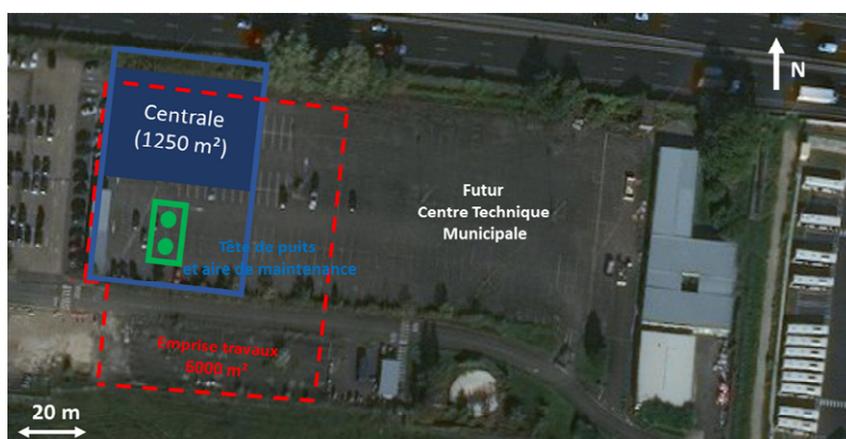


Figure 66 : Emprise en phase chantier et en phase d'exploitation.

Les coordonnées de têtes de puits sont rappelées dans le Tableau 27.

Tableau 27 : Coordonnées des têtes de puits GVZ1 et GVZ2 en Lambert 93.

	X (Lambert 93)	Y (Lambert 93)
GVZ1	640 414.72 mètres	6 853 533.75 mètres
GVZ2	640 416.82 mètres	6 853 545.72 mètres

La parcelle de 3550 m<sup>2</sup> nécessaire à l'implantation de la centrale géothermique sera mise à la disposition de la Société par Actions Simplifiée créée entre la Commune de Vélizy-Villacoublay et la société ENGIE pour réaliser et exploiter cet ouvrage de production d'énergie géothermique. Les Figure 67 et Figure 68 illustrent l'emprise de l'appareil de forage SMP 104 et de ses dotations en phase de forage ainsi que l'emprise de l'appareil SMP12 qui sera utilisé pour la maintenance des puits.

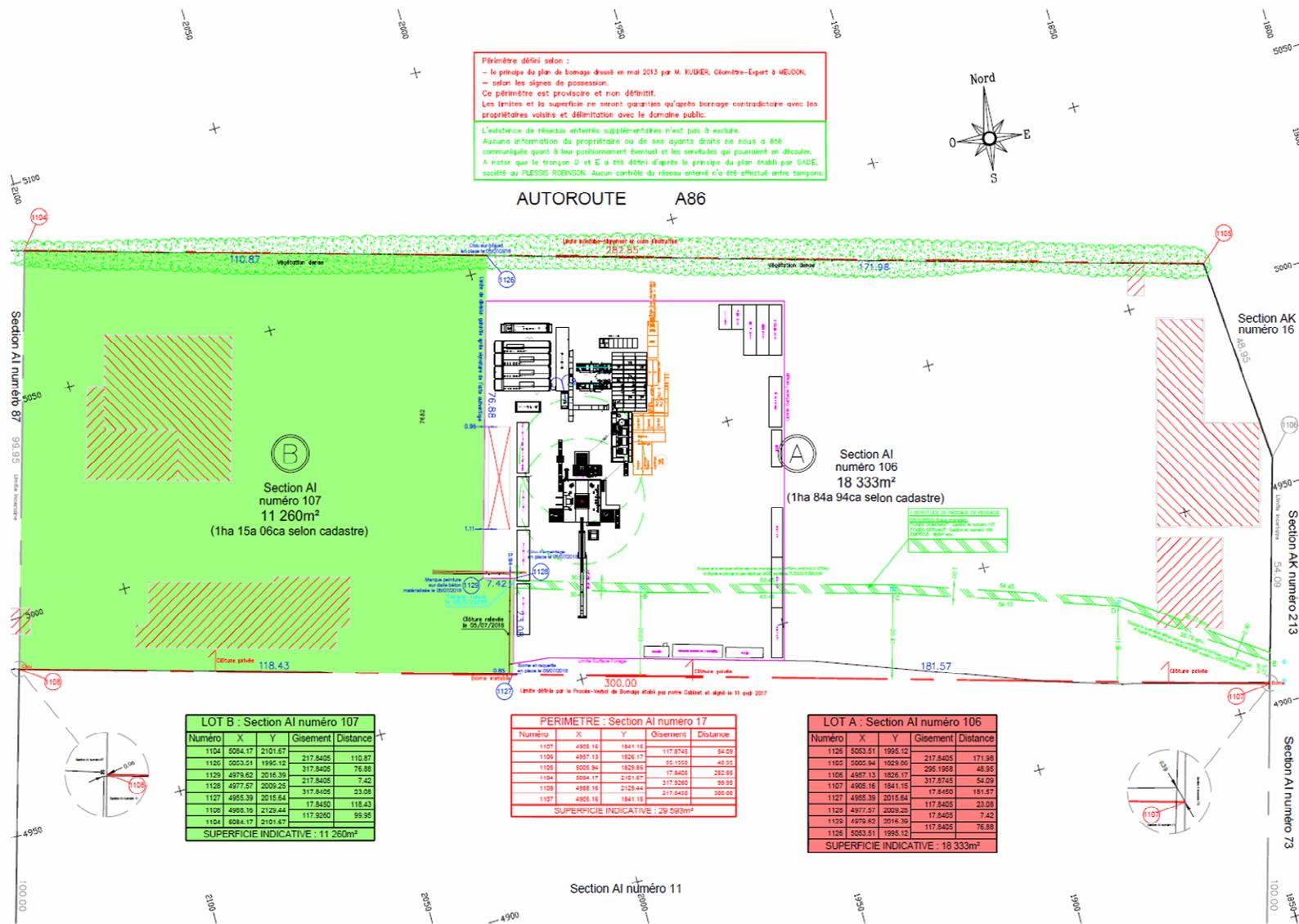


Figure 67 : Limite de l'emprise de chantier en phase de forage pour l'appareil SMP 104 et ses dotations.

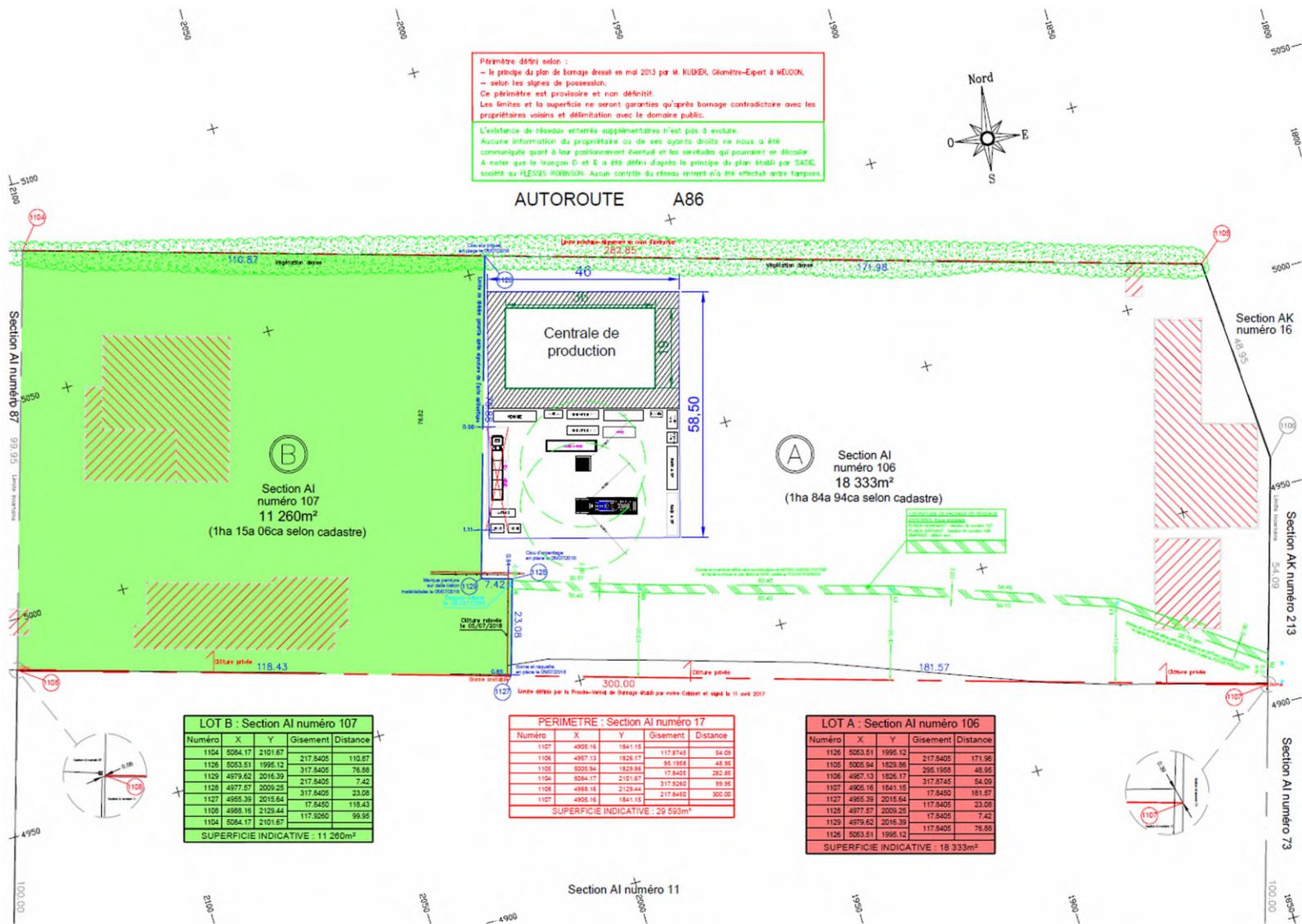


Figure 68 : Limite de l'emprise de chantier en phase de workover (maintenance des puits) pour l'appareil SMP 12 et ses dotations.

#### 4.1.3. Travaux d'aménagement pour la réalisation des puits GVZ1 et GVZ2

Les travaux sur le site et sur le chemin d'accès à l'Est consisteront à :

- **Clôturer l'aire de travail** en y aménageant deux accès (véhicules et évacuation en cas de nécessité), délimitant ainsi le périmètre rapproché de sécurité du chantier et du doublet futur. Le chemin d'accès à l'Est du site devra être enrobé et bithumé afin de permettre le passage d'engins lourds.
- **Permettre le passage** des camions, des engins de manutention et de transport des équipements, lors de la mise en place et du démontage du chantier, ainsi que le passage des engins de manutention des consommables et des matériels tubulaires lors des travaux ; cette aire sera donc traitée en « voirie lourde ». On pourra par exemple aménager une aire empierrée et compactée sur 40 cm de profondeur ; l'empierrement et le compactage seraient réalisés via la pose d'un géotextile complété par une épaisseur de 10 cm de sablon et d'un empierrage (30x80) sur les 20 cm suivants, terminé par 10 cm d'enrobé bitumineux ; ou bien procéder à un traitement du sol.
- **Terrasser/couler** en fonction des résultats et des préconisations des études de sol 3 dalles béton à double ferrailage (double treillis soudé 100 x 100), d'épaisseur 30 à 35 cm et de surfaces 160 m<sup>2</sup> (appareil), 120 m<sup>2</sup> (générateurs) et 80 m<sup>2</sup> (stockage produits) à ciment CP 40-45 de portance minimum 20 MPa ;
- **Forer deux avant-puits**, sur le principe du havage, de diamètre 36/40", arrêtés à une profondeur de 50 m et équipés d'un tube guide en acier roulé/soudé de diamètre 30" ;
- **Aménager deux caves de têtes de puits**, de dimensions 3,00 (Longueur) x 3,00 (largeur) x 4,00 (hauteur) m, bétonnées comprenant un logement de 60 x 60 x 80 cm pour pompe vide-cave (Figure 69).
- **Aménager un réseau de caniveaux et/ou de canalisations** disposé autour des bassins de fabrication et de circulation de la boue de forage ; ce réseau de caniveaux est destiné à drainer les effluents boueux vers la ligne de traitement par l'intermédiaire d'un bac déshuileur qui piège les effluents polluants. La gestion des déblais et fluides de forage étant assurée via des bacs, pelletage/bennes et citernage. La gestion des essais se fera quant à elle au moyen de bacs et d'une unité de traitement (ligne de traitement) par décantation de solides, refroidissement et dilution des eaux produites.

Ces ouvrages sont destinés à être détruits à l'issue des travaux de forage, seules resteront à demeure sur le site :

- Deux caves en béton armé au centre desquelles sont positionnés les puits avec leurs empilages de vannes de sécurité et adaptateurs ; la profondeur des caves est adaptée à l'utilisation ultérieure du puits, la largeur et la longueur étant liées aux dimensions de la sous-structure de l'appareil de forage.
- Les conduites d'eau géothermales allant des têtes de puits à la centrale,
- Une aire de servicing pour les travaux d'entretien et de maintenance des ouvrages.

Des aménagements peuvent être apportés à ce programme type. Le degré de liberté est moindre pour l'implantation des puits et donc de la dalle bétonnée sur la plate-forme, cette position étant imposée par l'espace nécessaire pour la mise en place des équipements (le mât de forage par exemple est assemblé à terre et nécessite donc un espace suffisant dans l'axe avant de la dalle).

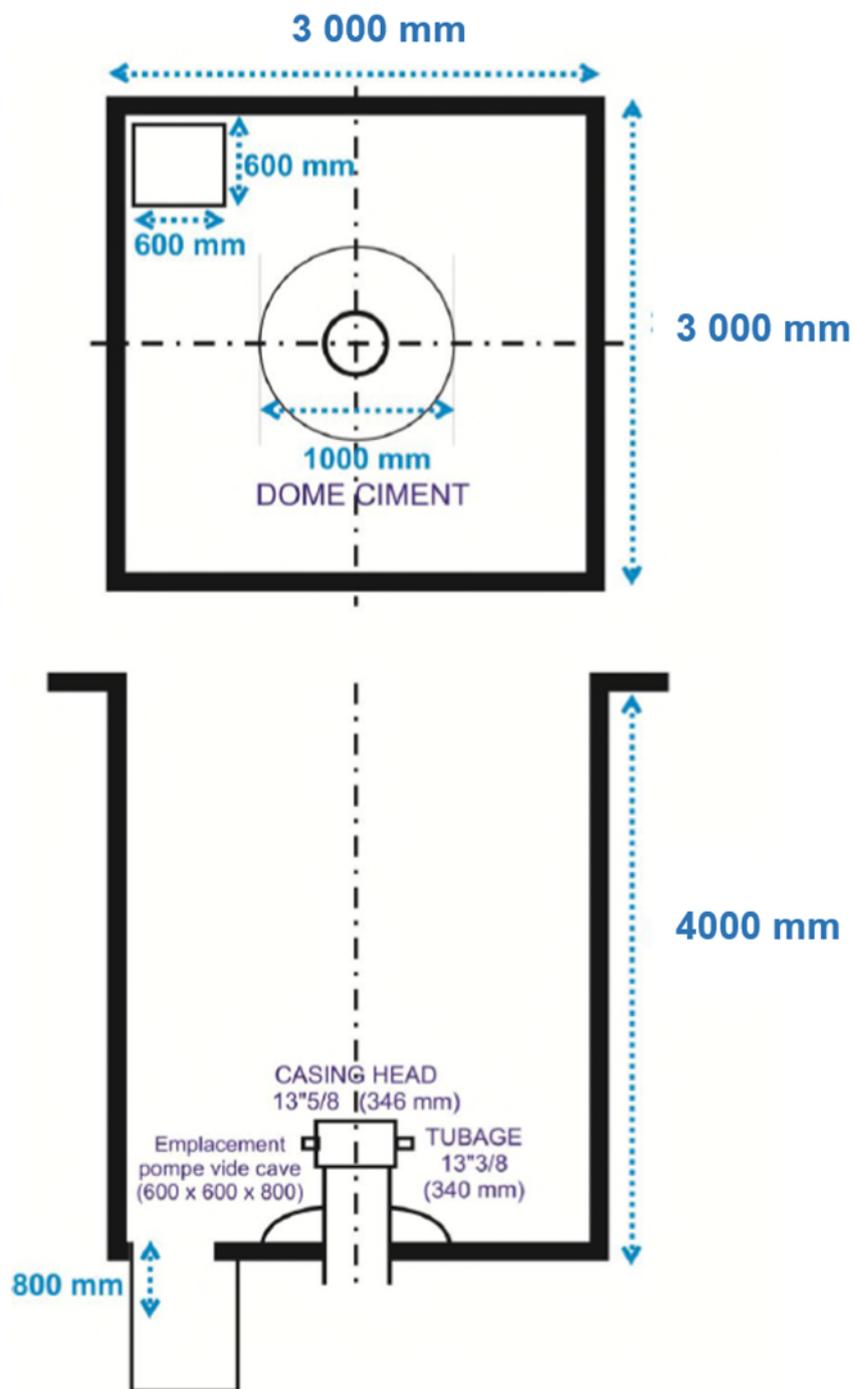


Figure 69 : Schéma de principe de construction d'une cave de tête de puits.

#### 4.1.4. Travaux de forage des puits GVZ1 et GVZ2

##### 4.1.4.1. Introduction

Les travaux de forage consisteront à la réalisation de deux nouveaux puits : un producteur GVZ1 et un injecteur GVZ2 pour un fonctionnement en doublet. Ces nouveaux puits seront réalisés au moyen d'un appareil de forage lourd, le SMP 104, de capacité au crochet 250 t en dynamique, conformément à l'architecture des puits décrits brièvement au Chapitre 3.6.3 et au programme de forage/complétion/mesures/essais développé dans ce chapitre.

Ces travaux devront se conformer dans la mesure du possible au « guide des bonnes pratiques d'un forage pour la géothermie en aquifère profond » issu d'un projet porté par l'ADEME et le BRGM et publié au début de l'année 2016.

Les différents travaux de réhabilitation ou de forages de puits géothermiques réalisés ces dernières années ont permis d'accumuler de l'expérience sur les meilleures techniques ou principes à privilégier pour éviter les dysfonctionnements ou les incidents pouvant remettre en cause la pérennité des ouvrages. De nouvelles techniques et de nouveaux matériaux ont également été utilisés. C'est pourquoi, les organismes impliqués dans le développement de la géothermie sur aquifères profonds (ADEME, AFGP, AgéMO, BRGM, DRIEE et SAF-Environnement) ont décidé de procéder à un retour d'expérience le plus complet possible, à partir des travaux effectués lors de nouvelles opérations géothermiques ou à l'occasion de la réhabilitation d'anciennes opérations.

Ces travaux ont fait l'objet d'analyses détaillées qui ont conduit à la réalisation de fiches techniques récapitulant les principales règles de l'art relatives à la construction de forages géothermiques exploitant des aquifères profonds (Albien, Néocomien et Dogger), parfois avec un éclairage nouveau issu de la mise en œuvre de nouvelles technologies, de nouveaux matériels ou matériaux. Ces fiches ont été prises en compte le plus possible dans la conception des ouvrages présentés ci-dessous (Annexe 17).

##### 4.1.4.2. Travaux et études préparatoires

Conformément à l'arrêté du 30 mai 1975, le chantier devra, dès la prise de possession des lieux et pendant toute la durée du chantier jusqu'à la réception des travaux, être signalé, à un endroit visible de l'extérieur, avec les mentions :

- Nature et description des travaux ;
- Maître d'ouvrage ;
- Maître d'œuvre ;
- Entreprises intervenantes.

Un balisage devra être mis en place pour en interdire l'accès aux personnes non autorisées.

Ce balisage sera équipé de panneaux « chantier interdit au public » et « port des équipements de protection individuelle » à chaque accès.

Un balisage de guidage sera également mis en place aux environs du chantier sur les principales voies d'accès, pour faciliter l'accès au chantier des fournisseurs et des différentes sociétés de service.

#### 4.1.4.3. *Profils des puits et coupes géologiques et techniques prévisionnelles*

Le site de Vélizy-Villacoublay est assujéti à plusieurs contraintes/recommandations de trajectoires puits, respectivement :

(i) les impacts au toit du réservoir des trajectoires candidates doivent rester circonscrites au périmètre d'exploration/de recherche cartographié en Figure 60.

(ii) leur inclinaison doit rester inférieure à 50°, dans la mesure du possible, faute de quoi l'intégrité du matériau court un risque de vieillissement prématuré ;

(iii) l'espacement des impacts au toit du réservoir doit, dans les limites imposées par (i) et (ii), sécuriser une vie utile du nouveau doublet de trente ans, équivalents à une percée thermique inférieure à 1°C.

Comme exposé dans le chapitre 3.4.3, plusieurs architectures puits ont été testées afin d'optimiser la production de la ressource géothermale et répondre aux contraintes mentionnées plus haut dans la mesure du possible.

Celle qui a été retenue est l'architecture multi drain avec un trou pilote et 2 drains (ST1 et ST2), avec un atterrissage au toit du réservoir d'inclinaison 80°, nommée "Architecture MultiDrain80".

Cette architecture présente les meilleurs résultats en termes de recyclage thermique (percée thermique inférieure à 0.1°C au bout de 30 ans), d'impact hydraulique (avec des valeurs de rabattement plus faible que les deux autres scénarii) et s'inscrit dans le périmètre de recherche demandée.

En effet, les faibles transmissivités du réservoir (estimation de 11D.m) associées aux futurs débits d'exploitation relativement élevés (débit de pointe de 360 m<sup>3</sup>/h) engendrent des valeurs de rabattements trop importantes pour les architectures conventionnelle dite « classique » et "MultiDrain70". L'architecture "MultiDrain80" apparaît comme la solution la plus appropriée pour atteindre les objectifs fixés. Elle permet d'optimiser l'interface puits-réservoir, de maximiser l'espacement entre les drains réduisant ainsi l'impact hydraulique. De plus, cette architecture permet de maximiser la marge de manœuvre en minimisant ainsi le risque lors de la phase de forage dirigé. Ce type d'architecture, nouveau en géothermie, reste néanmoins largement utilisés pour les forages pétroliers.

Les trajectoires, en inclinaison et en azimuts, des ouvrages GVZ1 et GVZ2, sont présentées en Figure 70 et Figure 71. Elles sont décrites en détails dans le Chapitre 3.6.3.

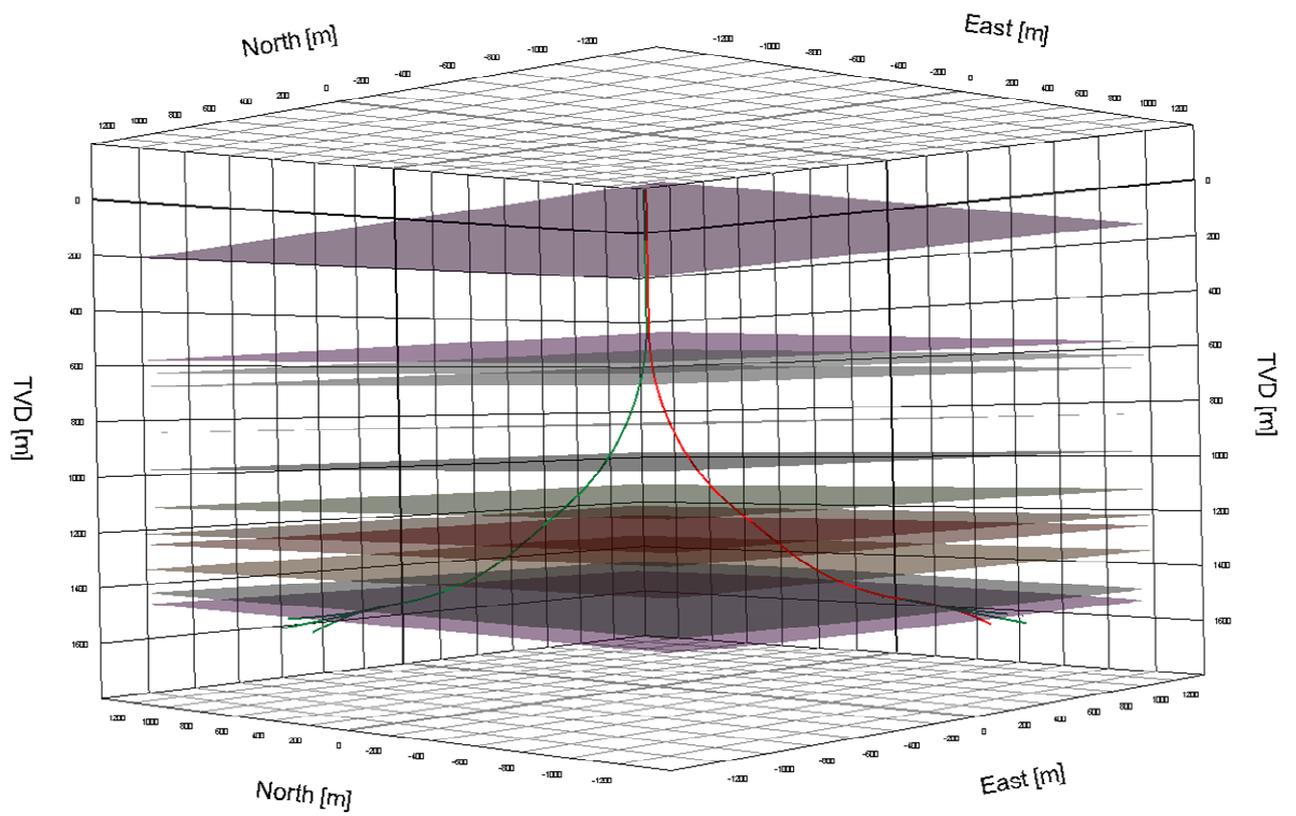


Figure 70 : Projection 3D du doublet de Vélizy



La solution retenue pour effectuer les drains des puits radiaux multilatéraux consiste à réaliser un *sidetrack* directement dans le trou ouvert. Grâce à l'inclinaison de 80 degrés au sabot 9"5/8, on arrive à avoir un espacement satisfaisant des drains à l'entrée du réservoir.

Les longueurs des trous ouverts et de distance forée dans le réservoir sont décrites dans le Tableau 28:

**Tableau 28 : Longueurs des drains.**

Drain	Longueur Open Hole	Longueur Drain Réservoir
GVZ1 Pilote	356	252
GVZ1 ST1	451	370
GVZ1 ST2	475	397
GVZ2 Pilote	361	230
GVZ2 ST1	450	345
GVZ2 ST2	507	376

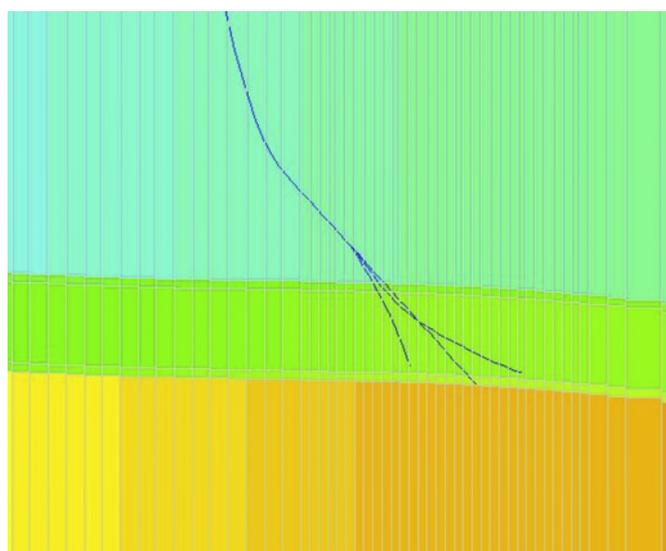
Les écartements entre les drains multilatéraux au début du réservoir et à la fin du réservoir sont décrits et illustrés dans le Tableau 29, le Tableau 30 et la Figure 72.

**Tableau 29 : Ecartements Drains Multilatéraux GVZ1.**

Ecartement (m)	Au début du Drain	Au fond du Drain
GVZ1 & ST1	32	171
GVZ1 & ST2	39	215
ST1 & ST2	18	385

**Tableau 30 : Ecartements Drains Multilatéraux GVZ2.**

Ecartement (m)	Au début du Drain	Au fond du Drain
GVZ2 & ST1	23	112
GVZ2 & ST2	30	136
ST1 & ST2	15	244



**Figure 72 : Visualisation en 3D des drains dans le réservoir. Échelle verticale exagérée.**

#### 4.1.4.4. *Programme de forage/complétion des puits GVZ1 et GVZ2 et programme de boue*

Le forage débutera en diamètre 26", l'avant puits et le tubage guide en acier de 30" ayant été réalisés lors des opérations de génie civil, pour se terminer en 8"1/2 (réservoir objectif). Les phases tubées se dédoublent respectivement entre le tubage 20" et le 13"3/8 puis entre le tubage 13"3/8 et le 9"5/8 (réservoir exploité en découvert 8"1/2). On observera la double protection tubée acier 13"3/8 et 9"5/8 des aquifères à eaux douces de l'Albien-Néocomien.

Les outils (*drill bits*), à l'exception des horizons supérieurs (jusqu'à 50 mètres de profondeur environ) et du réservoir qui utiliseront des tricônes, seront du type tricônes à dents pour la phase 26", à picots pour la phase 17"1/2 et PDC (*polycrystalline diamond cutters*) pour la phase 12"1/4 ; ces derniers, démontrant des avancements rapides et des durées de vie prolongées, sont couramment utilisés par les opérateurs pétroliers dans les formations sédimentaires du bassin parisien.

Les fluides de forage évolueront des boues bentonitiques simples (BBS) à des formulations mixtes bentonitiques/polymères (BBA) cellulosiques/Oglycols, puis à des boues à eau salée et biopolymères dégradables dans le réservoir objectif.

Les cimentations des annulaires et entrefers, à l'exception de la cimentation *innerstring* (à travers tiges) de la phase tubée 20", seront de type classique [tête de cimentation, anneau (*float collar*) et sabot (*shoe*)], les ciments utilisés faisant appel à des laitiers de classe G (d#1,8-2) pour les sabots et des ciments *POZZMIX* plus légers (d#1,5-1,6) pour les laitiers de tête.

Une chambre de pompage, de diamètre 13"3/8 et de profondeur 450 m, sera aménagée sur le puits producteur par coupe/arasage du tubage 9"5/8, au-dessus de la *DV* mécanique ménagée à cet effet.

Les mesures et essais comprendront :

- (i) Des diagraphies différées de découvert, de caractérisation des lithologies des terrains traversés, de géométrie du trou (volumes de cimentation), et de porosité des formations réservoir
- (ii) Des mesures de production (débitmétrie du découvert, essais de puits et enregistrement des pressions de fond)
- (iii) Des diagraphies des trous tubés (contrôle de cimentations des annulaires et des diamètres intérieurs des tubages)
- (i) Des essais de production (cycles transitoires de rabattement et de remontée de pressions) de détermination des caractéristiques hydrodynamiques du réservoir (et de dimensionnement ultérieur des équipements de pompage et variateurs de fréquences), et, des prélèvements de fluides en fond de puits aux fins d'analyses physico-chimiques et thermodynamiques (PVT, gaz dissous) de l'eau géothermale.

Le programme de forage/tubage et le programme de boue envisagé sont décrits en détails dans :

- Les Tableau 31 et Tableau 32 pour les phases de forage des puits producteur et injecteur
- Les Tableau 33 et Tableau 34 pour les phases de tubage

Les Figure 73 et Figure 74 qui résument l'ensemble des informations de l'architecture des puits et des fluides de forage utilisés.

Le choix retenu est celui présentant les caractéristiques techniques les plus adaptées à une production assistée par pompe à 400 m<sup>3</sup>/h, conformément au débit maximum de production envisagé.

**Tableau 31 : Diamètres Phases de Forage du Puits Producteur GVZ1.**

Diamètre Phase	Profondeur de début MD (m)	Profondeur de début TVD (m)	Profondeur de fin MD (m)	Profondeur de fin TVD (m)	Longueur (m)
36	0	0	50	50	50
26"	50	50	500	500	400
17"1/2	500	500	859	850	409
12"1/4	859	850	1924	1498	1065
8"1/2	1924	1498	2280	1600	356
8"1/2 ST1	1960	1504	2411	1580	451
8"1/2 ST2	1940	1501	2415	1580	475

**Tableau 32 : Diamètres Phases de Forage du Puits Injecteur GVZ2.**

Diamètre Phase	Profondeur de début MD (m)	Profondeur de début TVD (m)	Profondeur de fin MD (m)	Profondeur de fin TVD (m)	Longueur (m)
36	0	0	50	50	50
26"	50	50	450	450	400
17"1/2	450	450	862	850	412
12"1/4	862	850	1903	1475	1041
8"1/2	1903	1475	2186	1580	283
8"1/2 ST1	1940	1481	2390	1546	450
8"1/2 ST2	1920	1478	2427	1546	507

**Tableau 33 : Cuvelages Puits Producteur GVZ1 (BTC Buttress PRE Premium).**

Cuvelage	Type	Top MD (m)	Top TVD (m)	Sabot MD (m)	Sabot TVD (m)	Pose du sabot du casing
30" 320# X52 Soudé	Tube Guide	0	0	50	50	
20" 106,5# K55 BTC	Casing	0	0	500	500	Chambre de Pompage à 450m
13"3/8 61# K55 BTC	Casing	0	0	857	848	Top Portlandien
9"5/8 43,5# K55 PRE	Casing	450	450	1921	1498	Sous les Marnes du Callovien

**Tableau 34 : Cuvelages Puits Injecteur GVZ2 (BTC Buttress PRE Premium).**

Cuvelage	Type	Top MD (m)	Top TVD (m)	Sabot MD (m)	Sabot TVD (m)	Pose du sabot du casing
30" 320# X52 Soudé	Tube Guide	0	0	50	50	
20" 106,5# K55 BTC	Casing	0	0	448	448	Dans le Sénonien
13"3/8 61# K55 BTC	Casing	0	0	860	848	Top Portlandien
9"5/8 43,5# K55 PRE	Casing	0	0	1901	1475	Sous les Marnes du Callovien



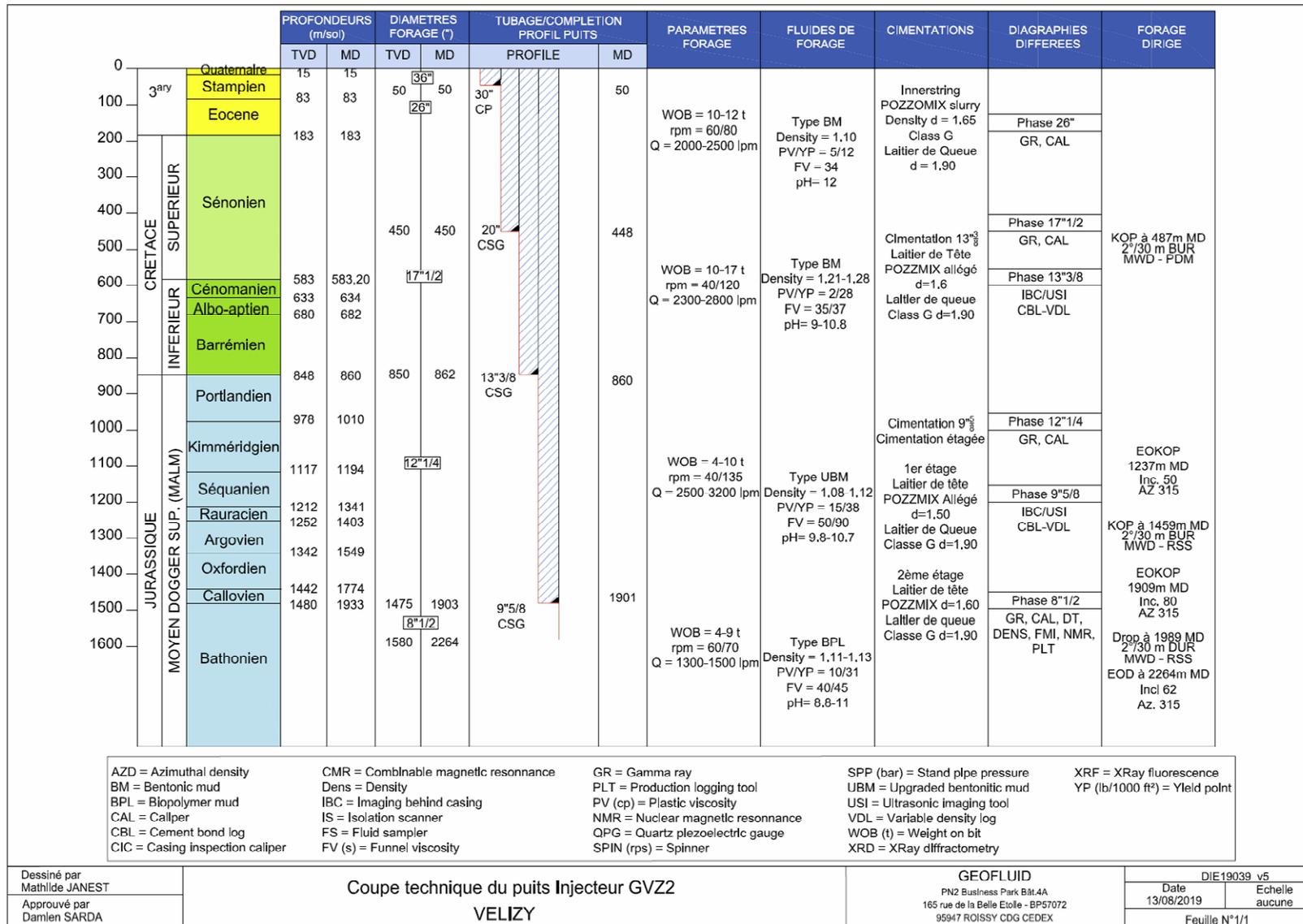


Figure 74 : Programme prévisionnel de forage/complétion du puits GVZ2.

En outre, le maître d'œuvre transmettra à la DRIEE, pendant les travaux de forage, un compte rendu détaillé du déroulement de l'opération à l'issue de chaque opération de cimentation des cuvelages (20", 13"<sup>3/8</sup>, et 9"<sup>5/8</sup>) et avant le démarrage de la phase de forage suivante. Ce compte rendu comprendra à minima les éléments suivants :

- Nom du projet,
- Date / heure,
- Références de l'ouvrage,
- Maître d'ouvrage / maître d'œuvre,
- Appareil de forage / entrepreneur,
- Opérateur de cimentation,
- Opération de cimentation concernée (cote de fin de phase, cote sabot tubage),
- Volume théorique mis en œuvre (calcul),
- Composition de la colonne de cimentation (densités, cotes) schéma à l'appui le cas échéant,
- Descriptif sommaire des données techniques de l'opération (volumes, densités, débits, matériel mis en œuvre (DV), etc.),
- Contrôle visuel du retour de ciment au jour,
- Remarques.

**Ce compte rendu a pour vocation d'attester du "bon déroulement des travaux". Il ne se substitue pas aux contrôles de cimentation réalisés en différé à l'aide des outils dédiés (CBL, VDL, USIT), conformément au programme prévisionnel des travaux présenté dans le dossier de demande d'autorisation d'ouverture de travaux de forage.**

#### 4.1.4.5. Programme de diagraphies et test BOP

##### Diagraphies

Le programme de diagraphie illustré précédemment dans les Figure 73 et Figure 74 respectivement pour les puits GVZ1 et GVZ2 est également résumé dans le Tableau 35. Les abréviations employées relatives à ce tableau sont résumées dans le Tableau 36. Le programme de diagraphie, qui est le même pour les puits producteur GVZ1 et le puits injecteur GVZ2, se veut exhaustif pour la partie Dogger afin de caractériser aux mieux les caractéristiques du réservoir dans cette zone encore méconnue de l'Ouest du bassin Parisien.

**Tableau 35 : Programme de diagraphie**

Phase	Outil de diagraphies
En fin de forage 26''	Log OH : CAL-GR
En fin de forage 17'' <sup>1/2</sup>	Log OH : CAL-GR
Après cimentation du cuvelage 13'' <sup>3/8</sup>	Log CH: USI/IBC-CBL-VDL
En fin de forage 12'' <sup>1/4</sup>	Log OH : CAL-GR
Après cimentation du cuvelage 9'' <sup>5/8</sup>	Log CH: USI/IBC-CBL-VDL
En cours et fin de forage 8'' <sup>1/2</sup>	Log OH: GR-CAL-DT-DENS-FMI-NMR-PLT
Après acidification	Log OH: FS, PLT, HRT

**Tableau 36 : Abréviations relatives aux tableaux précédents**

<b>OH</b>	<i>Open Hole</i> (découvert)	<b>FS</b>	<i>Fluid sampler (bottomhole)</i>
<b>CH</b>	<i>Cased Hole</i> (Trou tubé)	<b>GR</b>	<i>Gamma Ray</i>
<b>LWD</b>	<i>Logging While Drilling</i>	<b>HRT</b>	<i>High-resolution thermometer</i>
<b>PLT</b>	<i>Production Logging Tool</i>	<b>IBC</b>	<i>Imaging behind casing</i>
<b>CBL</b>	<i>Cement bond log</i>	<b>CAL</b>	<i>Caliper</i>
<b>DENS</b>	<i>Density</i>	<b>NMR</b>	<i>Nuclear magnetic resonance</i>
<b>DT</b>	<i>Sonic tool</i>	<b>USI</b>	<i>Ultrasonic imaging tool</i>
<b>FMI</b>	<i>Formation micro imager</i>	<b>VDL</b>	<i>Variable density log</i>

Si le programme démonstrateur venait à se réaliser des diagraphies complémentaires seraient mises en œuvre dans la phase drains (diagraphies RMN (Résonance Magnétique Nucléaire) et XRD/XRF (Rayon X/Fluorescence X) (Détails en Annexe confidentielle 1).

### **BOP (Blow Out Preventer)**

Une pression artésienne de -1.8 bars au Dogger est attendu au droit du site. Les risques de se retrouver dans une situation d'éruption sont quasi-nulle pendant la phase de forage 17''1/2, le programme de test du *Blow Out Preventer* (BOP) optionnel est présenté dans le Tableau 37 pour cette phase. Les programmes de test de BOP pour les phases 12''1/4 et 8''1/2 sont résumés dans le Tableau 38.

**Tableau 37 : Programme de test de BOP optionnel, pour la phase de forage 17''1/2**

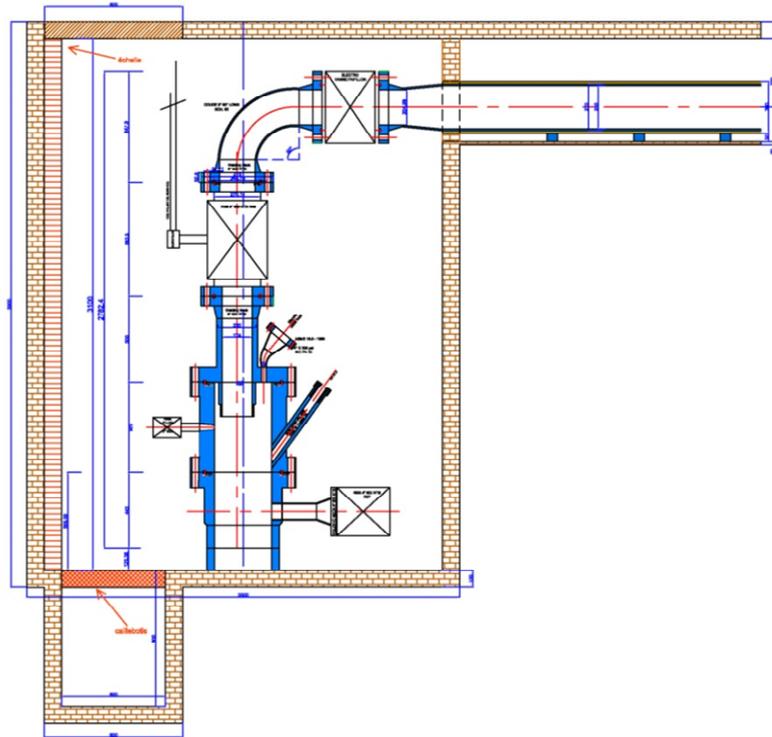
<b>Option Phase 17''1/2</b>			
<b>BOP annulaire et à mâchoires</b>		<b>Durée</b>	<b>Fréquence</b>
<b>Tests en pression</b>	10 bars	10 mn	Changement de phase, démontage et remontage du BOP, au moins 1 fois/21 jours
	30 bars	20 mn	
<b>Test de fonctionnement</b>			1 fois/ semaine

**Tableau 38 : Programme de test de BOP pour les phases de forage 12''1/4 et 8''1/2.**

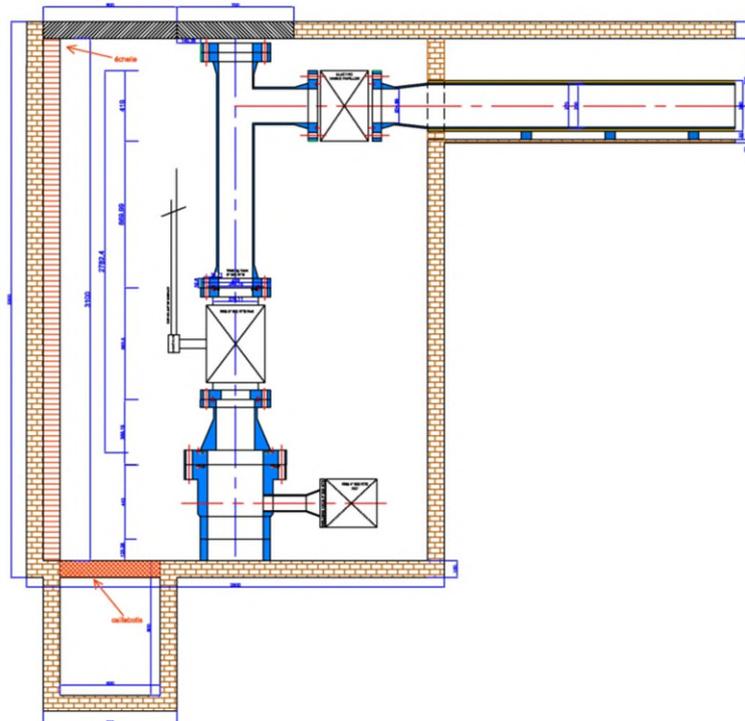
<b>Phase 12''1/4</b>			
<b>BOP annulaire et à mâchoires</b>		<b>Durée</b>	<b>Fréquence</b>
<b>Tests en pression</b>	10 bars	10 mn	Changement de phase, démontage et remontage du BOP, au moins 1 fois/21 jours
	30 bars	20 mn	
<b>Test de fonctionnement</b>			1 fois/ semaine
<b>Phase 8''1/2</b>			
<b>BOP annulaire et à mâchoires</b>		<b>Durée</b>	<b>Fréquence</b>
<b>Tests en pression</b>	10 bars	10 mn	Changement de phase, démontage et remontage du BOP, au moins 1 fois/21 jours
	30 bars	20 mn	
<b>Test de fonctionnement</b>			1 fois/ semaine

#### 4.1.4.6. *Têtes de puits*

A l'issue du chantier, les puits seront équipés de têtes de puits conformes aux normes en vigueur. Un exemple de têtes de puits de production et d'injection est présenté en Figure 75.



(a) Production



(b) Injection

Figure 75 : Schémas des têtes de puits de production et d'injection.

#### 4.1.4.7. *Programme des essais de production après réalisation du forage*

A la fin de l'opération de forage, il sera procédé à la réalisation des essais de production préliminaires, comprenant les séquences suivantes :

- La mise en eau du puits ;
- Le dégorgeage en production artésienne et si nécessaire à l'air lift ;
- La stimulation du réservoir par injection d'acide chlorhydrique (plusieurs acidifications peuvent être nécessaires) ;
- Les essais d'évaluation de la productivité des différents niveaux.

Les essais de productivité comprendront :

- Une phase de fermeture du puits après stimulation pour assurer la recompression de l'aquifère ;
- Une phase de production à débit constant d'une durée de 12 heures environ pendant laquelle seront enregistrées les diagraphies de production (flowmétrie, température) et effectués les prélèvements de fluide géothermal ;
- Une phase de remontée de pression d'une durée de 12 heures environ pendant laquelle on enregistrera la remontée de pression du réservoir au moyen d'une sonde de pression positionnée au sabot du tubage 9''5/8.

#### 4.1.4.8. *Programme d'échantillonnage des déblais*

Pendant le forage, des échantillons de terrain seront prélevés tous les 3 à 5 mètres, observés à la loupe binoculaire et décrits par le géologue qui établira la coupe lithologique des terrains traversés.

#### 4.1.4.9. *Durée prévisionnelle des travaux*

La durée des forages déviés (hors travaux préparatoires de génie civil) est estimée à 128 jours (pour le programme dit « industriel ») sur la base d'un travail effectué en 3 postes par jour (Figure 76) :

- Phase de mobilisation de l'appareil de forage : 5 jours
- Phase 26" : 6 jours (pour GVZ1 et GVZ2).
- Phase 17"1/2 : 9 jours (pour GVZ1 et GVZ2).
- Phase 12"1/4 : 19 jours (pour GVZ1 et GVZ2).
- Phase 8"1/2 avec diagraphie et essais : 26,5 jours pour GVZ1 et 23,5 jours pour GVZ2.
- Phase de démobilisation de l'appareil de forage : 5 jours

Pour le programme démonstrateur, la durée des forages déviés s'élèverait à 152 jours dû à des phases de forage 8"1/2 plus longues (diagraphie et essais compris) s'étendant respectivement sur 39,5 jours pour GVZ1 et 34,5 jours pour GVZ2 (Figure 77).

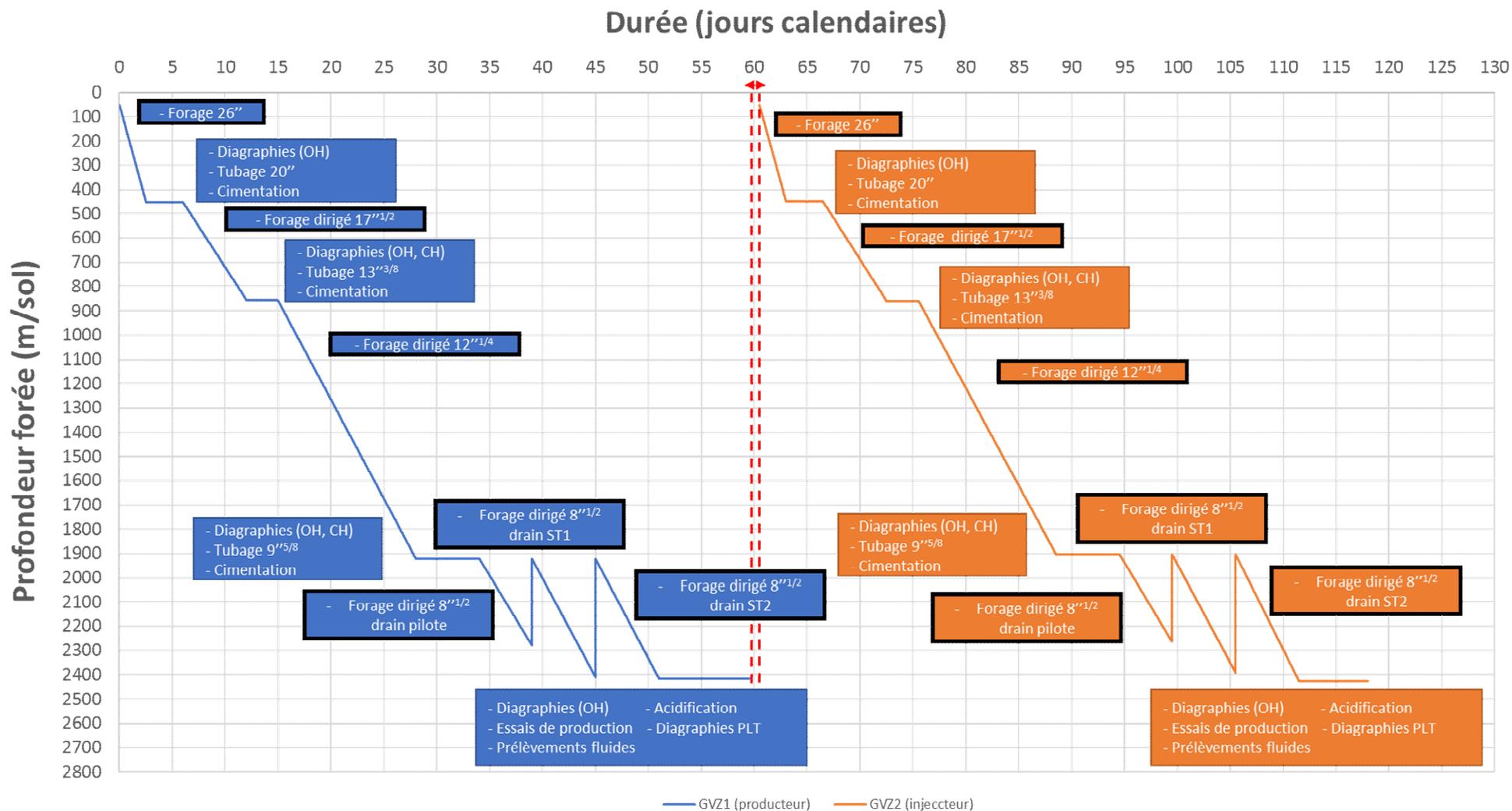


Figure 76 : Courbes d'avancement prévisionnel des forages GVZ1 et GVZ2 de Vélizy-Villacoublay (pour le programme industriel).

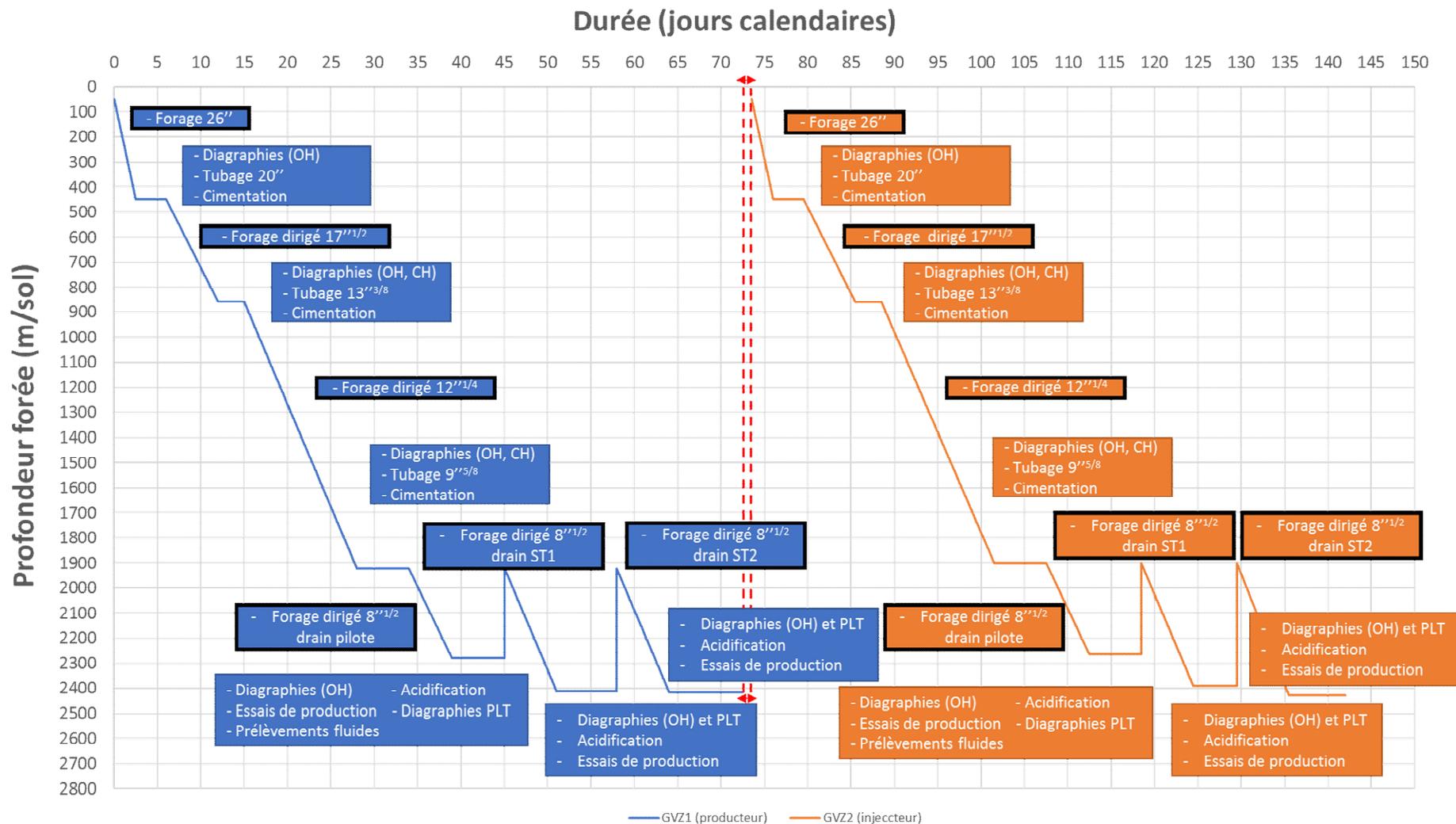


Figure 77 : Courbes d'avancement prévisionnel des forages GVZ1 et GVZ2 de Vélizy-Villacoublay (pour le programme démonstrateur).

#### 4.1.5. Exposé des méthodes de forages envisagées

##### 4.1.5.1. Principe et méthodologie des travaux de forage

###### - Mise en place du tube guide

Compte tenu de l'instabilité des terrains de surface, il est indispensable de réaliser un « avant-puits » au forage de diamètre 36/40" par la méthode de havage, arrêté à la côte de refus (attendue à ~50m) et équipé d'un tube guide en acier roulé/soudé de diamètre 30".

###### - Le forage « rotary »

Le forage *rotary* utilise un trépan (ou outil) à dents ou monobloc sur lequel on applique une force procurée par un poids, tout en l'entraînant en rotation. Le forage *rotary* est utilisé lors des phases de forages rectilignes (vertical ou *slant* i.e. avec un angle d'inclinaison maintenu constant). Pour les phases de forage dirigé, une alternance *rotary* et *sliding* est utilisée. Sans tourner le train de tiges, le trépan tourne avec un moteur à boue et fore dans la direction indiquée. Lorsque la direction souhaitée du puits de forage est atteinte, l'ensemble du train de tiges est remis en rotation et on repasse en phase de forage rectiligne. Ces modes opératoires sont appliqués avec le matériel indiqué au chapitre 4.1.5.2.

On injecte en continu un fluide au niveau du trépan de manière à emporter les débris hors du trou grâce au courant ascensionnel du fluide vers la surface.

Le poids appliqué sur l'outil est fourni par les masses-tiges vissées au-dessus de l'outil et prolongées jusqu'en surface par les tiges de forage, simples tubes vissés entre eux et qui assurent la transmission du mouvement de rotation et la canalisation du fluide de forage.

Le mouvement de rotation est obtenu soit par une table de rotation qui entraîne une tige d'entraînement solidaire des tiges de forage, **soit par une tête d'injection montée sur une glissière dans le mât.**

Le mât est la superstructure métallique montée à l'aplomb du puits qui permet la manutention des tiges et soutient leur poids.

Le fluide de forage, constitué d'un mélange d'eau et de bentonite (argile naturelle) est utilisé en circuit fermé et injecté par une pompe à haute pression. Il assure la remontée des déblais produits par l'action des dents de l'outil, contribue au soutien des parois du puits et maintient en place par pression hydrostatique les fluides présents dans les terrains perméables. Il s'agit de la première barrière de sécurité du puits.

Le puits est foré par intervalles ou phases de diamètres décroissants et concentriques. A la fin de chaque phase, un tubage en acier est mis en place dans le puits puis cimenté à l'extrados jusqu'à la surface. En général, deux ou trois phases de forage sont nécessaires pour atteindre l'objectif fixé.

Dans le cas où le projet démonstrateur venait à se réaliser, la technique de *Geosteering* serait utilisé (voir description ci-dessous).

###### **LWD (*logging while drilling*) et *Geosteering*.**

Les trajectoires des drains, imagées via le système de pilotage *Geosteering*, s'inscrivent dans un cadre structural stratifié de réservoir multicouches. L'environnement géohydrodynamique est décrit en direct par l'examen des déblais de forage et conforté par les diagraphies LWD (*Logging While Drilling*)

de porosité (outils Densité et Neutron) et d'argilosité (*Gamma Ray*), réalisées en cours de forage sous garniture RSS (*Rotary Steerable System*). Lors du forage du premier drain (drain principal), le forage sera effectué avec des LWDs permettant d'ajuster le géomodèle du réservoir. Les deux drains suivants seront alors forés à l'aide d'un RSS et d'une batterie d'outil LWD permettant de mettre en œuvre un *geosteering* dans le réservoir afin de suivre les zones les plus productrices.

La technologie RSS est la plus apte à sécuriser les trajectoires contraignantes des phases forées (i) 12"1/4 (arc de cercle débouchant au toit du réservoir Bathonien objectif, avec un angle d'incidence rasant proche de 90° et (ii) 8"1/2 (trajectoire nécessitant un pilotage précis *Geosteering* sous LWD afin de suivre/capter les niveaux producteurs d'épaisseurs métriques, pendant le forage, et ainsi maximiser la productivité de l'ouvrage).

#### 4.1.5.2. *Matériel mis en œuvre pour les travaux de forage*

##### - *Forage de l'avant trou*

Le matériel qui sera utilisé pour réaliser « l'avant trou » des puits GVZ1 et GVZ2 n'est pas encore déterminé et fera l'objet d'une consultation.

##### - *Matériel de forage rotary*

La réalisation du programme de travaux, tel qu'il est défini au chapitre 4.1.4.4, nécessite l'utilisation d'une machine de forage d'une capacité minimale au crochet de 200 tonnes. L'appareil de forage choisi, à savoir le SMP104, répond à ce critère avec une capacité au crochet en dynamique de 250 tonnes. Les équipements suivants seront également nécessaires :

- Top drive system (TDS) à privilégier, par rapport à une table de rotation (ce qui est le cas avec l'appareil de forage SMP104).
- Garniture de forage (BHA), composée de :
  - o L'outil tricône ou PDC ou à picots suivant la phase de forage
  - o Stabilos ;
  - o Masses tiges (DC) ;
  - o Tiges lourdes (HWDP) ;
  - o Coulisse de forage (Jar) ;
  - o Tiges de forage (DP) ;
- Pour les phases déviées, il sera également utilisé (entre l'outil tricône et les masses tiges) :
- Moteur coudé ou RSS (*Rotary Steerable System*);
- *Measurement While Drilling tools (tool carrier + emitting sub)*;
- *Non-Magnetic Drill Collars (NMDC)*.
- *Logging while drilling tool (LWD)*

- *Geosteering* (programme démonstrateur)
- *Installation électrique*

Pour permettre le travail nocturne (ou en cas de faible luminosité) dans des conditions de sécurité maximales, une installation électrique d'éclairage sera mise en place sur la zone de travail, les aires de stockage ainsi que l'accès immédiat au chantier.

- *Fluides*

La sollicitation des réseaux d'alimentation en eau potable sera sujette à autorisation des concessionnaires respectifs. Les besoins en eau pour le forage sont très variables, mais l'on peut considérer une estimation grossière de 5 000 m<sup>3</sup> (fabrication de boue, cimentation et essais).

La consommation approximative de fioul pour un forage (valeur indicative à confirmer après sélection de l'appareil et dotation de forage) est de l'ordre de 230 m<sup>3</sup>. Ainsi, des bacs de rétention (éventuellement des bacs gonflables) seront placés sous tous les moteurs thermiques et équipements hydrauliques ainsi que sous les fûts d'huile en service ou non. Ces bacs seront vidangés fréquemment.

#### *4.1.6. Remise en état du site*

Après évacuation par citernage ou via le réseau d'assainissement des effluents des travaux (en conformité avec la convention signée avec le concessionnaire du réseau d'eaux usées) et démontage du matériel de forage, la remise en état du site comprendra :

- (i) La démolition des dalles bétonnées de stockage (la plateforme de forage étant maintenue dans l'état) ainsi que l'évacuation des matériaux de démolition ;
- (ii) La remise en place des matériaux déplacés ;
- (iii) La remise en état de l'aire bitumée (enrobée) en prévision de sa réalisation partielle en parking à véhicules ;
- (iv) La finition des caves de têtes de puits ;
- (v) Le démontage de la clôture de chantier dans l'attente de l'aménagement de l'enceinte définitive.

#### *4.1.7. Organisation générale du chantier*

- *Horaires de travail*

Pour des raisons de sécurité et de stabilité de l'ouvrage, les opérations de forages doivent faire l'objet d'un minimum d'interruptions. Aussi, il est envisagé un fonctionnement du chantier en 3 postes de 8 heures par jour, 7 jours sur 7. Ce rythme de travail concerne les phases opérationnelles de forage et de test. Les autres opérations s'effectueront selon un régime horaire classique de huit heures par jour, cinq jours sur sept, sauf situation exceptionnelle de courte durée, qui sera gérée, le cas échéant, dans le cadre des lois et règlements définis par le code du travail (par exemple lors d'une opération de diagraphie, intervention urgente ou cas d'alarme pendant le week-end...).

- *Effectifs d'intervention*

Toutes entreprises confondues, l'effectif est en général de 15 personnes présentes simultanément sur le site, en pointe il peut être bien plus important (Tableau 39).

Tableau 39 : Organisation générale du chantier

Encadrement	Maitre d'ouvrage								
	Maitrise d'œuvre								
	1 x Superviseur jour 1 x Superviseur nuit								
	Mud-logging	Déviation	Fluide de forage	Service Traitement	Entreprise de forage	Diagraphies	Cimentation	Service vissage	Acidification
1 x géologue	1 x chef d'équipe	1 x mud engineer jour	1 x opérateur centrifugeuses jour	1 x rig manager 1 x chef de chantier jour 1 x chef de chantier nuit 1 x HSE 1 x mécanicien sénior 1 x électricien sénior	1 x ingénieur logging	1 x chef d'équipe	1 x chef d'équipe jour 1 x chef d'équipe nuit	1 x chef d'équipe	
3 x mud-loggers	3 x opérateurs	1 x mud engineer nuit	1 x opérateur centrifugeuses nuit	3 x chef de poste 3 x seconds 3 x accrocheurs 6 x opérateurs 1 x surfacier 1 x mécanicien 1 x électricien	3 x opérateurs	3 x opérateurs	1 x opérateur jour 1 x opérateur nuit	3 x opérateurs	
Non cadres									

## 4.2. Fonctionnement du doublet

Il est envisagé de demander dans le futur permis d'exploitation, un débit maximal de 400 m<sup>3</sup>/h. Néanmoins, l'exploitation du doublet est prévue à un débit de pointe de 360 m<sup>3</sup>/h et un débit moyen annuel de 250 m<sup>3</sup>/h.

Le principe de fonctionnement du doublet doit permettre une vitesse de circulation minimum de l'eau géothermale dans les cuvelages des puits et dans les conduites et échangeurs de surface. En effet, une trop faible vitesse de circulation de l'eau géothermale favorise les phénomènes de déposition et de corrosion à la surface des aciers et des plaques d'échangeurs.

### 4.2.1. Boucle géothermale

Esquissés dans le schéma de principe de la Figure 78, les travaux relatifs à la boucle géothermale comprendront respectivement :

- (i) La connexion des puits producteur et injecteur via une conduite double enterrée, de diamètres DN 250 x 2 ;
- (ii) La fourniture et la pose des équipements hydrauliques, mécaniques et électromécaniques/électroniques suivants :
  - Têtes de puits, robinetterie, tuyauterie, vannes
  - Filtres (caractéristiques à définir)
  - Électropompe de production immergée de puissance nominale 600 kW<sub>e</sub> (à valider à la suite des essais de production)
  - Colonne d'exhaure type HAGUSTA ou équivalent (acier revêtu intérieur/ extérieur caoutchouc/DN200, longueur estimée : 450 m)
  - Transformateur élévateur (à valider à la suite des essais de production)
  - Variateur de fréquences production (caractéristiques à valider à la suite des essais de production) ; filtres sinus
  - Tube de contrôle piézométrique du niveau dynamique
  - Ligne d'inhibition chimique en fond de puits de type TAI (tube auxiliaire d'injection) et station d'injection d'inhibiteur de surface
  - Groupe motopompe d'injection de puissance à définir (à valider à la suite des essais de production s'il y a besoin d'une pompe)
  - Variateur de fréquences injection (caractéristiques à valider à la suite des essais de production) ;
  - 1 dispositif anti-bélier
  - 1 soupape de décharge en entrée centrale
  - Instrumentation de mesure/contrôle (thermomètre, baromètre, débitmètre, pressostats) et système d'acquisition/ télétransmission paramètres boucle
  - Automate de régulation des débits et de détection/déclenchement de sécurités HP/BP

- Échangeurs de chaleur à plaques Titane (caractéristiques à définir)

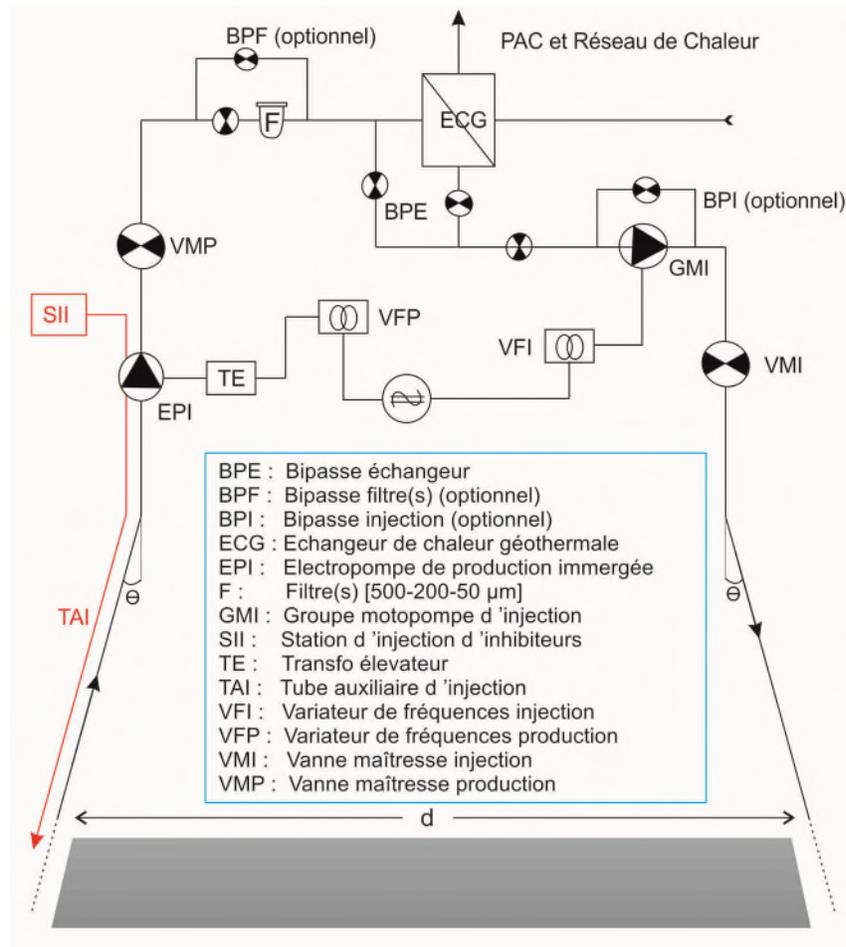


Figure 78 : Schéma de la boucle géothermale

#### 4.2.2. Caractéristiques prévisionnelles et dimensionnement des moyens de pompage

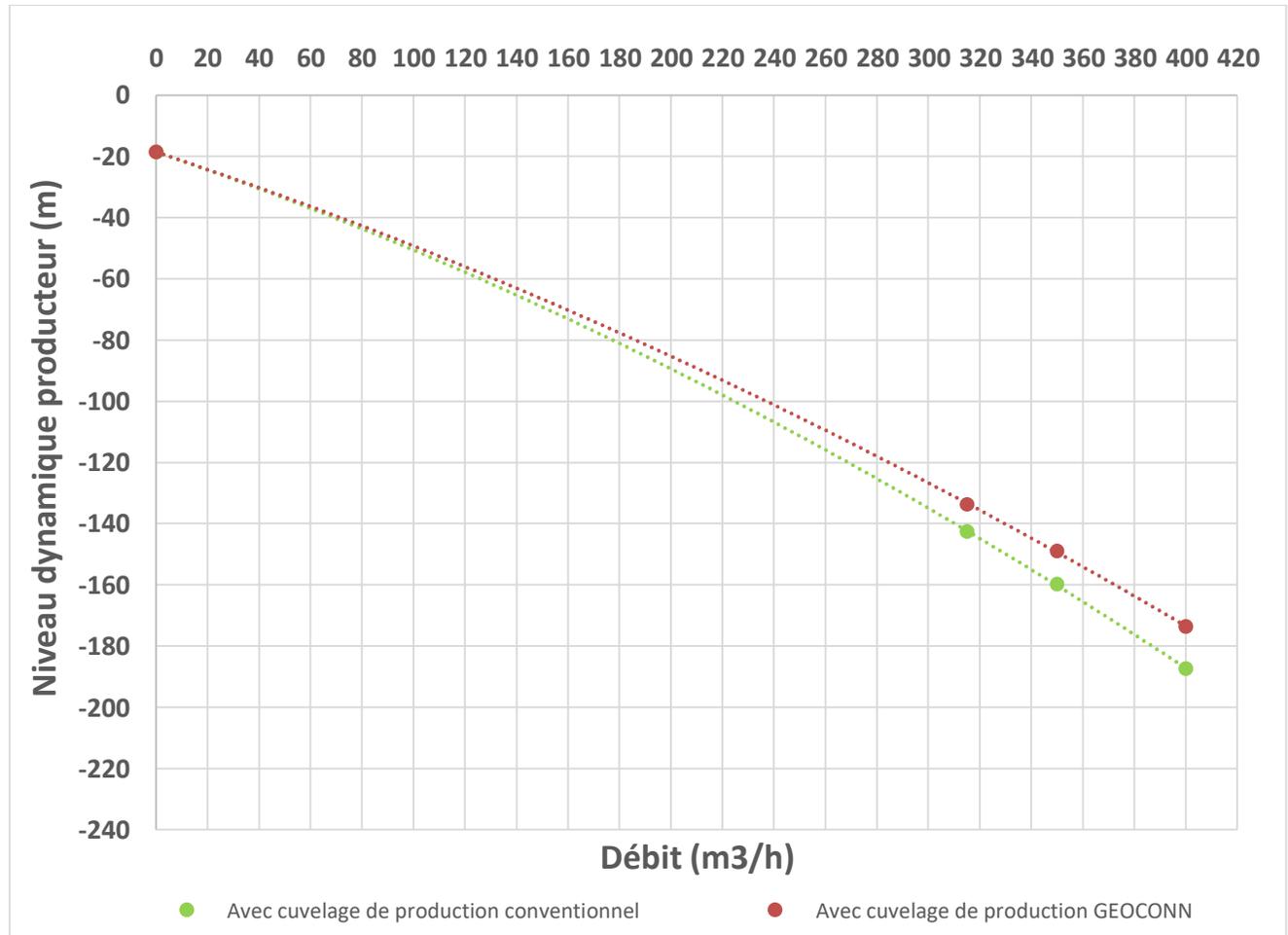
##### 4.2.2.1. Caractéristiques prévisionnelles

Les pressions (niveaux dynamiques) calculées en fonction des débits de circulation, en sus des rabattements modélisés, pour l'architecture retenue, intègrent :

- Le skin effect calculé pour un coefficient d'effet pariétal (skin factor)  $s = -2,5$
- Les pertes de charges dans les tubages
- Les pertes de charges dans la colonne d'exhaure associée à l'électropompe de production immergée.
- Une pression de consigne en entrée en échangeur fixée à 10 bars et 8 bars en sortie (au débit maximum produit/échangé).

Elles conduisent aux courbes caractéristiques illustrées en Figure 67 (niveaux dynamiques à la production) et en Figure 80 (puissances de pompage de production pour différents débits minimum, moyen et maximum).

Les corrections d'effet radial induit par la discrétisation ne sont pas prises en compte. En effet, les drains étant subhorizontaux, l'écoulement du réservoir vers le puits n'est plus majoritairement radial (après un certain temps de production ou d'injection). Ainsi, cette architecture de puits multi drains subhorizontaux (corrections d'effet radial négligées) combinées à un niveau statique évalué à 18 m de profondeur et une pression en sortie d'échangeur de 8 bars permettrait de réinjecter l'eau géothermale dans le réservoir sans pompe d'injection.



**Figure 79 : Puits producteur GVZ1 – Courbe caractéristique Niveaux dynamiques - Débits.**

La faible perméabilité du réservoir combinée à l'utilisation d'un cuvelage de production de diamètre 8<sup>1/2</sup> entraînent des niveaux dynamiques au niveau du puits producteur allant jusqu'à environ 190 mètres à 400 m³/h (Figure 79). Au niveau du producteur, l'utilisation d'un cuvelage de production GEOCONN permet de réduire d'environ 20% les pertes de charges dans le cuvelage et ainsi de gagner une dizaine de mètres au niveau du rabattement observé dans le puits. La chambre de pompage a donc été placée à 450 mètres de profondeurs afin d'éviter tout risque au fluide de passer sous le point de bulle (vaporisation du gaz contenu dans l'eau géothermale qui pourrait endommager la pompe d'exhaure). Pour un débit de 360 m³/h, la puissance de la pompe d'exhaure s'élève à environ 460 kW. Comme expliqué précédemment, le

niveau statique du puits (évalué à 18 mètres de profondeur, le puits ne serait donc pas artésien), combiné au 8 bars de pression en sortie d'échangeur devraient suffire à réinjecter l'eau géothermale dans le réservoir.

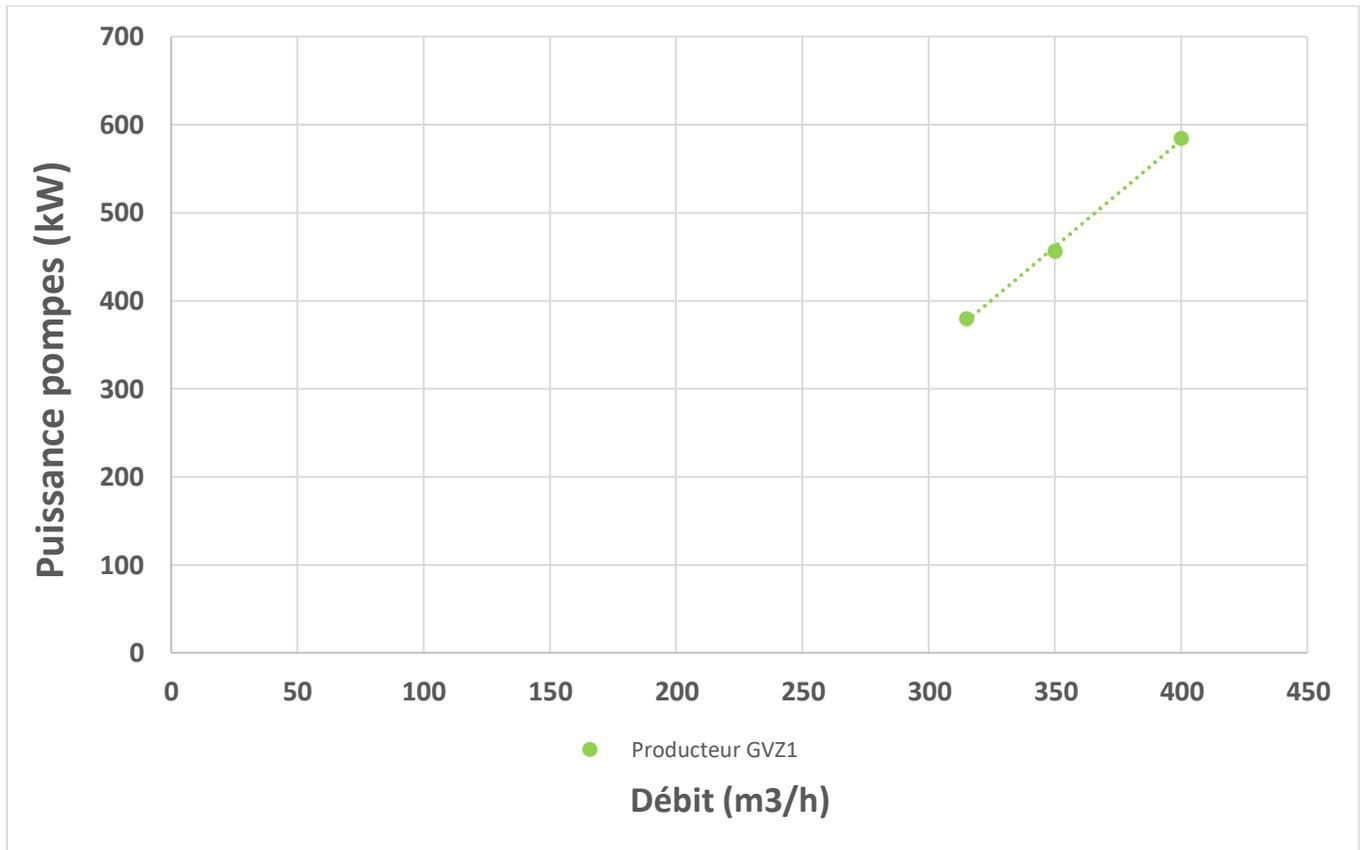


Figure 80 : Caractéristique prévisionnelle de la pompe d'exhaure – Architecture retenue – forage 8''<sup>1/2</sup>.

#### 4.2.2.2. Descriptif du système de pompage d'exhaure

La Figure 81 décrit le principe du système de pompage d'exhaure et son assemblage.

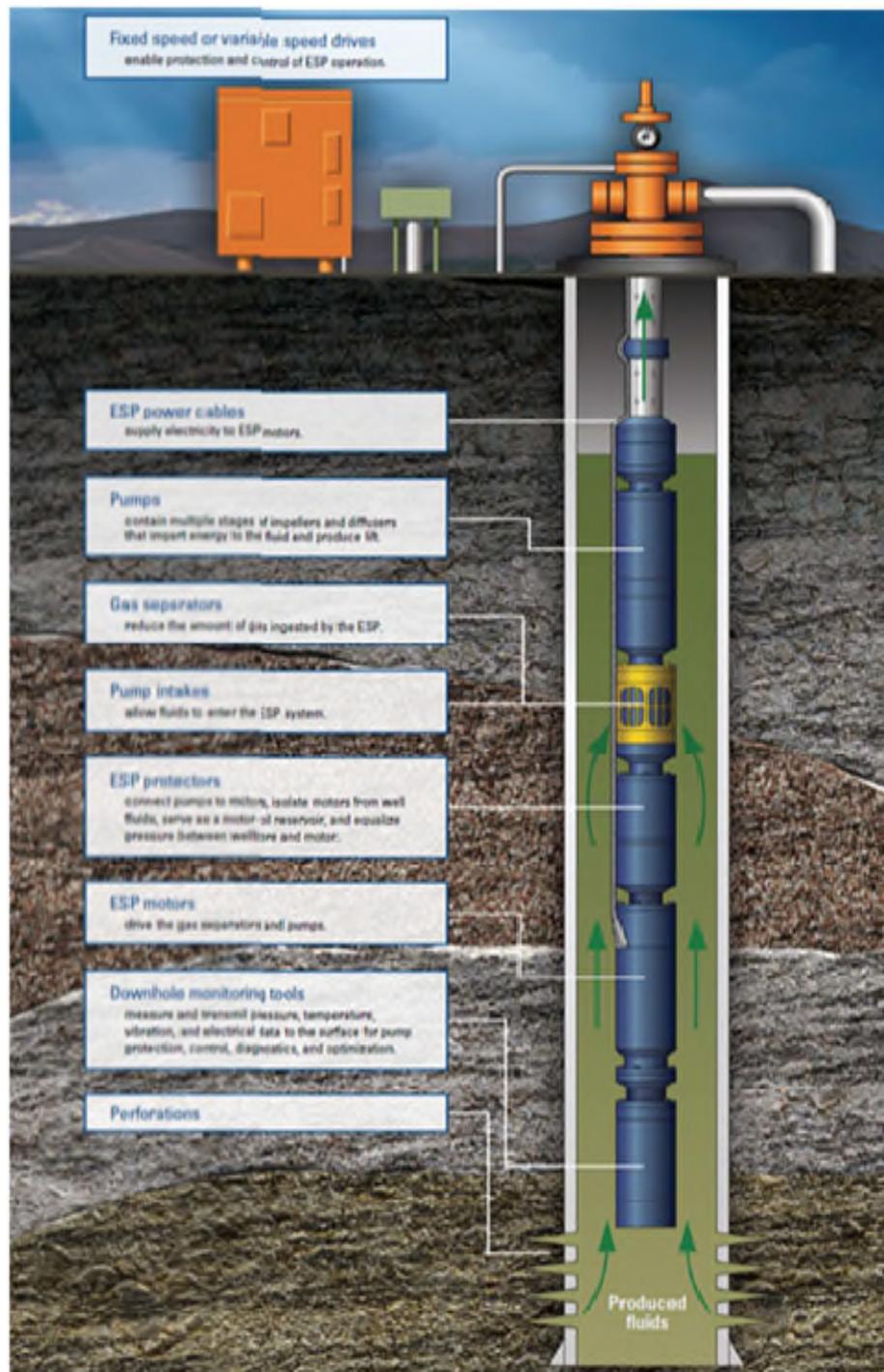


Figure 81 : Pompe centrifuge immergée

## - *Production*

Les pompes centrifuges immergées utilisées dans l'industrie pétrolière et en géothermie sont des pompes centrifuges à étages multiples entraînées par un moteur électrique. Elles sont utilisées pour atteindre les objectifs de production dans des puits dont les performances sont limitées par les conditions réservoir et/ou les pertes de charges dans la colonne de production. Le système de pompage est suspendu au tubage de production, le moteur étant positionné en dessous de la pompe et la pompe refoulant le fluide dans la colonne de production. Le moteur est alimenté par un câble électrique triphasé, déployé depuis la surface dans l'espace annulaire colonne d'exhaure/tubage.

Le système de pompage est composé de :

- La pompe centrifuge.
- Les protecteurs ou pièces d'étanchéité.
- Le moteur électrique.
- Le câble de puissance.

## - *Pompe*

La pompe est composée de plusieurs étages montés sur un arbre commun.

Chaque étage est constitué d'un impulseur - mobile avec l'arbre - et un diffuseur - statique solidaire du corps de la pompe. Le diffuseur dirige le flux de fluide quittant l'impulseur vers l'entrée de l'étage suivant.

Les pompes sont fabriquées dans des matériaux capables d'opérer dans un environnement immergé et spécifiquement adaptés aux puits en question.

Il existe une multitude de configurations possibles. Le choix de la configuration est conditionné par les caractéristiques du puits.

Le type et le nombre d'étages sont respectivement déterminés par le débit et la hauteur manométrique requise. La hauteur manométrique totale développée par la pompe est le produit du nombre d'étages par la hauteur unitaire.

Pour permettre l'entrée du fluide, une aspiration est intégrée au corps de la pompe.

Une aspiration standard ne permet pas de séparer le gaz à l'entrée de la pompe. Il est donc préconisé de maintenir une cote d'immersion suffisante au-dessus de la pompe afin d'éviter le bullage et les risques de cavitation.

Les pompes de type compression (impulseurs fixés axialement par rapport à l'arbre) sont couramment utilisées en géothermie afin d'améliorer la résistance de l'hydraulique aux contraintes axiales dues aux variations de la Hauteur Manométrique Totale (HMT) en particulier en cas de surcharge.

## - *Protecteur ou pièce d'étanchéité*

Le Protecteur combine une ou plusieurs chambres d'étanchéité préremplies d'huile ; ses fonctions consistent à :

- Accoupler les éléments moteur et pompe afin de transmettre le couple moteur à la pompe à travers l'arbre.
- Servir de réservoir d'huile moteur pour compenser l'expansion et les pertes liées aux variations de température durant le fonctionnement
- Reprendre la charge verticale résultant du poids de la pompe, du débit et des forces centrifuges.
- Éviter la migration du fluide du puits dans le moteur en assurant une étanchéité entre la pompe et le moteur
- Équilibrer les pressions entre le moteur et l'espace annulaire du puits

Les chambres du Protecteur peuvent être combinées en série (S) ou en parallèle (P). Une combinaison en série crée une étanchéité supplémentaire tandis qu'une combinaison en parallèle augmente la capacité d'huile.

Le nombre de chambres d'étanchéité est basé sur les volumes d'expansion/contraction potentiels extrêmes de l'huile dans le puits, notamment déterminés par la puissance du moteur et la température du puits. Pour obtenir l'étanchéité requise, les Protecteurs peuvent être installés en tandem.

La reprise de la charge verticale de la pompe est assurée par une chambre supplémentaire située à la base du Protecteur. Elle est constituée de deux paliers de butée (*thrust runner*) reprenant les efforts de compression (*downthrust*) et de traction (*upthrust*) transmis par l'axe de la pompe.

Les chambres du Protecteur sont isolées par de pièces d'étanchéité et des vannes qui permettent l'accès à la chambre suivante lorsqu'une chambre est entièrement contaminée.

Le corps du Protecteur recommandé ici est en acier inox. La tête et la base en acier inox 416. Les vannes et tubes internes sont également en acier inox.

#### - Moteur

Les moteurs utilisés dans les systèmes de pompage immergés (Schlumberger/REDA, BAKER/CENTRILIFT entre autres) sont des moteurs à induction dipolaires triphasés à cage d'écureuil. Ils sont remplis d'une huile minérale hautement raffinée aux propriétés diélectriques permettant la lubrification des paliers et la conductivité thermique. Le poids des rotors est repris par les paliers de butée du moteur. La chaleur générée en cours de fonctionnement est transférée au fluide de production lors de son écoulement le long du corps du moteur. La prise du moteur (Pot Head) se situe à la tête du moteur et permet le branchement du câble électrique triphasé.

Pour réduire les coûts d'énergie, tous les moteurs possèdent une technologie d'enroulements déposée assurant une performance électrique et une efficacité optimale.

Les moteurs permettent de fonctionner dans des puits avec des températures de fluide allant jusqu'à 175 °C.

Le corps du moteur recommandé ici est en acier inox. La tête et la base en acier inox 416.

- *Câble de puissance*

Les pompes électriques submersibles sont alimentées à travers un câble passant le long de l'équipement dans l'espace annulaire *tubing/casing*.

Le câble est fixé à la colonne de production. Au niveau du moteur, le câble est branché à la prise moteur qui permet la transmission de la puissance aux enroulements moteur tout en prévenant l'intrusion du fluide de production dans le moteur.

- *Équipements de surface*

Les équipements de surface associés à l'EPI (ÉlectroPompe Immergée) comprennent un variateur de fréquence, un transformateur élévateur et un capteur de pressions/températures de fond.

### 4.3. Résumé de l'étude d'impact sur l'environnement

L'étude d'impact sur l'environnement fait l'objet de l'ensemble du Chapitre 5 du présent dossier. Les éléments présentés dans les paragraphes ci-dessous reprennent donc de façon synthétique les impacts temporaires (en cours de travaux) par opposition aux effets permanents (en cours d'exploitation) qu'ils soient positifs ou négatifs, ainsi que les mesures compensatoires envisagées.

#### 4.3.1. Impacts - en cours de travaux.

Il n'existe aucun site Natura 2000 à proximité des forages.

Pendant la durée des travaux, l'impact visuel sera surtout le fait du mât de forage qui aura une hauteur de 41,3 mètres. Volontairement rendu très visible par des couleurs anticollisions, le mât attirera l'œil d'un observateur sans pour autant choquer outre mesure.

La mobilisation d'un appareil de forage et d'une dotation lourde à motorisations électriques et hydrauliques (à l'exception des groupes électrogènes qui pourraient être thermique) ainsi que le choix d'un site de forage relativement isolé et éloigné de plus de 50 m des immeubles et résidences riveraines limitera au maximum les nuisances sonores. La pose de murs anti-bruit, si nécessaire, limitera également ces nuisances au niveau des bâtiments les plus proches de la zone de travaux à savoir ceux de l'entreprise SAFRAN localisés à l'Ouest du site. Enfin pour limiter l'impact sonore du chantier la nuit, les activités les plus génératrices de bruits seront réalisées uniquement de jour. Ainsi, la principale gêne devrait être liée, aux chocs des tiges métalliques et au BIP de recul des engins de chantier.

Les risques de pollution des sols et des aquifères traversés par les forages sont réduits, sinon éliminés, par (i) l'utilisation de boues à l'eau compatibles avec le milieu naturel, (ii) l'évacuation des résidus solides (déblais, lavés de forage, surnageants, déshydratés, des boues) vers des sites de stockage et de traitement agréés par l'administration minière et environnementale, (iii) la mise en place de tubages acier cimentés, (iv) une aire de travail bitumée et cimentée (plateforme de forage et caves de têtes de puits) équipée d'un réseau de recueil/drainage des eaux de ruissellement, et (v) la disponibilité d'une surcapacité de stockage (bacs, bennes, citernes), ainsi qu'une ligne de traitement/refroidissement des effluents liquides (eaux d'essais), gazeux (inhibition des gaz dissous) et solides (filtration des particules en suspension).

Les équipements et personnels d'exécution/encadrement sont éprouvés et expérimentés en matière de forages géothermiques et pétroliers, et rompus aux exercices/*briefings* de sécurité exigés par la profession et l'administration minière de tutelle. Concernant la sécurité du public, le chantier sera balisé, clos (grillage ou bardage périphérique de 2 mètres de hauteur) et interdit au public par voie d'affichage (panneaux).

Un protocole sera établi en concertation avec les services techniques de la Ville et des Routes et Chaussées (DIRIF) (si besoin) pour l'organisation des transports lors des phases d'amenée/repli des matériels et d'approvisionnement du chantier.

Les travaux de forages et d'installation des infrastructures (notamment la centrale géothermique), incluant les moyens de levage feront l'objet d'une dérogation temporaire aux règles de servitudes le temps des aménagements.

#### *4.3.2.Impacts - en cours d'exploitation.*

Du point de vue des interférences avec les exploitations voisines, la modélisation des transferts de masse et de chaleur au sein du réservoir géothermal indique une interférence thermique nulle sur les puits géothermiques, limitrophes existants et projetés, localisés à environ 6 km (Bagneux 1 et Bagneux 2).

La prévention des risques de fuite en sous-sol est assurée par un contrôle régulier et réglementé par les autorités. La mise en place d'un traitement inhibiteur en fond de puits producteur permet de protéger et sécuriser l'ensemble de la boucle géothermale (puits producteur + boucle de surface + puits injecteur) contre les phénomènes de corrosion inhérents à l'exploitation de la nappe du Dogger. En outre, les aquifères à eaux douces de l'Albien et du Néocomien bénéficient d'un double tubage 13<sup>"3/8</sup> x 9<sup>"5/8</sup>, à entrefer cimenté, de protection.

Concernant la compatibilité des travaux et mesures compensatoires prévus (détaillés dans le Chapitre 5.3), ils sont conformes aux prescriptions du SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) de la Bièvre et du SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) édictées par l'Agence de Bassin (Seine Normandie) compétente.

L'activité d'exploitation de la centrale géothermique n'aura pas d'impact notable sur les infrastructures voisines. Les interventions lourdes de *workover* sont rares (fréquence : tous les dix à quinze ans, durée : variable entre 15 jours et plusieurs mois), elles occasionnent la circulation d'une vingtaine de poids lourds vers la parcelle.

En ce qui concerne les risques pour la sécurité des personnes, le périmètre comprenant l'ensemble des installations futures sera entièrement clôturé et fermé au public. Les têtes de puits sont placées dans des caves recouvertes de caillebotis. Seul le personnel spécialisé est autorisé à intervenir sur le site. En fonctionnement normal de la centrale géothermique, il n'existe aucun dégagement gazeux.

