



arverne  
GROUP

Membre d'Arverne Group  
entreprise à mission

2gré







*Demande de deuxième prolongation du Permis Exclusif de  
Recherche de Géothermie de Val de Drôme de 2gré  
(Anciennement Georhin)*  
**Version allégée**

5.

Programme des travaux et engagements  
financiers

Rédaction du document

Référence interne	Date	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
5_PER de Val de Drôme	06/11/2023	Romain DUHAMEL	Damien BEVILLON	Pierre BROSSOLLET

Diffusion du document

Date	Destinataire	Organisme	Version numérique	Version papier
08/11/2023		DGEC / BRESS	1	0
08/11/2023		DREAL	1	0

2gré - 49 Route d'Agen 47310 Estillac  
Adresse de correspondance : 2gré chez Arverne Group, 2 avenue Pierre Angot 64000 Pau  
SAS au capital de 3 210 000 € | RCS AGEN 529 770 646 | Siret : 529 770 646 00030 | Code APE 7112B

[www.2gre.fr](http://www.2gre.fr)

## Table des matières

1	Programme des engagements financiers envisagés sur la période de deuxième prolongation du PER de Val de Drôme .....	7
1.1	Budget du programme d'exploration prolongation n°2 .....	7
1.2	Planning prévisionnel des travaux .....	8
2	Synthèse des engagements techniques envisagés sur la deuxième prolongation du PER de Val de Drôme	9
2.1	Préambule.....	9
2.2	Phase avant forage .....	9
2.2.1	Acquisition de données géophysiques complémentaires .....	9
2.2.2	Principe de la sismique réflexion .....	10
2.2.3	Le dispositif d'acquisition des données .....	12
2.2.4	La source : les vibrations .....	12
2.2.5	Les récepteurs : géophones .....	14
2.2.6	Résumé des avantages de la technique « pseudo 3D » .....	15
2.3	Définir le champ de contrainte régional actuel .....	16
2.3.1	Etude de la stabilité des failles.....	16
2.3.2	Modélisation des écoulements hydrauliques avant forage .....	17
2.4	La phase de forage et tests .....	18
2.5	Valorisation des données issues du puits exploratoire .....	19
2.6	Description sommaire d'un programme de forage type .....	19
2.6.1	La préparation de l'emplacement de forage .....	19
2.7	La phase de forage.....	20
2.7.1	Les tests du réservoir ou essais de production .....	23
2.7.2	Remise en état des lieux.....	23
2.7.3	Sécurité.....	24
2.8	Protection de l'Environnement.....	24

## Table des figures

Figure 1 : Principe de la sismique réflexion, application au levé « pseudo 3D ».....	10
Figure 2: Localisation de la sismique pseudo 3D envisagée par rapport au PER de Val de Drôme .....	11
Figure 3: Sismique pseudo 3D envisagée sur le PER dit de Val de Drôme .....	11
Figure 4: Bloc diagramme schématique du dispositif de sismique réflexion « pseudo 3D ». Dans le cas présent, le convoi se déplace du Point vibré 1 vers le Point vibré 2. ....	12
Figure 5 Exemple de camion vibreur type Birdwagen MARK IV, insonorisé.....	13
Figure 6 : Géophone dernière génération (STRYDE).....	14
Figure 7: Exemple d'analyse du slip tendency d'une faille sur le PER de Strasbourg.....	17
Figure 8 : Exemple d'emprise de chantier .....	20
Figure 9 : Exemple d'atelier de forage, ici le rig B04 450 T sur le projet de Vendenheim .....	21
Figure 10 : Exemple type d'une conception de forage profond, ici le puits VDH1 foré par Georhin en Alsace. ....	22

## Table des tableaux

Tableau 1: Budget prévisionnel PER de Val de Drôme sur la deuxième prolongation 2024-2029.....	7
Tableau 2: Planning prévisionnel des travaux sur la deuxième prolongation du PER .....	8
Tableau 3: Echancier des travaux sur la deuxième prolongation du PER .....	9
Tableau 4 : Caractéristiques de la source sismique. ....	12
Tableau 5: Caractéristiques du récepteur. ....	15

# 1 Programme des engagements financiers envisagés sur la période de deuxième prolongation du PER de Val de Drôme

## 1.1 Budget du programme d'exploration prolongation n°2

Tableau 1: Budget prévisionnel PER de Val de Drôme sur la deuxième prolongation 2024-2029

	€
<b>ACQUISITION DONNÉES GÉOPHYSIQUE</b>	<b>2 500 000</b>
Acquisition sismiques 3D	2 500 000

*Acquisition éventuelle de lignes nouvelles de sismique sur les sous zones d'intérêts, dont déclaration de levé: Complément lignes sismiques 3D pour amélioration modèle partie Nord / Ouest et Sud de Valence*

<b>FORAGE#1</b>	<b>14 050 000</b>
Génie civil / Plateforme	400 000
Consommables (casing, outils, boue, tete de puits, mud logging, cimentation, traitement des cuttings...)	6 500 000
Appareil de forage 3000 HP, 130 j à 35 000 €/j	4 550 000
Supervision	1 000 000
Provision pour drain horizontal / Echangeur	1 250 000
Provision pour abandon ou équipement production puits	350 000

*Réalisation du forage de reconnaissance devant atteindre 300 m dans le socle, près d'une faille principale, soit une profondeur estimative entre 3000 et 4500 m avec déport latéral optionnel de 2000 m. Selon résultat, possibilité de poursuivre le forage en échangeur avec stimulation pour approcher le débit cible*

<b>TEST DE PUIITS - LONGUE DURÉE</b>	<b>950 000</b>
Acidification	300 000
Logging	100 000
Immobilisation rig	300 000
Test pompage et réinjection	250 000

*Test longue durée du puits zone 1 sur la hauteur cumulée, par niveaux successifs (15 jours de tests), Interprétation des données de test*

<b>ÉTUDES</b>	<b>550 000</b>
Recalage du modèle géologique post 3D	400 000
Recalage du modèle géologique post forage exploratoire	150 000

**BUDGET TOTAL 2° PERIODE EXPLORATOIRE : 18 050 000**

## 1.2 Planning prévisionnel des travaux

Tableau 2: Planning prévisionnel des travaux sur la deuxième prolongation du PER

### PER

Dépôt de la demande de renouvellement du PER	mars-24
----------------------------------------------	---------

### ACQUISITION DONNÉES GÉOPHYSIQUE & ÉTUDES

Complément de travaux de sismique 3D	2024
Travaux interne sur le recalage du modèle géologique	2024/2025

### FORAGE

Travaux plateforme de forage	2025
Début travaux de forage	2026
Fin travaux aux puits et tests	2027/2028

### Décision de demande d'exploitation ou travaux complémentaires

- Si travaux exploratoires complémentaires :	2027 - 2029
- Si demande d'exploitation, dépôt dossier	2028
Recalage modele geologique post forage	2027 / 2028
Raccordement réseau Ville de Valence	2028

Tableau 3: Echancier des travaux sur la deuxième prolongation du PER

€	2024	2025	2026	2027	2028	2029	TOTAL programme
Recalage modélisation géologiques		400 000			100 000	50 000	<b>550 000</b>
Acquisition éventuelle de lignes nouvelles de sismique 3D	2 500 000						<b>2 500 000</b>
Génie civil / Plate forme		400 000					<b>400 000</b>
Forage jusqu'à 3000 à 4500 mVD			12 050 000	1 600 000			<b>13 650 000</b>
Test dont logging				500 000	450 000		<b>950 000</b>
<b>TOTAL/année</b>	<b>2 500 000</b>	<b>800 000</b>	<b>12 050 000</b>	<b>2 100 000</b>	<b>550 000</b>	<b>50 000</b>	<b>18 050 000</b>

## 2 Synthèse des engagements techniques envisagés sur la deuxième prolongation du PER de Val de Drôme

### 2.1 Préambule

Pour rappel, 2gré possède une autorisation de forage sur la parcelle rue de la foret, quartier Briffault à Valence (26000), objet d'un arrêté préfectoral en date du 22/05/2017.

Conformément au retour d'expérience, une acquisition de données géophysique complémentaire sera réalisée sur une partie du PER afin de préciser le contexte structural et l'aléas sismique. A l'issue de cette étude, et en accord avec le territoire, il sera décidé de confirmer si une implantation du doublet sur la parcelle Briffault permettrait d'atteindre la cible réactualisée ou bien s'il convient de démarrer sur une parcelle différente. Dans la suite du programme de travaux, il sera décrit le contexte des travaux de forage de manière générale, sans préciser la localisation qui le sera donc postérieurement aux compléments d'études.

### 2.2 Phase avant forage

#### 2.2.1 Acquisition de données géophysiques complémentaires

Dans le cadre de son PER dit de « Val de Drôme », 2gré prévoit d'acquérir un levé plus précis de mesures géophysiques relevant d'une méthode novatrice de sismique réflexion dite « pseudo 3D » et dont la démarche se divise en deux étapes : 1) calibrage de la méthode « pseudo-3D » et 2) mise en œuvre pour approfondir les objectifs de la cible géothermique.

Ces levés complémentaires permettront également de confirmer et/ou de mettre à jour les trajectoires des puits.

Le tracé des lignes camion sera amené à être ajusté selon les données de terrain, le résultat du permittage et les conseils des prestataires, ce qui modifiera le kilométrage linéaire total.

Conformément à l'article L121-1, les levés seront réalisés avec le consentement du propriétaire de la surface, en l'occurrence les arrêtés de voirie pour les chemins et routes communales, départementales et nationales ou avec l'autorisation de passage du propriétaire public ou privé. Les autorisations définitives de passage des propriétaires ou gestionnaires des routes seront négociées au cas par cas lorsque le tracé définitif aura été

retenu. La DREAL sera informée et une mise à jour des modifications sur le tracé définitif ainsi que les autorisations d'accès aux voiries lui seront fournis avant les passages.

## 2.2.2 Principe de la sismique réflexion

Dans le cas présent d'une sismique réflexion « pseudo 3D », la réception et l'enregistrement des ondes sont directement opérés par le capteur lui-même (un camion laboratoire n'est donc plus nécessaire). Il s'agit de capteurs autonomes, légers et compacts, dotés d'une mémoire de stockage. Ils sont faciles à déployer sur l'ensemble de la zone de levé selon la résolution définie au préalable. La figure suivante décrit le principe de la méthode de sismique réflexion.

Les données brutes récoltées après l'acquisition sont conditionnées puis vérifiées avant d'être transmises par support informatique au centre de calcul. Elles doivent ensuite être traitées à l'aide de logiciels spécialisés. Dans le cas présent d'une acquisition « pseudo 3D », un traitement spécifique et adapté permet d'obtenir un cube sismique 3D. L'interprétation est réalisée par des géophysiciens et des géologues afin d'identifier les réseaux de failles et la profondeur des différents horizons.

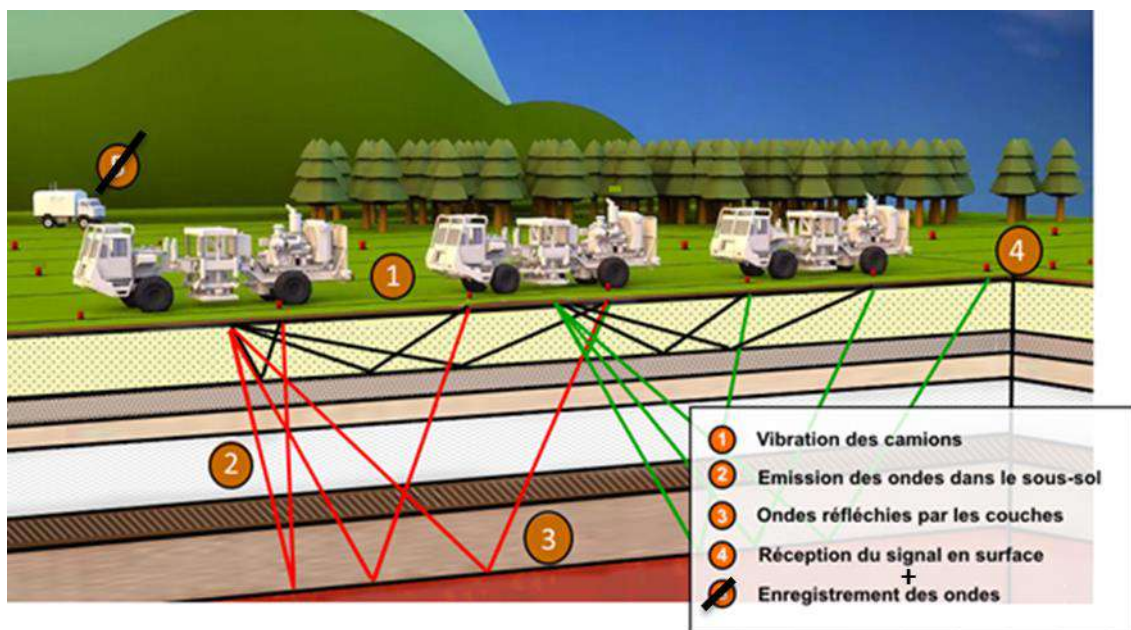


Figure 1 : Principe de la sismique réflexion, application au levé « pseudo 3D ».

Les Figure 2 et Figure 3 présentent la campagne de levés de sismique réflexion pseudo 3D prévue sur le PER de Val de Drôme dans le but d'améliorer la compréhension du modèle géologique sur le secteur de Valence.

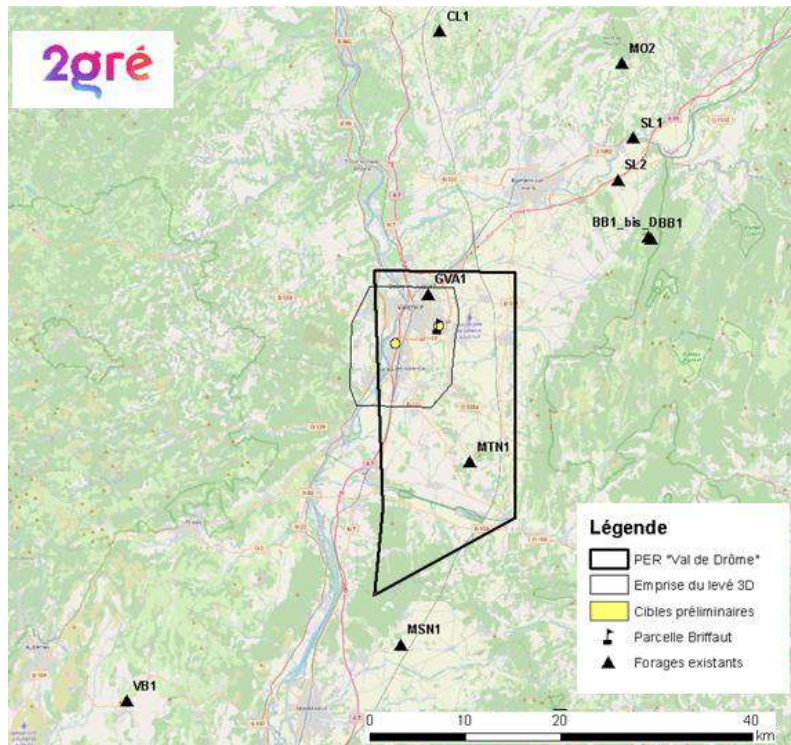


Figure 2: Localisation de la sismique pseudo 3D envisagée par rapport au PER de Val de Drôme



Figure 3: Sismique pseudo 3D envisagée sur le PER dit de Val de Drôme

Caractéristiques du levé pseudo 3D envisagé :

- Surface : 128 km<sup>2</sup>
- Interligne : > 300 m
- Lignes camions irrégulières, adaptées aux routes/chemins : inter-tir de 30 m soit ~ 14 600 positions
- Pas d'orientation principale

### 2.2.3 Le dispositif d'acquisition des données

L'analyse qui suit se base en partie sur l'article « Frugal Seismic for Geothermal Industry » de Puech et al., 2022 (RTS, HITA nv et GTG) et sur l'offre technico-financière fournie par GTG.

Le dispositif d'acquisition sur le terrain (Figure 4) est composé :

- d'une source : convoi de camions vibrateurs ;
- de récepteurs : géophones (récepteurs) autonomes, plantés dans le sol.

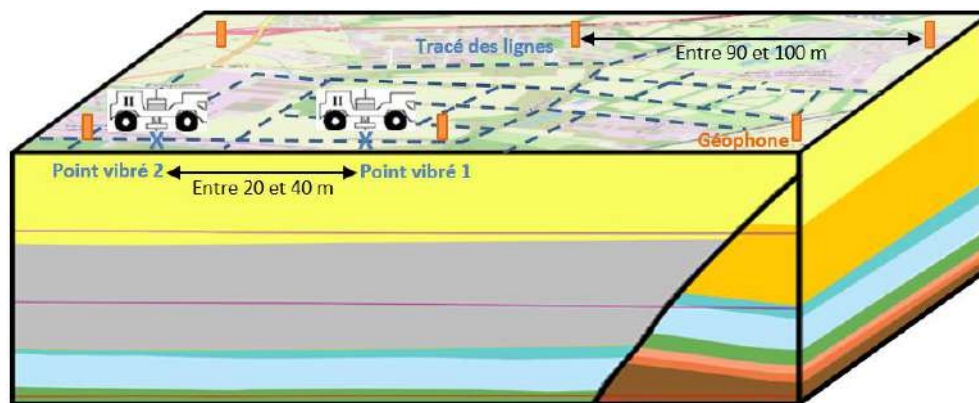


Figure 4: Bloc diagramme schématisé du dispositif de sismique réflexion « pseudo 3D ». Dans le cas présent, le convoi se déplace du Point vibré 1 vers le Point vibré 2.

### 2.2.4 La source : les vibrations

Les vibrations sont effectuées par un convoi de plusieurs camions vibrateurs. Ces derniers sont munis de plaques hydrauliques vibratoires carrées, d'environ 1 m de côté, qui vont vibrer simultanément dans une certaine gamme de fréquence et pendant un temps défini (quelques secondes maximum), afin de propager des ondes acoustiques dans le sous-sol.

Le convoi est composé de 4 camions maximum, espacés de quelques mètres. Ils suivent le tracé des lignes prédéfini et s'arrêtent à chaque point d'émission des vibrations (point vibré ou PV), soit tous les 20 à 40 mètres. Une autorisation en amont des levés devra être obtenue pour le passage des camions sur les routes, chemins et champs agricoles concernés par le tracé, lequel sera modifié le cas échéant.

Tableau 4 : Caractéristiques de la source sismique.

Type de source	Vibration
Type de vibreur	Plaque hydraulique Y2400
Type de vibrateur	Birdwagen MARK IV

Nombre de vibrateur	Maximum 4
Force hydraulique	42 000 livres
Dimension vibrateur	8 m x 2,45 m x 3,35 m (L x l x h)
Longueur du convoi	Maximum 35 m
Distance entre les points vibrés	20 à 40 m
Nombre total de points vibrés	2000 à 3000
Durée d'enregistrement	6 secondes
Longueurs de sweeps	20 s en linéaire
Fréquences à chaque sweep	4 – 100 Hz
Nombre de sweeps par PV	1 à 2



Figure 5 Exemple de camion vibrateur type Birdwagen MARK IV, insonorisé.

**Remarque :**

En zone plus urbanisée, pour adapter la force à la proximité des constructions, mais également pour limiter les perturbations sur le trafic routier, le nombre de camions peut être adapté.

Rappelons que l'utilisation de ces vibrations de faible amplitude est non destructive et sans risque pour l'homme et l'environnement. Cette technique a déjà été utilisée dans les rues de grandes villes telles que Paris, Genève, Strasbourg ou encore dans des parcs naturels sensibles et protégés. 2<sup>gré</sup> s'assurera que le programme d'acquisition respecte toutes les spécifications techniques et minimise l'impact sur l'environnement. Toutes les constructions, le trafic routier des routes principales et secondaires, les voies ferrées, les lignes d'eau et de gaz seront rigoureusement étudiés et les levés seront adaptés en conséquence. Ce travail sera réalisé pendant toute la phase de permittage.

## 2.2.5 Les récepteurs : géophones

Les ondes acoustiques réfléchies sur les différentes couches du sous-sol sont enregistrées à l'aide de petits capteurs plantés dans le sol, appelés géophones (Figure 6).

Les récepteurs STRYDE sont légers, peu encombrants et leur faible empreinte les rend très discrets, ce qui facilite leur déploiement sur le terrain. L'intervalle étant de 80 à 90 m, la pose des géophones se fait à pied et ne présente ainsi aucune nuisance ou risque de dégradation pour l'environnement.

Ce type de géophone est autonome et enregistre directement le signal (pas de communication entre eux ni avec un camion laboratoire). L'autonomie de la batterie et la capacité de mémoire de stockage permettent de réaliser quatre semaines d'enregistrement continu, ce qui donne suffisamment de temps pour déployer, acquérir et récolter les données sur des levés à surface réduite. L'ensemble des géophones est donc déployé en amont et maintenu actif pendant toute la durée de l'acquisition. De cette façon, chaque position vibrée peut être enregistrée par tous les récepteurs couvrant l'ensemble de la surface du levé.

Les données sont récoltées sur place, après acquisition du dernier point vibré. Elles sont ensuite conditionnées puis vérifiées avant d'être transmises par support informatique au centre de calcul. Cette opération prend au maximum une journée et l'équipe ne quitte le terrain que lorsque les données ont été chargées dans le logiciel de traitement (au centre de calcul).

Le traitement utilisé est celui d'une PSTM ou PSDM classique, qui intègre une étape clef : la régularisation. En effet, un levé « pseudo 3D » utilise une grille plus lâche et donc une distribution des données d'entrée plus espacée. La régularisation corrige ce phénomène et harmonise la couverture par interpolation des données dans le domaine 5D : x, y, z, temps et amplitudes. Elle agit également comme un filtre en atténuant le bruit de fond. Le résultat est assez spectaculaire et permet une reconstruction fiable.

Les récepteurs STRYDE présentent des avantages en termes de HSE, l'équipe de déploiement est exposée à moins de risques du fait de la réduction : du nombre de véhicules, du poids de l'équipement et du temps d'installation. L'empreinte carbone est également réduite.

Le Tableau 5 renseigne les caractéristiques du récepteur.



Figure 6 : Géophone dernière génération (STRYDE).

Tableau 5: Caractéristiques du récepteur.

Type de récepteur	Géophone 1C (STRYDE) Accéléromètre piézoélectrique
Dimension du géophone	13 cm de haut et 4 cm de diamètre
Poids du géophone	150 g
Distance entre les géophones	80 à 90 m
Nombre total de canaux actifs	Environ 3000
Offset Max	Tous les capteurs en enregistrement

## 2.2.6 Résumé des avantages de la technique « pseudo 3D »

Outre les considérations d'efficacité financière, il est intéressant de réaliser ce type de levé pour des raisons pratiques et pour une meilleure acceptation du projet. Les projets géothermiques sont quasi systématiquement situés à proximité où dans des zones urbaines (pour être plus proches des utilisateurs). De tels environnements comportent des avantages logistiques mais aussi quelques défis, qui sont atténués par le design du levé « pseudo 3D » :

Défis 2D ou 3D classique :	Avantages « pseudo 3D » :
<ul style="list-style-type: none"> <li>• phase de permittage complexe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• surface de levé réduite</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• fenêtre de temps limitée pour l'acquisition</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• grille plus espacée dont acquisition rapide</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• niveau de bruit élevé</li> <li>• contrôle des vibrations</li> <li>• exposition aux réticences de la population</li> <li>• compensations pouvant être coûteuses</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• contournement des zones urbanisées</li> <li>• récepteurs légers, compacts et peu encombrants</li> </ul>

### Réception, enregistrement et analyse du signal

Les récepteurs sont autonomes, léger et compacts (aucun câbles nécessaires). Ils sont donc faciles à déployer sur l'ensemble de la zone du levé selon la résolution définie au préalable. L'ensemble des géophones est déployé en amont et maintenu actif pendant toute la durée de l'acquisition. La réception et l'enregistrement des ondes sont directement opérés par le géophone lui-même (un camion laboratoire n'est donc plus nécessaire).

### Traitement des données et résultat

Le traitement utilise un workflow 3D classique qui intègre des algorithmes de régularisation. Par la suite, les données sont interpolées dans le domaine 5D (x, y, z, temps et amplitudes). Ce traitement spécifique et adapté permet d'obtenir un cube sismique 3D.

### Conclusion

En définitive, la conception ingénieuse du levé, intégrant l'utilisation de géophones dernière génération et de techniques de traitement adaptées, peut produire des cubes sismiques 3D adéquats dans un cadre diligent et à coût amoindri.

## 2.3 Définir le champ de contrainte régional actuel

Alors que les états des contraintes successifs passés vont conditionner la structure de la zone de faille, sa capacité actuelle à conduire naturellement les fluides (discontinuités en traction, maintien d'une activité tectonique défavorable au scellement des discontinuités par précipitation des minéraux...) ou à être amélioré (discontinuités qui peuvent potentiellement cisailier) dépend de l'état des contraintes actuel. De façon instinctive, l'orientation la plus favorable de la zone de faille pour faciliter les écoulements et la stimulation hydraulique est celle d'un plan de faille perpendiculaire à la contrainte principale minimale (SHmin).

Naturellement, les écoulements paraissent facilités lorsque la contrainte normale sur le plan de discontinuité est minimale. Au-delà de cette configuration-là plus évidente, il est nécessaire de prendre en compte le fait que les zones de failles sont des structures complexes et que l'organisation des discontinuités au sein de celles-ci peut être variée. Il apparaît ainsi important de prendre en compte la structure interne de la zone de faille et de considérer que les discontinuités intéressantes à stimuler forment un angle variable avec le plan de faille. Les informations relatives au champ de contrainte actuel peuvent s'appuyer sur des données bibliographiques ou sur les données de puits offsets à proximité du site identifié. Ce champ de contrainte constituera un premier socle utile pour les calculs de stabilité de puits et la définition des trajectoires de forage, et sera confirmé ou ajusté par les données de logs récupérées par l'acquisition de diagraphies dans le puits exploratoire.

### 2.3.1 Etude de la stabilité des failles

Cette étude interviendra une fois le modèle structural 3D mis à jour suite au levé de sismique pseudo 3D présenté dans la partie 2.1.

Les grandes étapes consistent à :

- Modélisation du slip tendency sur les failles dans le secteur ciblé sur la base des données régionales ou puits offset (les données acquises avec le premier puits peuvent permettre la mise à jour de l'étude avant le forage du second puits). La figure suivante présente l'exemple d'une faille analysée sur le PER de Strasbourg.
- Objectif de définir les segments de failles favorables à la circulation de fluides tout en évitant les zones de chargement critique = Estimation des deltas de pression à ne pas dépasser

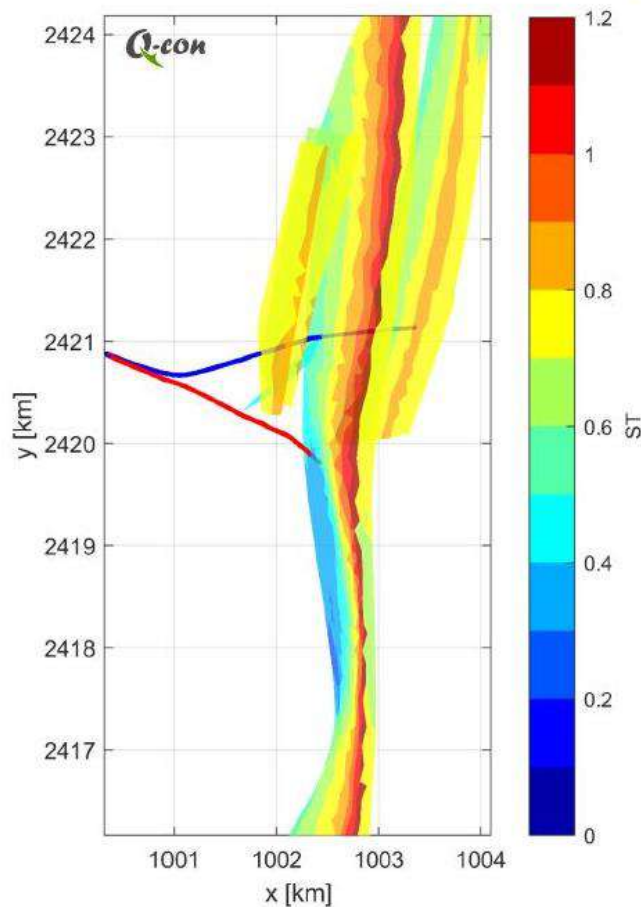


Figure 7: Exemple d'analyse du slip tendency d'une faille sur le PER de Strasbourg.

### 2.3.2 Modélisation des écoulements hydrauliques avant forage

Modélisation sur la base du modèle structural mis à jour et des données de puits offset. Analyse des surpressions réservoir engendrées par la mise en place de la boucle géothermale en comparant au deltaP identifié avec l'étude de slip tendency qui concerne l'état de stabilité relative des failles par rapport aux orientations de contraintes principales. Cette étape est réalisée sur la base de l'ensemble des données de bibliographie disponible dans la zone d'étude, incluant des études d'analogues en amont du projet :

- Indices cinématiques :

- pour caractériser le mode de formation des failles de direction similaire

- Mesure de la sous-fracturation et des remplissages :

- pour une première caractérisation de la structure interne de la zone de faille

- Etude des propriétés de porosité et perméabilité des roches susceptibles d'être rencontrées dans le réservoir. Les résultats obtenus permettront de valider ou entraîner la modification des trajectoires de forage afin d'optimiser la distance entre le puits producteur et injecteur de manière à limiter la propagation de la bulle froide tout en optimisant le lien hydraulique entre les deux ouvrages.

## 2.4 La phase de forage et tests

Les objectifs du programme prévisionnel de réalisation du forage sont les suivants :

- Acquisition de données complémentaire sur les failles et caractéristiques des zones réservoirs
- Validation de l'aptitude à la stimulation
- Réalisation de tests de production (débit, température)
- En fonction de l'architecture du puits, des contraintes opérationnelles et matérielles, les données acquises par des mesures en section openhole du puits joueront un rôle majeur dans la compréhension du réservoir et de de la stabilité de l'ouvrage.

Les différentes acquisitions utiles sont listées ci-dessous :

### Imagerie :

- pour une caractérisation de la fracturation :
  - Extension de la zone endommagée
  - Organisation : Zone endommagée/Cœur de faille
  - Orientation
  - Densité de fractures
- pour connaître la cinématique : hiérarchisation de la fracturation

### Flow log (flowmétrie) :

- Pour identifier les fractures/discontinuités (familles) conductrices et celles potentiellement stimulables (chimiquement)

### Leak-off test :

- pour connaître l'état des contraintes et identifier les fractures/discontinuités potentiellement stimulables (hydrauliquement)

### Essai de production :

- pour acquérir les caractéristiques du réservoir géothermique :
  - Lors de l'étude du rabattement
  - L'indice de productivité
  - Lors du Build up :
  - La transmissivité / perméabilité du milieu
  - Le coefficient d'emménagement
  - La part du milieu matriciel et fracturé
  - Les limites du réservoir (si atteintes lors du test avec une durée de build up suffisante)
- En surface et avec les sondes P/T en fond de puits
  - La température, la pression initiale du réservoir
  - Les caractéristiques géochimiques de l'eau géothermale (salinité, densité, viscosité, composition chimique)

Dès ce stade, les données acquises seront interprétées pour réaliser des simulations du réservoir selon les résultats des tests de Q/T (Débit / Température).

A la fin des tests et en fonction des résultats obtenus, la décision sera prise soit d'abandonner le puits, soit de le conserver avec l'objectif de le transformer ultérieurement en puits de production ou d'injection d'un futur cluster géothermique.

On notera que pendant toute la durée du forage et des tests, un traitement de surface du H2S éventuellement présent sera installé et mis en service sur le chantier.

Une acquisition VSP :

Pour préciser la morphologie du réservoir localement et recalculer les vitesses des formations géologiques utilisées pour l'interprétation sismique 2D et la localisation des événements microsismiques qui seront induits lors des phases de stimulation.

Réalisation de carottes dans le réservoir afin de caractériser :

- La perméabilité de matrice + anisotropie
- Les principaux remplissages et évaluer le potentiel d'amélioration des caractéristiques hydrauliques du réservoir géothermique par acidification
- Les caractéristiques thermiques (Conductivité, Capacité calorifique)

## 2.5 Valorisation des données issues du puits exploratoire

L'ensemble des données acquises lors du forage du puits exploratoire doivent être exploitées :

- L'analyse des déblais de forage (cuttings), sous la forme d'observations macroscopique ou microscopique, va permettre le recalage des lithologies traversées : leur épaisseur, les remplissages de discontinuités, les marqueurs de failles par rapport au modèle géologique initial. Ces modifications vont permettre d'affiner la localisation et l'épaisseur de la faille ciblée au droit du réservoir géothermique.
- Les pertes et gains mesurés en forage sont également des données précieuses, notifiant des circulations de fluides géothermaux et permettant une première hiérarchisation des potentiels drains de circulations.
- L'analyse détaillée des différentes diagraphies vont permettre :
  - De déterminer le champ de contrainte local
  - De définir les propriétés mécaniques des roches traversées (module d'young, coefficient de poisson, densité...)
  - De caractériser les zones de fracturation : orientation et densité des fractures, du remplissage ou non, de l'épaisseur
  - recalculer la stabilité des failles avec le champ de contrainte local
  - ajuster la trajectoire de forage du second puits en termes d'inclinaison et d'azimut pour limiter les problèmes de stabilité de puits
  - Création d'un DFN (réseau de fracturation) dans le modèle géologique structural et application dans le modèle de simulations d'écoulement ainsi que le modèle géomécanique

## 2.6 Description sommaire d'un programme de forage type

### 2.6.1 La préparation de l'emplacement de forage

La première phase de travaux consiste à préparer l'emplacement de la plateforme qui représente une surface d'environ 1 hectare qui seront défrichés et nivelés. La terre végétale ainsi enlevée est accumulée sur le pourtour du chantier pour sa remise en place ultérieurement, après abandon du site.

L'accès au chantier est assuré par la voirie existante. Cependant celle-ci pourra être renforcée ou réaménagée, dans le cas où la circulation due à l'activité du chantier serait trop importante. Une signalisation adaptée sera

installée sur les routes et les chemins existants pour prévenir de toutes les modifications de voirie et de circulation en prévision.

Les travaux d'aménagements du chantier de forage type sont détaillés ci-dessous. Ils nécessitent l'utilisation d'engins de chantier classiques tels que pelle mécanique, bulldozer, niveleuse... :

- Construction d'une plateforme bétonnée 100 à 500 m<sup>2</sup> selon l'importance de l'appareil. La plate-forme de forage est située au centre de l'emplacement du chantier et a pour objet de supporter l'ensemble du mât de forage, les cabanes de chantier et le parking pour les véhicules nécessaires ;
- Construction d'une cave cimentée, (plusieurs mètres cubes) localisée au centre de la plateforme, au droit de l'entrée en terre du forage ;
- Construction de plusieurs réservoirs (les bourniers), étanchés par des liners imperméables, aussi bien destinés à recevoir les fluides nécessaires aux opérations de forage (boue et eau) qu'à réaliser leur traitement ;
- Création de fossés de drainage autour de la plateforme pour recueillir et traiter les eaux pluviales qui tombent à l'intérieur de celle-ci.

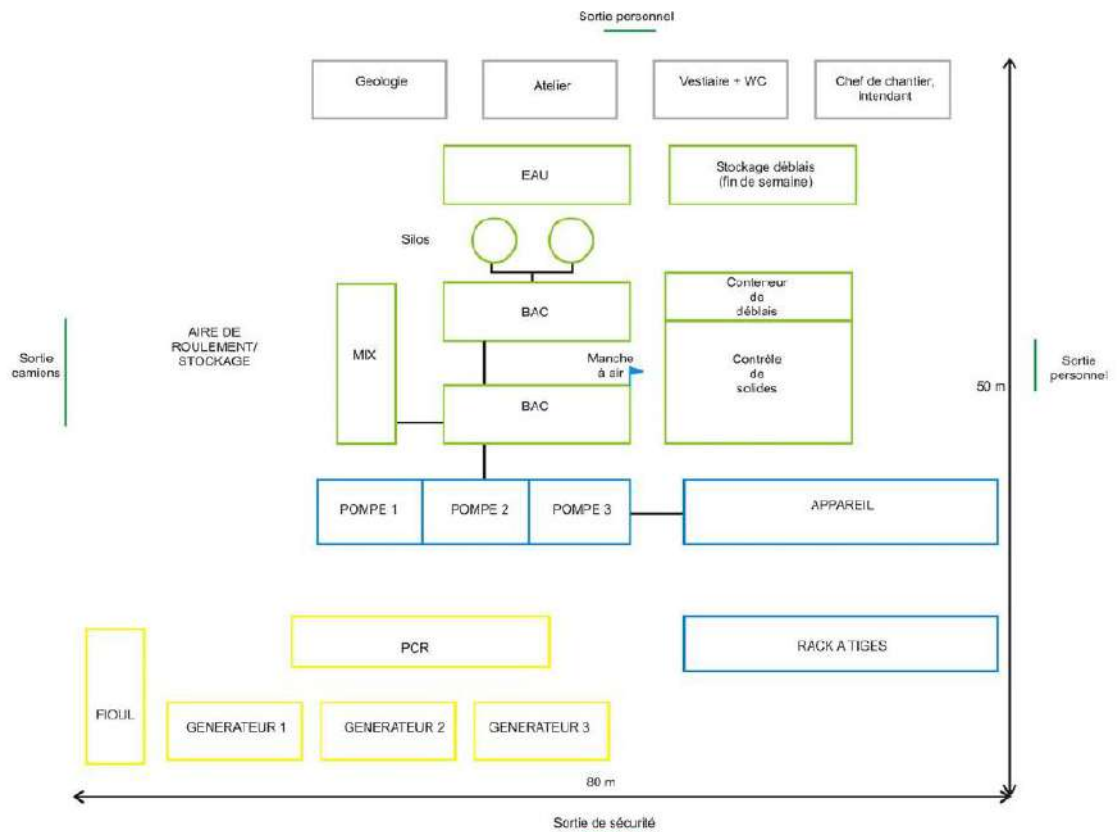


Figure 8 : Exemple d'emprise de chantier

## 2.7 La phase de forage

### Installation du forage :

Lorsque l'emplacement est aménagé, l'appareil de forage est amené par camion afin d'être monté sur la plate-forme. La période de montage (ou de démontage) dure une quinzaine de jours environ et nécessite la rotation d'une centaine de camions pendant les heures ouvrables.



Figure 9 : Exemple d'atelier de forage, ici le rig B04 450 T sur le projet de Vendenheim

### **La phase de forage :**

De façon schématique, la réalisation d'un forage profond comprend tout d'abord la foration des « mort-terrains » avant d'atteindre la cible. C'est ainsi que le forage débute par un avant trou d'une profondeur comprise entre 15 et 40 mètres (de manière générale), foré en gros diamètre puis tubé et cimenté à l'extrados. Cet avant-trou permet la descente de l'outil de forage et de sa garniture, il est réalisé généralement par un atelier de forage de taille modeste.

Les travaux de forage peuvent ensuite réellement débuter. Ils consistent à forer dans des diamètres décroissants avec pose de tubages acier cimentés jusqu'à la profondeur voulue selon un programme préétabli.

En cours de forage, il est fréquent de devoir traverser un ou plusieurs niveaux aquifères avant d'atteindre la cible déterminée par les géologues. Pour éviter la contamination de ces niveaux en cours de forage et assurer la stabilité des parois du puits, celui-ci est équipé de cuvelages en acier dont l'espace annulaire avec les parois du trou est cimenté pour garantir la stabilité et l'étanchéité de l'ouvrage, notamment au regard des aquifères. Ainsi, la cible (réservoir) est forée après qu'elle ait été isolée des terrains sus-jacents. Les cotes ainsi que les diamètres des tubages sont définies en fonction des études de détail puis ajustés selon la géologie traversée.

Il est important de préciser que pour cette phase de forage, 2<sup>gré</sup> utilise un Rig lourd, dit rig "vert", conçu en éco-conception, d'une capacité de 450 T non bruyant, présentant une prise au sol réduite, équipé des technologies spécifiques à la géothermie (large diamètre, grandes profondeurs, drains larges dépôts...).

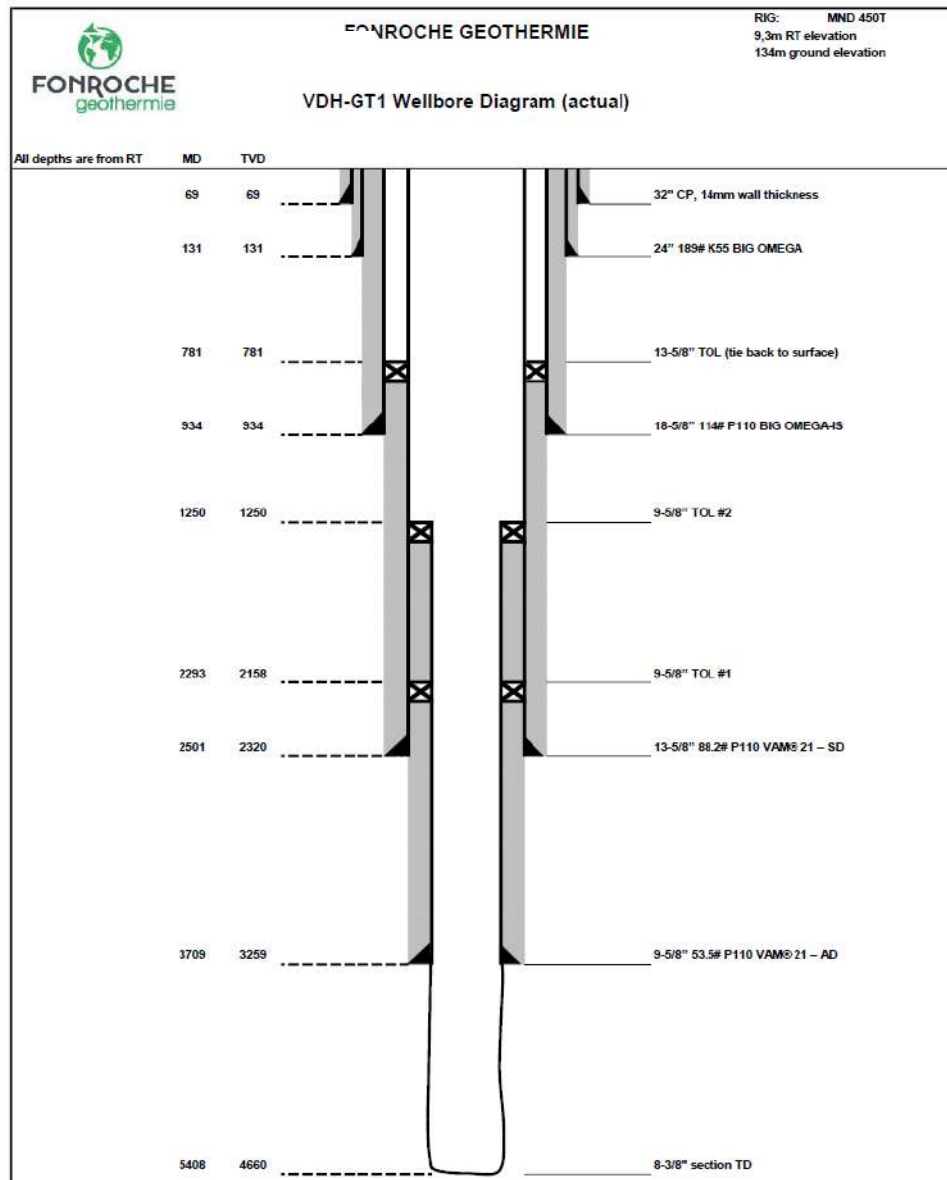


Figure 10 : Exemple type d'une conception de forage profond, ici le puits VDH1 foré par Georhin en Alsace.

En phase de forage, la manœuvre principale est la descente progressive en rotation des tiges de forage dans le puits grâce au puissant treuil ou vérins qui équipe le mât. Des pompes assurent l'injection permanente par l'intérieur des tiges du fluide de forage (généralement de la boue spécialisée) dont le rôle est de lubrifier et refroidir l'outil de forage et de remonter les déblais de forage. Cette boue est recyclée en circuit fermé grâce à un dispositif de tamisage et de décantation qui permet sa réutilisation.

La puissance nécessaire au fonctionnement des différents organes de l'atelier de forage est dispensée par le réseau électrique s'il est possible de se connecter ou par des moteurs diesels et des groupes électrogènes avant d'être distribuée sur les différents organes sous forme d'énergie électrique ou hydraulique.

En cas de présence de traces d'hydrocarbures liquides dans les eaux, ceux-ci sont récupérés et stockés dans des bacs prévus à cet effet, puis évacués vers une raffinerie. Les éventuels dégagements d'hydrocarbures gazeux sont évacués et brûlés à la torche du chantier ou dans un incinérateur mobile spécialement prévu à cet effet. Enfin, une unité de traitement du H<sub>2</sub>S éventuellement présent dans le gaz sera installée en surface sur le chantier.

### **Les équipes de travail :**

La phase de forage nécessite une surveillance de jour et de nuit. Pour cela, 2 équipes (de 12 heures chacune) se relaient 24 heures sur 24, pendant toute la durée du forage.

La durée totale de la phase de forage dépend de la profondeur à atteindre et des difficultés techniques rencontrées. Elle est prévue pour s'étaler sur environ 6 à 12 mois dans le cadre de travaux pour des puits très profond comme dans le cas présent.

### 2.7.1 Les tests du réservoir ou essais de production

Deux cas peuvent se présenter à la fin d'un forage de reconnaissance :

- Le forage est clairement négatif et ne présente pas d'indice de ressource géothermique exploitable. Dans ce cas, la remise en état des lieux commence sans qu'aucune opération d'évaluation supplémentaire ne soit menée.
- Le forage met en évidence des indices de ressources géothermiques intéressantes, nécessitant la réalisation d'opérations complémentaires pour leur évaluation. Ces opérations, appelées tests de productions, consistent à essayer d'évaluer le potentiel du réservoir en termes de quantité et de qualité en contrôlant tous les paramètres. Les tests vont consister en la réalisation des opérations suivantes :
  - Test de production naturel et selon résultat :
  - Stimulation de la fissuration naturelle par acidification et injection d'eau
  - Test de production avec build up
  - Test de réinjection dans le même réservoir pour valider la capacité à fonctionner en EGS ou test de fonctionnement en échangeur fermé selon le cas de figure

L'eau utilisée dans ce cas sera au maximum recyclée et prélevée dans un puits dédié ou dans une nappe salifère non potable. Tout au long de la phase de test, un suivi sur le taux de nucléide sera réalisé sur l'eau géothermale afin de vérifier les niveaux de remontées et d'adapter les éventuelles futures procédures d'exploitation en conséquence.

En cas d'insuffisance sur la perméabilité naturelle, il est possible de construire plusieurs drains dans la zone réservoir (par exemple avec une technologie de drain horizontaux) et une optimisation de la fissuration naturelle pour approcher le rendement de 20 Mwth minimum recherché. Dans ce cas, toute utilisation de surpression se fera en prenant en compte l'énergie sismique naturelle de la zone pour limiter la micro sismique.

### 2.7.2 Remise en état des lieux

De nouveau, deux situations sont à envisager en fonction du résultat des tests :

- En cas de succès sur un puits, celui ci pourrait alors devenir un puits de production ou d'injection du futur cluster géothermique.

En cas de résultats positifs, il sera alors procédé au dépôt d'un dossier spécifique de « Demande de permis d'exploitation » ou « Demande de concession », ainsi que d'un « Dossier d'ouverture de travaux d'exploitation ». Ces dossiers devront exposer spécifiquement toutes les mesures qui seront prises pour protéger l'environnement du site.

Dans ce cas, des essais de mise en production pourront être envisagés.

- En cas d'échec jugés définitifs par l'opérateur, le puits sera abandonné et mis en sécurité de manière à atteindre les objectifs suivants :

- Isolement des niveaux-réservoirs dans le découvert
- Isolation du découvert
- Isolement des annulaires non cimentés

La fermeture du puits sera réalisée conformément aux règles de l'Art. Le programme de fermeture détaillant toutes les dispositions envisagées de protection des aquifères et de mise en sécurité du puits, sera soumis à l'approbation de la DREAL et de la Préfecture.

La procédure d'abandon en vigueur sera respectée. Elle est détaillée dans la Note Technique DNEMT n° 11 de Novembre 1997, les principaux points étant repris ci-dessous :

- Les opérations de fermeture ne doivent pas rompre l'équilibre hydrostatique du sondage. Le fluide (boue, saumure inhibée, etc.) qui sera laissé entre les bouchons doit avoir une densité telle que le volume injecté équilibre la plus forte pression rencontrée pendant la foration de la phase considérée.
- Les bouchons peuvent être mécaniques ou hydrauliques (ciment). Le laitier de ciment généralement utilisé pour les bouchons hydrauliques pourra être remplacé par un autre liant (résine acrylique par exemple).

Quelques principes à respecter :

- Lorsque le forage est muni d'une bride pleine sur le sommet du tube de surface, celle-ci doit comporter un taraudage ½" avec vanne et manomètre afin de pouvoir connaître la pression amont à tout moment lors de l'opération d'obturation.
- Dans certains cas particuliers, les risques relatifs à la corrosion par les fluides en place ou par l'électrolyse due aux courants vagabonds peuvent réclamer des traitements anti-corrosion (inhibition) ou des procédures particulières d'abandon.
- La mise en place d'un bouchon de ciment doit se faire par injection sous pression au niveau souhaité (une cimentation gravitaire ne présente pas en général de garantie de mise en place adéquate).
- Le niveau atteint par le ciment dans les divers annulaires doit être connu avant d'établir le programme d'abandon.
- Les bouchons de ciment ont un volume minimum de 1 m<sup>3</sup>.

### 2.7.3 Sécurité

Les cibles géothermiques étant à des profondeurs importantes et traversant des horizons gaziers, des procédures de HSE de type exploration hydrocarbure seront mises en place et le personnel intervenant sera formé de manière adaptée.

## 2.8 Protection de l'Environnement

La réalisation de ce programme d'exploration se fera avec des pratiques respectueuses de l'Environnement.

Le principe des mesures qui seront prises sur les chantiers de travaux pour en limiter ou en atténuer les impacts sont détaillés plus loin dans la partie spécifique « Notice D'Impact et Incidences Eventuelles » du présent dossier.

Les principaux points relatifs à la préservation de l'Environnement sont cependant repris ci-dessous :

- Les opérations de levé vibrosismique et de forage prendront place en dehors de zones protégées des périmètres de protection rapprochés des infrastructures d'Alimentation en Eau Potable et des sites industriels existants.

- L'impact au sol final sera réduit à une surface nettement inférieure à un hectare, les installations étant contenues dans un périmètre de 4 à 6 000 m<sup>2</sup>.
- La surface de travail sur laquelle seront installés les équipements moteurs et les stockages de carburant seront étanche afin d'éviter tout risque de pollution des sols et des eaux superficielles.
- L'eau utilisée pour le forage sera traitée et recyclée dans le système de traitement des boues de l'appareil de forage. Les résidus minéraux solides seront évacués dans un centre agréé, conformément à la réglementation en vigueur.
- Le niveau de bruit sera réduit conformément à la réglementation en vigueur.
- Un stock de sécurité d'eau incendie de 40 m<sup>3</sup> sera en permanence disponible sur le site de forage, avec l'ensemble du matériel adéquat (canon à eau, lance à incendie).

Du point de vue technique, on soulignera que si des opérations d'amélioration de la fissuration sont nécessaires, toute utilisation de surpression se fera en prenant en compte l'énergie sismique naturelle de la zone pour limiter la micro sismicité. Ce risque sera d'ailleurs intégré dès la définition du programme de détail et des capteurs sismiques seront positionnés autour des puits de développements dans des piézomètres entre 10 et 100 m de profondeur. Ces capteurs permettront de suivre l'évolution d'éventuelle micro sismicité et d'adapter les techniques d'exploitation.

L'eau utilisée dans ce cas sera au maximum recyclée et prélevée dans un puits dédié ou dans une nappe salifère non potable. Enfin, un suivi sur le taux de nucléides sera réalisé sur l'eau géothermale pendant la phase de test pour vérifier les niveaux de remontées et adapter les futures procédures d'exploitation en conséquence.

On soulignera pour terminer que dans tous les cas, avant de débiter, les travaux de forage à l'intérieur du territoire du permis devront être précédés d'une « Demande d'autorisation d'ouverture de travaux miniers » prescrits par le Décret 2006-649 du 2 juin 2006 (JO du 3 juin 2006).

Une « Notice d'impact spécifique » décrivant les travaux sera adressée au Préfet et au Directeur de la DREAL [Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement]. Elle comportera également tous les autres éléments exigés dans les textes réglementaires en vigueur.