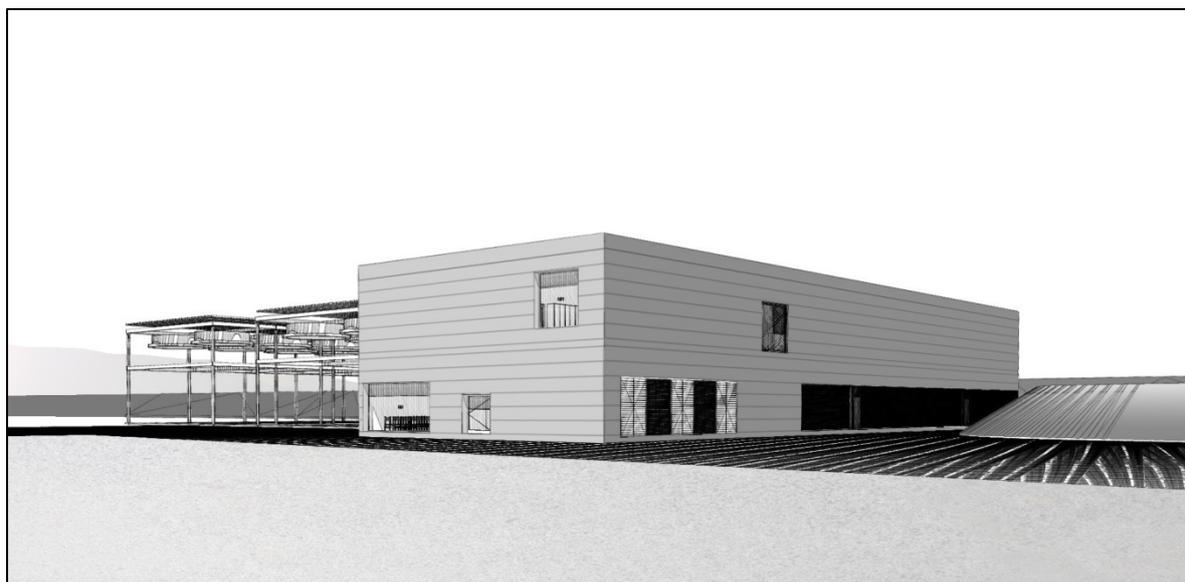


Rapport technique

Projet pilote de géothermie profonde Haute-Sorne



Vue en perspective de la future centrale géothermique de Haute-Sorne

Version 4, adaptée suite à l'examen préalable

15 octobre 2014

Adresse de la société

Geo-Energie Suisse SA, Reitergasse 11, 8004 Zurich
Centre de compétences suisse pour la géothermie profonde
www.geo-energie.ch



Dr. Peter Meier, CEO

T +41 61 500 07 21

M +41 79 248 48 65

p.meier@geo-energie.ch

Olivier Zingg, Chef de projet Suisse romande

T +41 61 500 07 22

M +41 79 321 43 20

o.zingg@geo-energie.ch

Geo-Energie Suisse SA en coopération avec

Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie (CHYN) de l'Université de Neuchâtel

Gec-co Global Engineering & Consulting - Company GmbH, Neusäß (D)

Geo Explorers LTD, Liestal

MFR Géologie-Géotechnique SA, Delémont

RWB Jura SA, Porrentruy

Table des matières

1	Introduction	5
2	Contexte géologique	6
2.1	Données géologiques de base	8
2.2	Géologie régionale de la vallée de Delémont	9
2.3	Hydrogéologie	10
2.4	Investigations géophysiques	12
2.4.1	Sismique-réflexion	12
2.4.2	Gravimétrie	14
2.5	Modèle tectonique régional du socle	17
2.5.1	Problématique des fossés permio-carbonifères	18
2.5.2	Problématique des structures tectoniques du socle	21
2.6	Construction du modèle géologique de la Haute-Sorne	24
2.7	Profil de forage prévisionnel	25
2.8	Modèle de températures	26
2.9	Champ de contraintes	28
3	Description du projet	34
3.1	Etapas de réalisation	34
3.2	Exploration préalable optionnelle : sismique réflexion et sondage d'exploration	35
3.2.1	Campagne de sismique-réflexion	35
3.2.2	Forage de reconnaissance	37
3.3	Réseau de surveillance sismique	38
3.4	1 ^{er} Forage profond	39
3.4.1	Déroulement des opérations de forage	39
3.4.2	Construction de la place de forage	40
3.4.3	Installation de forage	42
3.4.4	Forages dirigés	42
3.4.5	Outils de forage	44
3.4.6	Boues de forage	45
3.4.7	Tubage et cimentation	46
3.4.8	Complétion	47

3.5	Stimulation du réservoir	48
3.6	2 ^{ème} forage profond et tests de circulation.....	50
4	Description de la centrale géothermique	52
4.1	Procédé de production d'électricité	52
4.2	Description du projet/Données techniques.....	53
4.2.1	Production d'énergie	53
4.2.2	Protection contre le bruit.....	54
4.3	Description de l'installation	55
4.3.1	Système d'eau thermique	56
4.3.2	Processus de production de courant électrique (ORC).....	57
4.4	Liste et quantités de substances.....	59
4.5	Bruit dans les zone environnantes.....	60
4.6	Qualité de l'air dans les zones environnantes	60
4.7	Paysage naturel et bâti	61
4.8	Substances dangereuses.....	61
4.9	Déchets	61
5	Surfaces agricoles.....	63
5.1	Recherche d'un site d'implantation minimisant l'emprise sur les surfaces agricoles	63
5.2	Extension de la zone à bâtir et retours à la zone agricole	67
5.2.1	Nouvelle affectation, parcelle 2137 et 2136.....	67
5.2.2	Tableau des parcelles et des surfaces.....	68
5.2.3	Localité de Glovelier, parcelles 71, 73, 75 et 77 + parcelles 788, 2035, 2185, 2234	68
5.2.4	Localité de Glovelier, parcelle 2053.....	70
5.2.5	Compensation des surfaces d'assolement.....	71
6	Calendrier des réalisations.....	72
7	Budget	73
8	Bibliographie	74

1 Introduction

Ce rapport technique a pour objectif de présenter un aperçu complet du projet de géothermie profonde de Geo-Energie Suisse dans la commune de Haute-Sorne. Ce rapport ainsi que les plans accompagnant la demande de permis de construire servent de base à l'étude d'impact sur l'environnement.

Le chapitre 2 fournit une synthèse des études géologiques réalisées à ce jour.

Le chapitre 3 décrit le déroulement du projet et la réalisation des ouvrages souterrains (forages et stimulation du réservoir géothermique).

Le chapitre 4 livre une description technique du fonctionnement de la centrale géothermique.

Le chapitre 5 traite de la question de l'impact du projet sur les surfaces agricoles. Finalement, le calendrier et le budget prévisionnels du projet sont fournis aux **chapitres 6 et 7**.

2 Contexte géologique

La géologie du canton du Jura est caractérisée par une importante couverture sédimentaire (environ 1.5 km d'épaisseur), constituée à 95% de calcaires et de marnes, qui reposent sur un socle formé de granite et de gneiss ainsi que de dépôts sédimentaires d'âge primaire. Sous l'effet de la poussée alpine, les terrains sédimentaires ont été décollés de leur socle, puis plissés en quelques millions d'années à la fin du Tertiaire. Le socle n'affleure pas dans le périmètre du canton, mais dans les massifs des Vosges et de la Forêt Noire (voir Figure 1, ci-dessous).

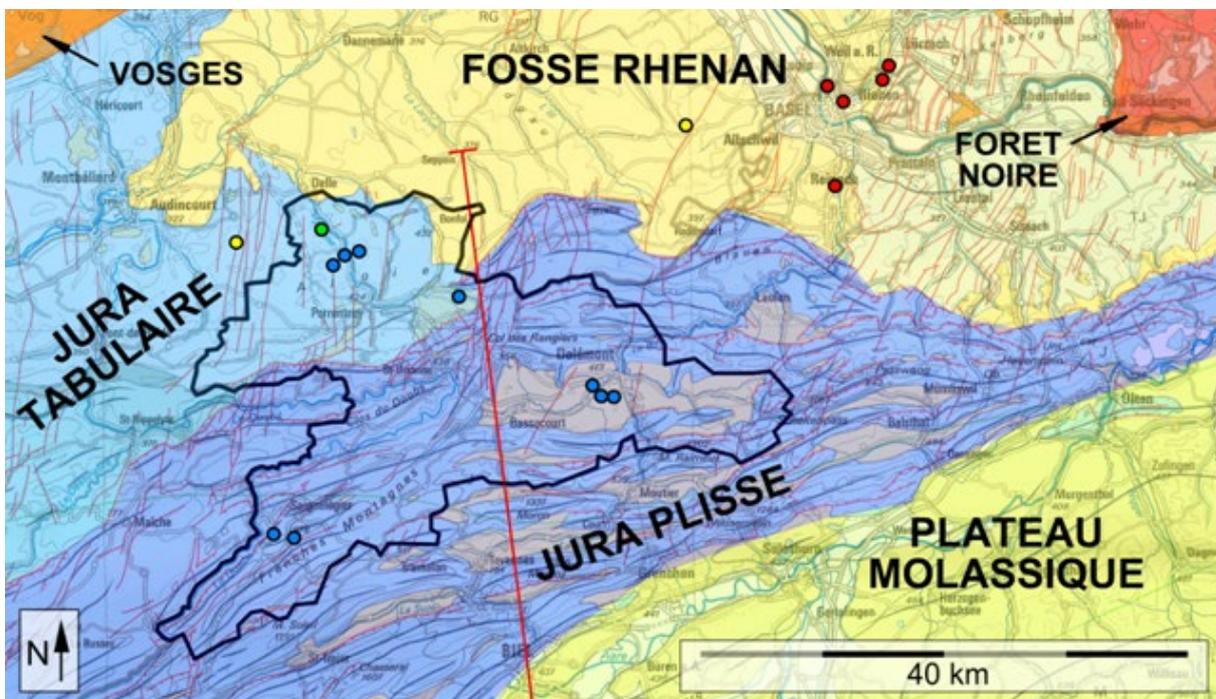


Figure 1 : Carte tectonique du canton du Jura avec les forages profonds: (vert - forage de Buix-JU ; bleu - forages locaux de profondeurs entre 400 et 635 m ; rouge - forages de Riehen, Reinach et Bâle ; jaune - forages profonds de France voisine). La trace du profil de la Figure 2 ci-dessous est indiquée en rouge.

Le territoire cantonal est situé au carrefour de différentes unités tectoniques, entre le fossé rhénan au nord et le Jura plissé au sud. On notera que la dernière chaîne du Jura plissé au Nord (anticlinal du Mont Terri) chevauche le Jura tabulaire (voir Figure 2, ci-dessous). La plaine d'Ajoie (district de Porrentruy) correspond à la terminaison orientale du Jura tabulaire, qui s'ennoie vers le nord sous les sédiments tertiaires du fossé rhénan.

La carte tectonique montre un réseau très dense de failles orientées NNE-SSW qui découpe le massif rocheux. On y voit également les multiples chevauchements en direction du NW dans le Jura plissé.

Aucun forage profond n'a atteint le socle cristallin dans le canton du Jura. A proximité de celui-ci, seuls les forages de Bâle et de Knoeringue en Alsace voisine ont atteint le socle granitique à plus de 2 km de profondeur.

La coupe géologique suivante (voir sa trace sur la Figure 1, ci-dessus) illustre de manière schématique la structure générale, les différentes unités tectoniques, ainsi que la configuration des reliefs dans le canton du Jura.

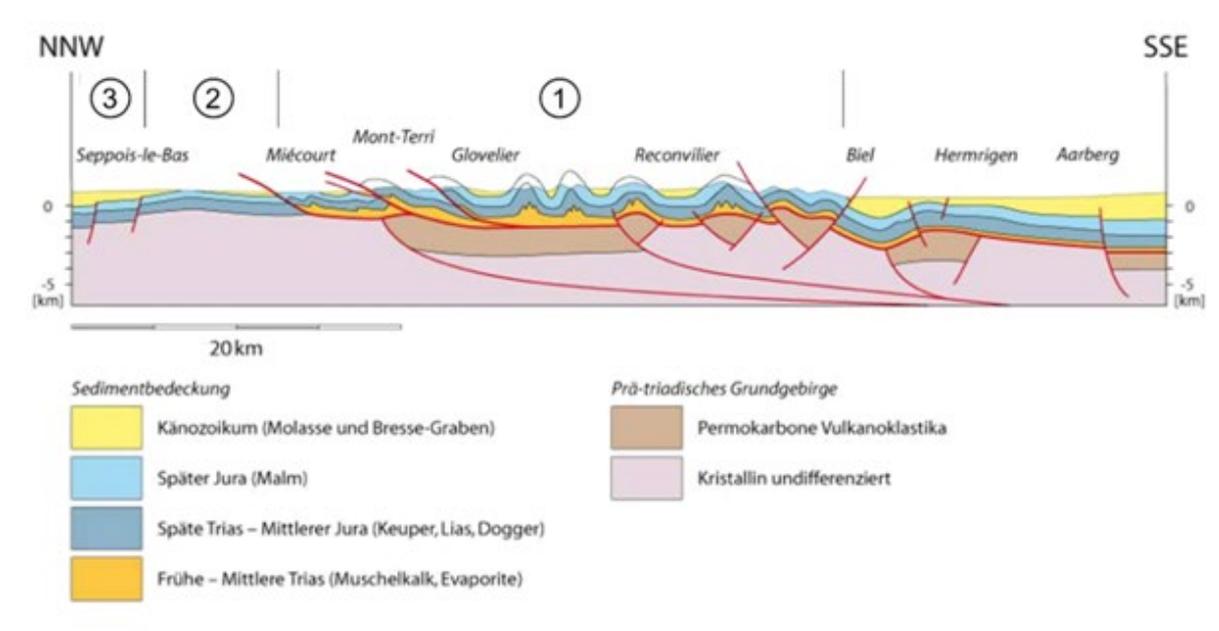


Figure 2 : Profil géologique schématique nord-sud (1 - Jura plissé, 2 - Jura tabulaire, 3 - Fossé rhénan), tiré de Pfiffner, 2009.

La chronologie des événements qui précèdent la formation du Jura peut être résumée comme suit (Bichet & Campy, 2008):

- au Permien, à la fin de l'ère primaire (-250 Ma), il ne reste pratiquement plus aucun relief de la puissante chaîne varisque (ou hercynienne). Le Jura est principalement continental et soumis à une érosion intense. Les sédiments se déposent dans des bassins correspondant à des fossés d'effondrement d'orientation NE-SW, entrecoupés par des failles normales. Cette structure dite de "Horst" (promontoire) et "Graben" (fossé) est caractéristique d'une tectonique en extension;
- au Trias, dès le début de l'ère secondaire (-250 à -199 Ma), la mer envahit progressivement le Jura. La région, qui bénéficie d'un climat chaud avec des variations saisonnières arides/humides, est formée de lagunes peu profondes alimentées par de vastes fleuves. Ces conditions permettent l'accumulation de plusieurs centaines de mètres de marnes à gypse et de sel, qui favoriseront plus tard, au Miocène supérieur, le décollement et le plissement du Jura;

- au Jurassique moyen et supérieur (-175 à -145 Ma), la région jouit d'un climat tropical et se présente sous forme d'une plateforme océanique peu profonde, parsemée d'îles et de récifs. Les variations du niveau de la mer favorisent le dépôt de boues carbonatées qui deviendront plus tard les calcaires jurassiques;
- l'émersion du Jura au début du Crétacé supérieur (-93 Ma) est liée à une inversion du mouvement des plaques tectoniques, qui voit dès lors la remontée de la plaque africaine vers la plaque européenne;
- au début de l'ère tertiaire (-65 à -1.8 Ma), les terrains émergés sont soumis à une forte érosion, avec un soulèvement général durant l'Eocène. A l'Oligocène, la couverture sédimentaire et le socle subissent une intense fracturation liée à l'ouverture du fossé rhénan. Finalement, les effets de la compression alpine provoquent le décollement, puis le plissement des terrains de couverture au Miocène supérieur et au Pliocène (-11 à -3 Ma).

2.1 Données géologiques de base

Les formations sédimentaires Cénozoïques et Mésozoïques (jusqu'au toit du Trias environ) se laissent étudier au moyen de cartes géologiques, de relevés de tunnels et de forages de profondeur moyenne tels les forages de Delémont destinés au captage d'eau souterraines (Figure 3).

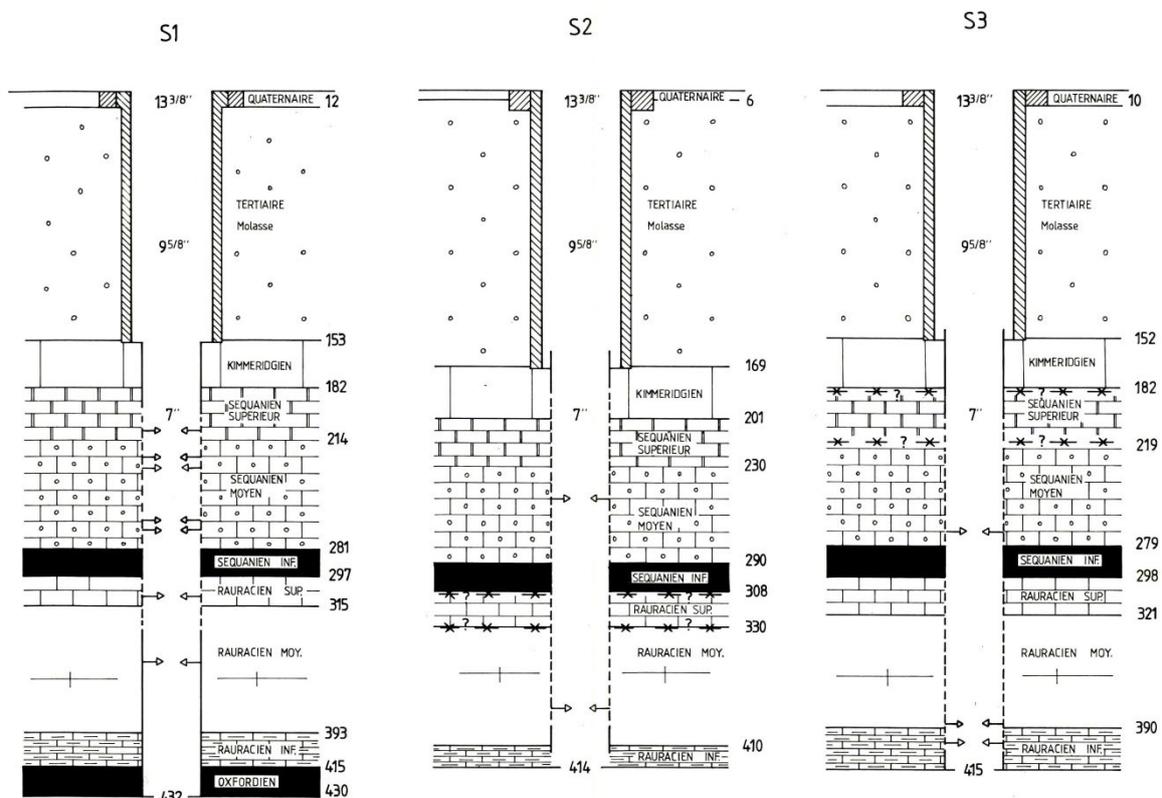


Figure 3 : Données géologiques des forages de Delémont (MFR, 1991).

La reconstruction des formations plus profondes et du socle en particulier est plus spéculative. Un seul forage profond dans la région a atteint la base du Mésozoïque en Ajoie (Buix, voir Figure 1 et Figure 4). Des données géophysiques (sismique, gravimétrie) permettent d'étudier plus avant ces formations profondes. Elles sont décrites au chapitre 2.4.

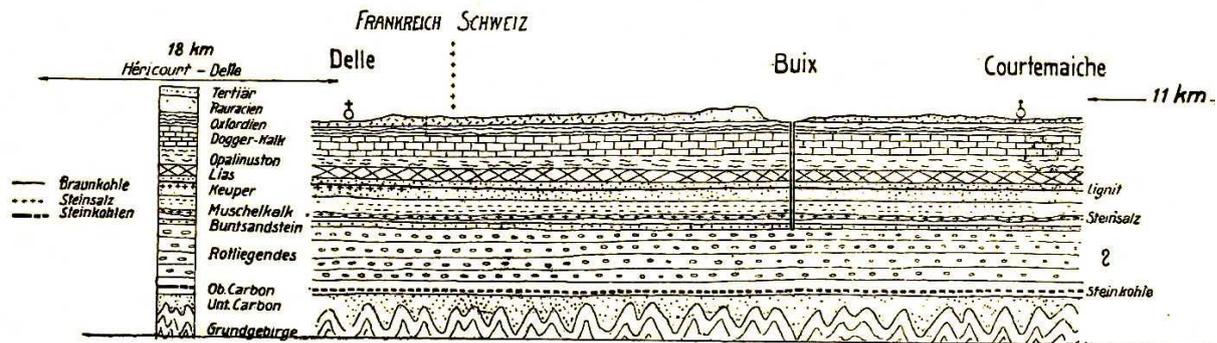


Figure 4 : Profil géologique sur le forage de Buix (Schmidt & al., 1924).

2.2 Géologie régionale de la vallée de Delémont

Le bassin de Delémont s'étend dans un vaste synclinal d'orientation est-ouest, de 22 km de long pour 4 à 5 km de large. Son altitude moyenne est de 420 m. Bordé au nord par l'anticlinal du Vorbourg et au sud par celui de Vellerat-Tiergarten, il est délimité à l'ouest par l'anticlinal de la Caquerelle et par celui de Trogberg-Rotmatt à l'est.

La stratigraphie du bassin est composée d'une épaisse couche tertiaire (Miocène, Oligocène et Eocène), qui atteint localement plus de 300 m d'épaisseur (Liniger, 1925). Les formations tertiaires reposent sur les calcaires du Malm et du Dogger qui affleurent sur les sommets environnants, culminant entre 850 et plus de 1'000 m d'altitude.

Une série de failles transversales, de direction NNE-SSE, affectent le substratum du bassin de Delémont. Il s'agit de failles normales liées à la formation du fossé rhénan à l'Oligocène. Certaines d'entre elles ont vraisemblablement été réactivées en décrochements sénestres lors du plissement du Jura au Miocène supérieur.

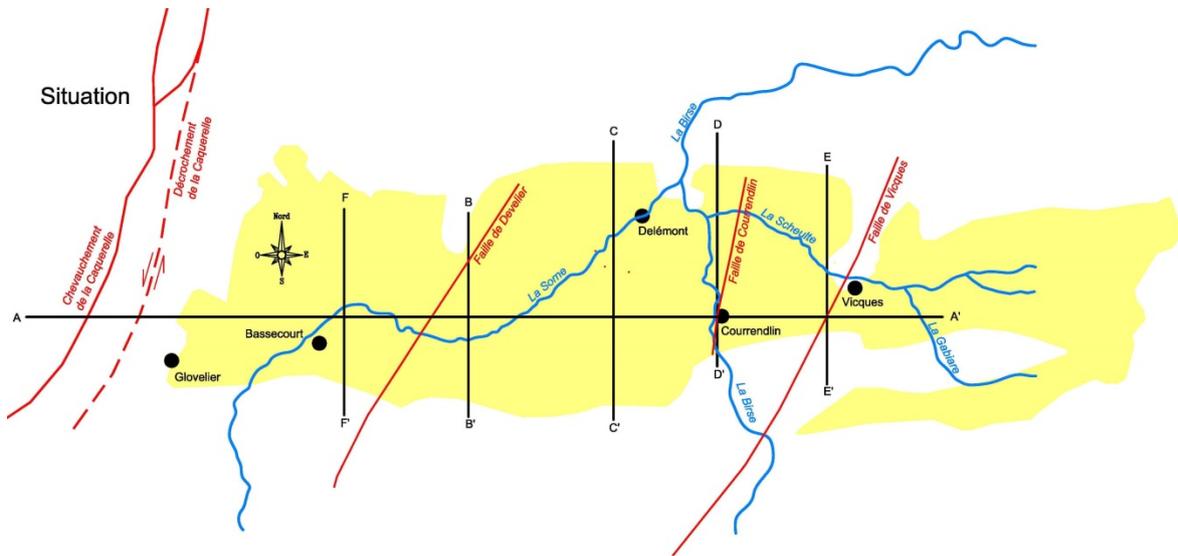


Figure 5 : Bassin de Delémont avec son remplissage tertiaire (en jaune) et les accidents géologiques majeurs (failles transversales).

2.3 Hydrogéologie

L'important remplissage tertiaire du bassin de Delémont est principalement aquiclude. On tiendra toutefois compte des sables et graviers du Bois de Robe, qui sont probablement aquifères (Hessenauer et al., 2010). La molasse tertiaire est souvent recouverte par des alluvions d'âge quaternaire, qui atteignent jusqu'à environ 10 m d'épaisseur (MFR, 2010). Cet aquifère superficiel est exploité par de nombreux captages publics, comme illustré dans la Figure 4, ci-dessous.

Commune de Courtételle
Zones de protection
Captage des Petites-Aingles
Coupe géologique de l'aquifère 1:500/100

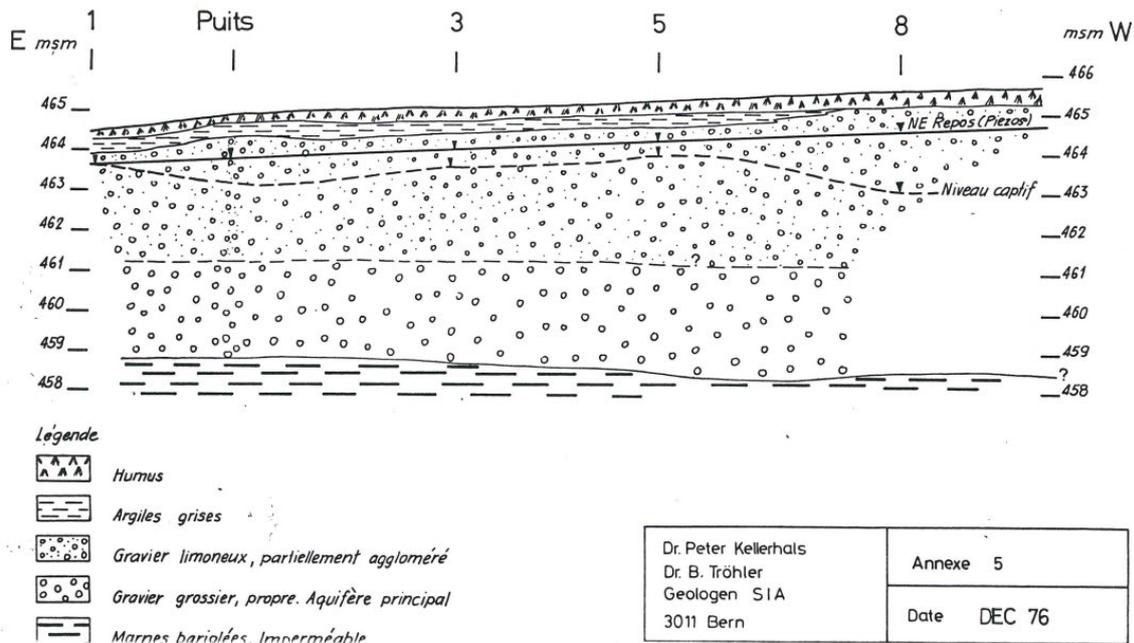


Figure 6 : Alluvions quaternaires au puits des Petites-Aingles à Courfaivre, profil Est-Ouest (les "marnes bariolées imperméables" correspondent à la molasse marneuse - Kellerhals et al. 1976).

A ce stade préliminaire, on admettra que les formations sont subhorizontales et d'épaisseurs quasi-constantes sur le secteur considéré (région de Bassecourt). Les niveaux aquifères des différentes formations sédimentaires, du Trias au Quaternaire, sont présentés au Tableau 1, ci-dessous. Les aquifères ont été distingués en fonction des utilisations d'intérêt public:

- ressource en eau potable: aquifère alluvial de surface déjà exploité (exemple du puits des Petites-Aingles à Courfaivre) et aquifère captif des calcaires du Malm (exemple des 3 forages de la ville de Delémont, Flury et al., 1991);
- ressource hydrogéothermale: en raison des fortes teneurs en sels dissous, à conserver pour une utilisation géothermale avec exploitation par doublets.

NATURE ET PROFONDEUR PRÉVISIONNELLE	CAPTAGES EXISTANTS	COMMENTAIRES / INTÉRÊT PUBLIC
Aquifère alluvial (graviers) de surface avec nappe libre, localement captive 0 - 10 m	Puits des Petites-Aingles	Zone et périmètres de protection Ressource en eau potable

Aquifère calcaire du Malm 115 - 390 m	A Haute-Sorne, aucun forage d'eau au centre du synclinal à travers la molasse; sources karstiques sur les bords du synclinal	Données selon les 3 forages existants qui alimentent la Ville de Delémont (Flury et al., 1991) Ressource en eau potable et géothermie basse température
Aquifère calcaire du Dogger (Grande Oolithe) 485 - 700 m	Aucun forage d'eau ou autre	Probablement forte teneur en sels dissous (8.6 g/l à Courtemaîche, Boem et al., 2006) Géothermie (doublet)
Aquifère calcaire du Muschelkalk sup. 1075 - 1150 m	Aucun forage d'eau ou autre	À part au tunnel A16 du Mt Terri, formation pas affleurante dans le canton. Probablement très forte teneur en sels dissous : 17.2 et 14.4 g/l à Riehen et 43 g/l à Reinach (Hauber, 1991 et 1993) Géothermie (doublet)
Aquifère du Buntsandstein 1350 m à \geq 1500 m	Aucun forage d'eau ou autre	Aquifère peu connu ! Probablement très forte teneur en sels dissous Géothermie (doublet)

Tableau 1: Formations aquifères attendues jusqu'au toit du socle (région de Bassecourt).

2.4 Investigations géophysiques

En l'absence de forages profonds dans la région étudiée, les structures géologiques du bassin de Delémont peuvent être révélées par des méthodes géophysiques. La sismique-réflexion, en particulier, permet d'établir une « image » de la structure du sous-sol jusqu'à plusieurs milliers de mètres de profondeur. La gravimétrie permet quant à elle, en étudiant les subtiles variations de la gravité de faire des hypothèses sur les variations géologiques qui en sont à l'origine. Dans le cadre de cette étude, une réinterprétation des données existantes a été effectuée pour tenter de dériver un modèle géologique régional du socle pré-triasique. Les principaux objectifs de ces études sont :

1. L'établissement d'un profil prévisionnel de forage
2. La caractérisation de la nature géologique du socle pré-triasique (sédimentaire ou cristalline)
3. La caractérisation des principales structures tectoniques (zones de faille) pouvant affecter le socle.

2.4.1 Sismique-réflexion

La réinterprétation des données de sismique-réflexion est décrite dans Geo Explorers, 2013. Le présent chapitre en présente une synthèse. Plusieurs campagnes sismiques ont été conduites dans le Jura entre 1973 et 1980 par le consortium Shell – Jura Bernois Pétrole SA à des fins de prospection pétrolière. Les droits d'utilisation de ces données ont été acquis dans le cadre de cette étude auprès de la société SEAG (Aktiengesellschaft für schweizerisches Erdöl), actuelle dépositaire de ces données. Les profils sismiques n'étant disponibles que sous la forme des tirages originaux sur papier,

ces derniers ont été numérisés puis vectorisés par une société spécialisée afin de pouvoir être retravaillés sur des stations d'interprétations numériques modernes.

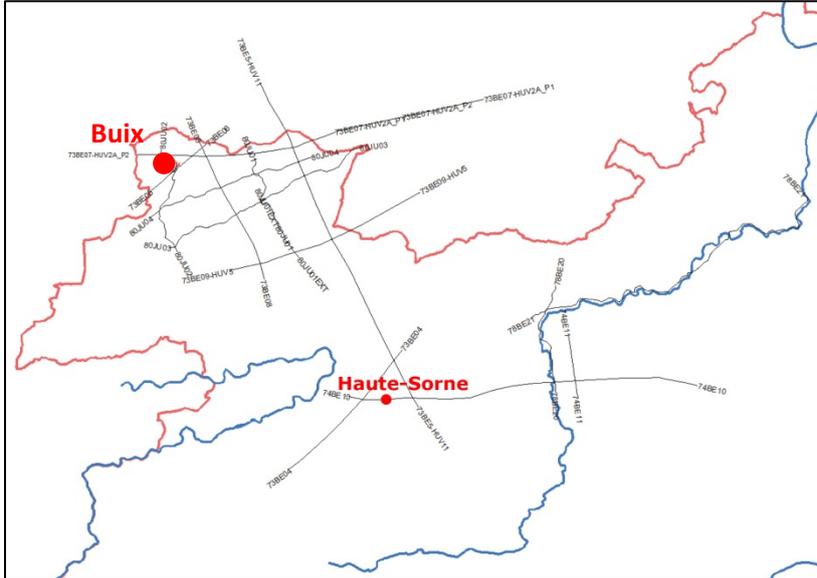


Figure 7 : Profils sismiques interprétés dans le cadre de la présente étude et forage profond le plus proche (Buix)

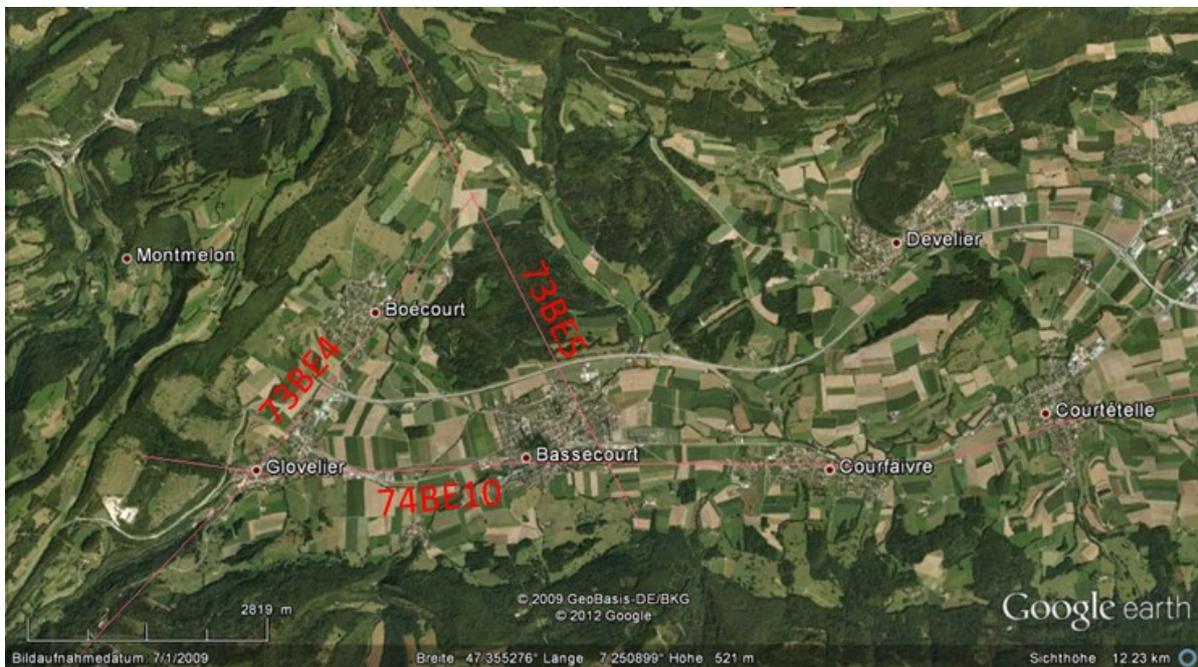


Figure 8 : Profils de sismique-réflexion en Haute-Sorne

Trois lignes sismiques traversent la Haute-Sorne. Il s'agit des profils 73BE4, 73BE5 et 74BE10, tous acquis entre 1973 et 1974 (Figure 8). Ces données sont anciennes et de qualité faible à moyenne. L'interprétation des lignes sismiques a pu être calibrée grâce au forage de Buix en Ajoie ayant atteint le toit du Permien. Une corrélation des marqueurs sismiques a pu être établie avec un bon degré de confiance jusque dans la vallée de Delémont, bien que les lignes sismiques se révèlent de qualité très pauvre sous les plissements séparant l'Ajoie de la Haute-Sorne. Les profils sismiques permettent par contre une interprétation satisfaisante de la structure du bassin de Delémont jusqu'à la base des formations sédimentaires du Mésozoïque. Le pendage des couches et les failles majeures sont clairement identifiables. La faille de Develier et celle de Vicques peuvent ainsi être clairement identifiés sur le profil 74BE10. La structure de la Caquerelle n'est par contre pas identifiable sur la base de ce profil ne se prolongeant pas assez loin à l'ouest pour recouper le plan de chevauchement.

Les données sismiques ne livrent que peu d'informations sur le socle pré-triasique. Les capacités techniques limitées de l'époque associées à de forts multiples (réverbérations internes se superposant aux réflexions primaires) rendent l'interprétation au-delà de la base du Mésozoïque difficile, même dans les zones moins tectonisées (Ajoie, vallée de Delémont). Des indications cohérentes laissent supposer la présence d'un bassin permo-carbonifère sous l'Ajoie. Un tel bassin a par ailleurs été postulé par de nombreux auteurs (voir notamment Ustaszewski, 2004). Aucun indice sismique ne laisse par contre supposer la présence de séries sédimentaires pré-triasiques (Permo-carbonifère) sous la Haute-Sorne.

2.4.2 Gravimétrie

Une réinterprétation qualitative des données gravimétriques provenant de la Commission Suisse de Géophysique a été menée par le Laboratoire de Géothermie du Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie (CHYN) de l'Université de Neuchâtel (Abdelfettah, 2013). Cette réinterprétation est faite avec l'objectif d'évaluer la probabilité de présence de fossés permo-carbonifères sous la Haute-Sorne. A partir de l'anomalie de Bouguer complète et autour du site d'étude, l'approche consiste à utiliser différents filtres avec plusieurs longueurs d'ondes, pour pouvoir évaluer la probabilité ou non que de telles structures soient présentes dans le socle cristallin.

Sur la base des données existantes de l'Atlas gravimétrique Suisse (Olivier et al., 2010), une carte de l'anomalie de Bouguer est réalisée. Comme on peut le constater sur la Figure 9, l'anomalie de Bouguer est dominée par l'effet gravifique régional de direction NW-SE qui est causé principalement par l'épaississement de la molasse vers le sud-est. Afin de pouvoir interpréter cette carte, il est indispensable de supprimer cet effet régional « masquant » les effets locaux. Pour ce faire, un filtre Butterworth (Butterworth, 1930) est appliqué sur ces données pour obtenir des anomalies « résiduelles ». Ces dernières traduisent les effets gravimétriques locaux après avoir « retiré » les effets gravimétriques régionaux, qui peuvent provenir des structures profondes voir très profondes (par ex. le Moho, les Alpes, etc.). Une étude de sensibilité détaillée du filtre Butterworth utilisé dans cette étude, est documentée dans Abdelfettah & Schill (2013). L'application du filtre Butterworth sur l'anomalie de Bouguer permet d'obtenir plusieurs anomalies résiduelles, qui peuvent être interprétées comme une pseudo-tomographie.

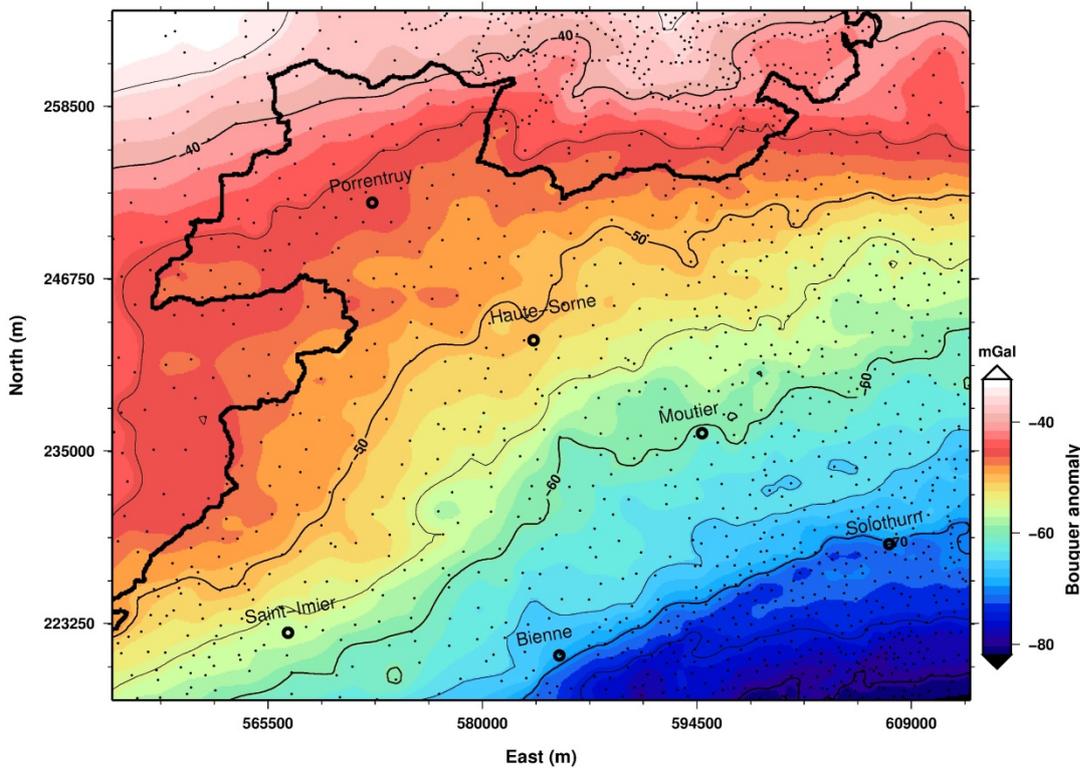


Figure 9 : Anomalie de Bouguer de la zone autour du site de Haute-Sorne. Les données gravimétriques sont fournies par la Commission Suisse de Géophysique

Méthodologie

Différents filtres passe-bandes ont été sélectionnés pour dériver une anomalie résiduelle correspondant à des variations de densité au niveau du socle et permettant ainsi de mettre en évidence la présence possible de fossés permo-carbonifères en s'affranchissant autant des variations de grande échelle au niveau de la croûte terrestre que des variations de plus petite échelle liées par exemple à des remplissages de vallées quaternaires.

Quatre filtres sont regroupés sur la Figure 10 pour mieux les visualiser mais également pour montrer la continuité en profondeur des différentes anomalies. Les cercles roses montrent les anomalies de densité peu profondes et peu épaisses mais susceptibles d'être dans la base du Mésozoïque ou dans la partie supérieure du socle cristallin. A noter que nous avons illustré deux exemples de ce type d'anomalie et que d'autres anomalies peuvent être facilement identifiées. Les cercles jaunes montrent les anomalies moyennement profondes (probablement à la limite inférieure du Mésozoïque et du socle cristallin) et/ou pas trop épaisses. Les cercles blancs continus montrent les anomalies profondes et épaisses se trouvant sûrement dans le socle cristallin, et les cercles blancs discontinus quant à eux montrent les anomalies positives très épaisses, qui traduisent du socle cristallin sain.

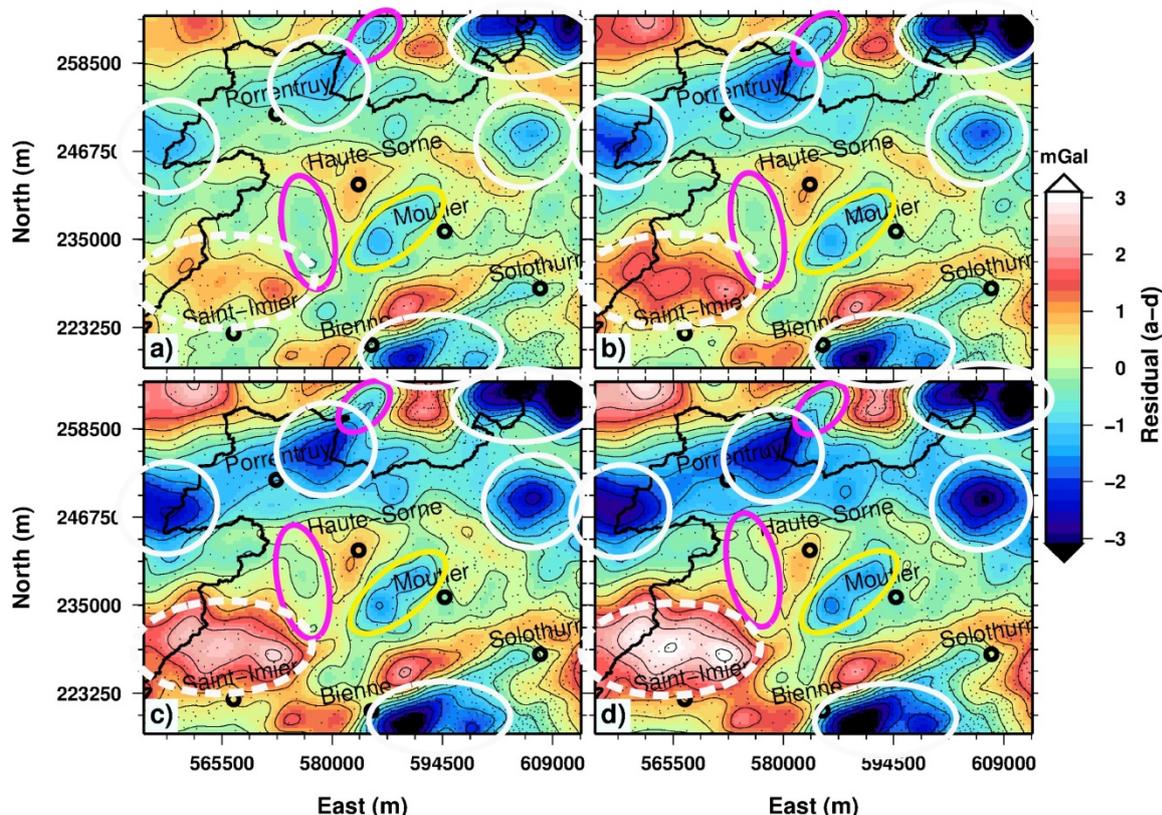


Figure 10 : Anomalies résiduelles obtenues par un filtre passe-bande de longueur d'ondes de 10-30 (a), 10-40 (b), 10-50 (c) et 10-60 km (d). Voici quelques exemples d'anomalies profondes, épaisses et peu épaisses ; les cercles roses montrent les anomalies de densité peu profondes et peu épaisses ; les cercles jaunes montrent les anomalies moyennement profondes et pas trop épaisses ; les cercles blancs continus montrent les anomalies profondes et épaisses, et les cercles blancs discontinus quant à eux montrent les anomalies positives très épaisses.

Cette interprétation est confirmée par l'emploi de filtres dont la limite inférieure est fixée à 20 km, permettant ainsi de s'affranchir des anomalies résiduelles provoquées par des variations de densité dans la couverture mésozoïque. Pour accentuer ou faire mieux apparaître les anomalies dans la zone d'étude, et dans le but de bien comprendre leurs origines, une étude d'interprétation de coupes en deux-dimensions (2D) a également été réalisée. Qui plus est, un modèle local plus détaillé autour du site de Haute-Sorne a été réalisé pour vérifier les tendances révélées par l'étude régionale.

Résultats

L'étude régionale a concerné une région de 58 x 47 km et elle a permis de mettre en évidence les hétérogénéités de densité dans le socle cristallin provenant vraisemblablement de fossés permocarbonifères. On peut notamment identifier les hétérogénéités situées au nord de la zone d'étude avec un prolongement environ E-W, celle localisée au NW de Moutier, et celle se trouvant au SE de Bienna (Figure 10). Ces hétérogénéités de densité apparaissent avec différentes épaisseurs se traduisant par une différence dans l'amplitude des anomalies résiduelles de chacune. Elles sont fort probablement causées par la présence de fossés permocarbonifères. L'étude locale indique

également qu'au niveau du socle sous le site de Haute-Sorne, il n'y a pas d'hétérogénéités de densité visible en surface, ou plutôt il n'y a pas une diminution de la densité au niveau du socle. Toutes les coupes 2D extraites des observations 3D, montrent clairement qu'au niveau du site d'étude, la tendance est à l'augmentation de l'amplitude en profondeur et non l'inverse. Cette augmentation peut s'expliquer essentiellement par deux scénarios : 1) la densité augmente (ou au moins ne diminue pas) avec la profondeur, et 2) une légère remontée de roches plus denses, comme par exemple le socle cristallin. En d'autres mots, ce deuxième point veut simplement dire que la surface du socle cristallin dans cette zone présente une topographie positive.

Par le biais de cette étude « qualitative », il est ainsi possible de conclure que sous le site de Haute-Sorne on s'attend plutôt à rencontrer un socle cristallin sans la présence d'un fossé permo-carbonifère. La Figure 11 résume l'interprétation locale concernant la présence de fossés permo-carbonifères.

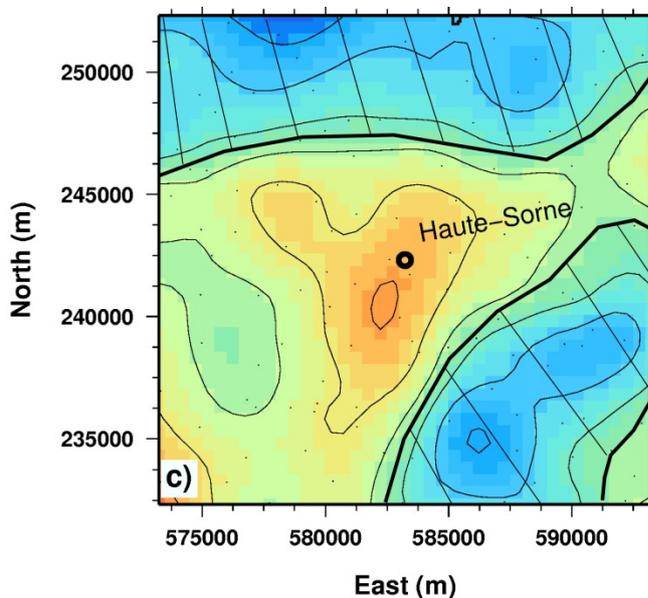


Figure 11 Zones (hachurées) susceptibles de correspondre à des fossés permo-carbonifères autour du site de Haute-Sorne, d'après l'interprétation qualitative des résultats gravimétriques. L'anomalie résiduelle obtenue par un filtre d'une bande passante de 10-50 km est superposée.

Les conclusions de cette étude ont été compilées avec celles de la réinterprétation des données sismiques pour établir un modèle géologique régional du socle (chapitre suivant).

2.5 Modèle tectonique régional du socle

Les données géologiques publiées ainsi que les études géophysiques mentionnées au chapitre précédent ont été compilées pour dériver un modèle tectonique régional du socle. Le présent chapitre synthétise l'étude de Geo Explorers (2013). Les principaux objectifs de ce modèle consistent à fournir un pronostic des lithologies à la profondeur-cible (cristallin ou sédimentaire) et à fournir un

ou plusieurs modèles structuraux comme base pour l'étude de risque sismique. Il est toutefois important de rappeler ici que le concept de gestion du risque a été établi de manière à prendre également en compte la présence de failles non-identifiées dans le voisinage immédiat du réservoir (voir chapitre « risque sismique » de l'étude d'impact).

Les principales interrogations concernant le socle pré-triasique sont :

- Présence de fossés permo-carbonifères
- Présence de failles importantes ou régionales

2.5.1 Problématique des fossés permo-carbonifères

La présence de fossés sédimentaires pré-triasiques sous le bassin molassique et le Jura est attestée par certains forages profonds (Weiach, Basel, Treyconvagnes, Entlebuch, Noville, etc.). Ces fossés se sont formés durant une phase extensive ayant prévalu au Carbonifère et au Permien. Si l'existence de ces fossés est connue, leur répartition géographique est par contre à l'heure actuelle fort incertaine. En effet, le nombre de forages les ayant pénétrés est très faible (une dizaine en Suisse) et leur identification sur les profils de sismique-réflexion est délicate. Dans la présente étude, il a été procédé de la manière suivante pour établir une carte de la répartition possible des dépôts permo-carbonifères dans la région d'étude :

- Tous les indices de présence de tels dépôts ont été systématiquement relevés sur les profils sismiques d'Ajoie et de la vallée de Delémont. Les critères d'identification utilisés sont notamment décrit dans Marchant, 2005 (Figure 12).
- Ces indices ont été superposés aux cartes de l'anomalie gravimétrique résiduelle (voir chapitre 2.4.2). L'extraction de résiduelles au moyen de filtres Butterworth passe-bande est en effet un moyen pour mettre en évidence des variations latérales de densité dans le socle telles que des fossés sédimentaires profonds pourraient en engendrer (Figure 12).
- Des données géologiques complémentaires ont été considérées.
- Finalement les études publiées sur cette question ont été considérées.

La concordance des interprétations géophysiques a permis de dériver une carte de la répartition potentielle des fossés permo-carbonifères (Figure 12 et Figure 14) : un fossé principal d'orientation est-ouest se situe sous l'Ajoie. Ce fossé a déjà été postulé par des auteurs précédents (voir notamment Ustaszewski, 2004). L'interprétation des données sismiques et gravimétriques laisse toutefois une grande latitude quant à la position de la bordure sud du fossé. Le fait que des reconstructions géomécaniques récentes impliquent la présence d'une faille préexistante dans le socle pour expliquer la nucléation de l'anticlinal du Mont Terri (Nussbaum, communication personnelle) nous amène à placer la bordure sud de ce fossé permo-carbonifère sous cet anticlinal.

La bordure sud postulée par Ustaszewski, située plus au sud que celle interprétée dans cette étude, a également été représentée sur les cartes et considérée comme variante possible dans l'étude de risque.

Une seconde anomalie de moindre amplitude sous la partie orientale de la vallée de Delémont pourrait également correspondre à un bassin permo-carbonifère. Nous avons fait coïncider sa limite ouest avec la faille de Develier, probablement d'origine rhénane (Oligocène) qui aurait pu se développer à cet endroit à la faveur d'une discontinuité préexistante d'âge Carbonifère.

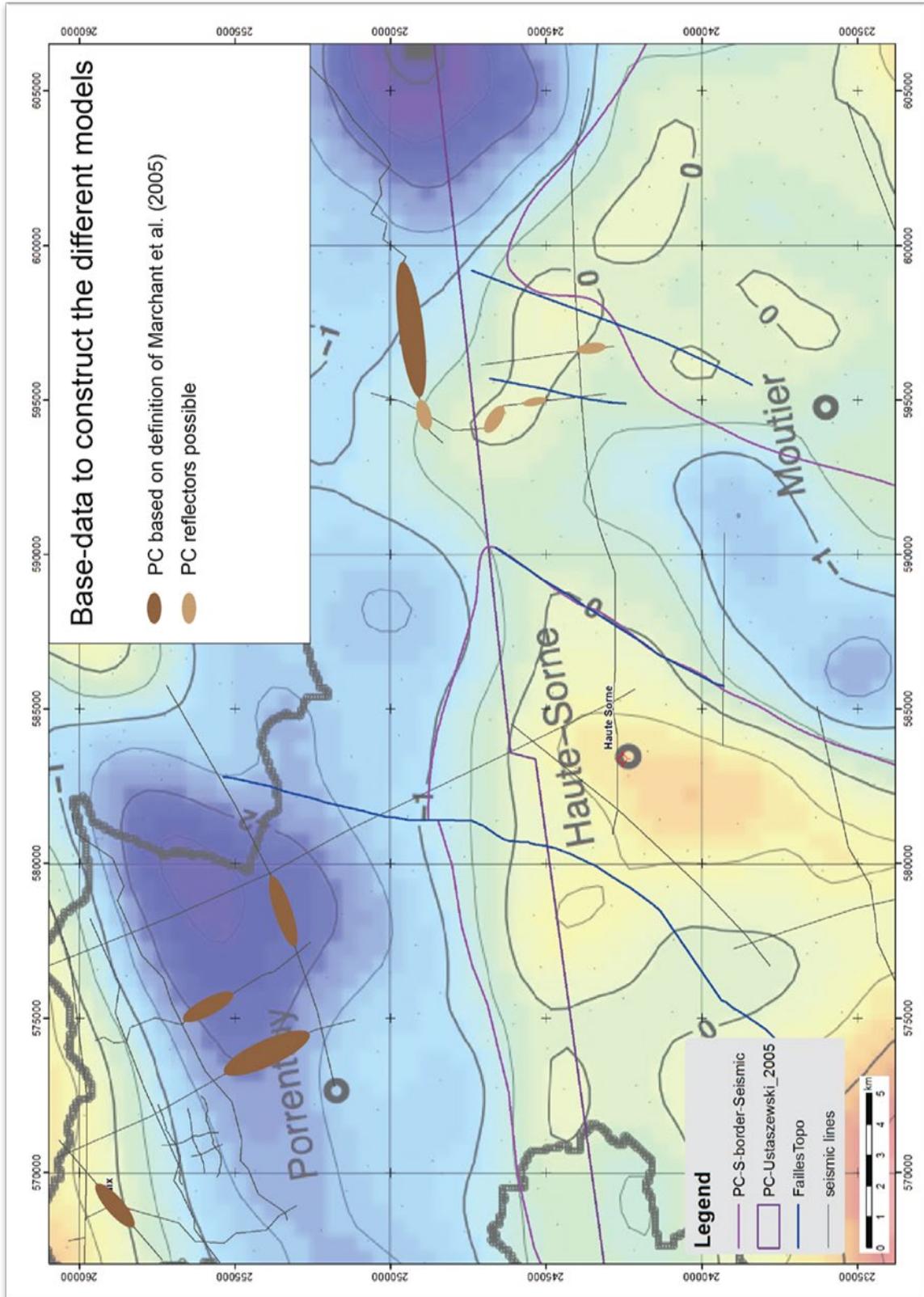


Figure 12 : L'image de fond représente la carte de l'anomalie résiduelle de Abdelfettah (2013), filtre passe-bande 10-50 km. Les anomalies négatives (en bleu) peuvent correspondre à des fossés sédimentaires dans le socle. Les portions de profils sismiques montrant des indices de présence de sédiments permo-carbonifères sont indiquées en brun.

2.5.2 Problématique des structures tectoniques du socle

Si les profils sismiques permettent une interprétation des failles dans les séries sédimentaires jusqu'à la base du Mésozoïque, elles ne livrent pas d'informations concluantes sur le socle. La sismique-réflexion ne peut en effet « imager » une faille raide qu'indirectement grâce au décalage des réflecteurs des formations géologiques stratifiées. L'absence de stratification, comme dans le socle cristallin, implique une impossibilité de mettre des failles en évidence. La gravimétrie ne permet pas non plus d'identifier des failles, à moins que celles-ci servent de bordure latérale à des unités géologiques présentant un contraste de densité, dans lequel cas la présence de failles peut être postulée (voir chapitre précédent sur la question des fossés permo-carbonifères). Nous en sommes donc réduit à des hypothèses s'appuyant les modèles géodynamiques de formation du Jura pour établir un modèle structural du socle.

Pour « capturer » l'incertitude inhérente à cette problématique, deux modèles de socle ont été développés (Figure 14).

1. Le premier suppose que les failles identifiables dans la couverture sédimentaire n'affectent que cette dernière. Elle suppose une tectonique de type « thin skin » durant la phase de plissement principale du Jura, à savoir un décollement de la couverture sur le niveau évaporitique du Trias par rapport au socle sous-jacent. Les principales failles visibles à l'affleurement ou sur les profils sismiques (Caquerelle, Develier, Viques) sont interprétées comme des « tear-faults » contemporaines du plissement de la chaîne ou alternativement comme des failles rhénanes découplées de leur racine dans le socle et transportées avec la couverture. Un tel modèle implique l'impossibilité de prédire la présence de failles dans le socle, si ce n'est celles associées aux fossés permo-carbonifères.
2. Le second modèle s'appuie aussi sur une tectonique « thin skin » durant la phase de plissement principale du Jura mais avec une influence marquée du socle. Les failles d'orientation NE-SW sont interprétées comme des failles rhénanes qui sont réactivées en transpression durant le plissement et servent potentiellement, tout comme les bordures de fossés permo-carbonifères, à la nucléation des anticlinaux. C'est le cas de l'anticlinal de la Caquerelle qui se développe sur un décrochement d'orientation rhénane. La faille de Viques montre elle aussi de clairs signes de compression. Dans ce modèle, les failles interprétées dans les sédiments (Viques, Develier) ou supposées (décrochement de la Caquerelle) sont prolongées dans le socle cristallin. Les bordures de fossés permo-carbonifères sont laissées identiques au premier modèle.

Aucun modèle purement « thick skin » (absence de décollement dans le Trias) n'a été retenu pour la phase de plissement principale du Jura. Ce modèle n'est plus défendu que par une minorité de chercheurs. Qui plus est, des reconstructions géomécaniques actuellement en cours en collaboration avec le Laboratoire de roches du Mont Terri ont montré que seule une tectonique « Thin skin » permet de reproduire le plissement du Jura au Miocène.

Ces modèles ne disent rien de la tectonique actuelle. Des indices parlent aussi bien en faveur d'une continuation de la tectonique de décollement « thin skin » que de son arrêt et son remplacement il y

a quelques millions d'années par une tectonique de socle « thick skin ». Une telle vision (Madritsch (2209), Ustasewski (2204), Schmidt (2009)) impliquerait la réactivation en compression des bordures des fossés permo-carbonifères et le possible développement dans le socle de nouveaux chevauchements. Cette théorie ne permet toutefois pas d'établir de modèle de faille déterministe sur la base des données à disposition. Elle implique toutefois la présence potentielle de failles (chevauchements) dans le socle à proximité du réservoir et est donc traitée directement dans l'étude de risque comme toute autre faille non-identifiée.

Les deux modèles de failles résultant de cette étude ainsi que les différentes interprétations des fossés permo-carbonifères (chapitre précédent) ont été modélisés en 3 dimensions et ont servi de base aux calculs de l'étude de risque sismique (voir Rapport d'Impact sur l'Environnement et Figure 13 ci-dessous). En termes de risque, le modèle 2 qui suppose que les failles visibles dans les sédiments se prolongent dans le socle est plus conservateur. Dans les deux cas, la distance aux failles principales supposées est jugée suffisante par l'étude de risque pour éviter un risque de réactivation par le projet durant la stimulation.

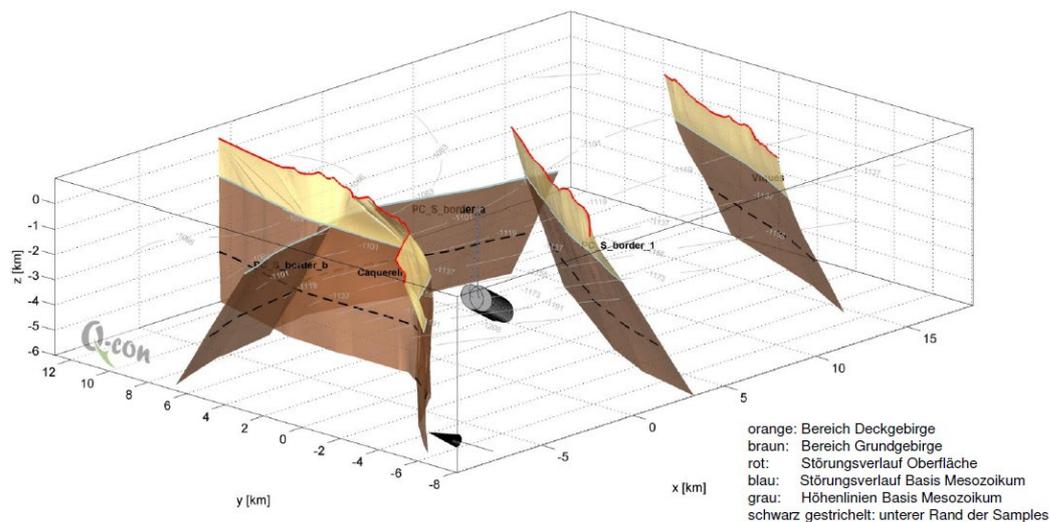


Figure 13 : Représentation en 3D du modèle de faille (modèle 2). Les parties en brun clair représentent les failles dans les séries sédimentaires et en brun foncé leur prolongation dans le socle cristallin selon une hypothèse conservatrice du point de vue du risque. Le futur réservoir géothermique est représenté en gris. La distance aux failles principales supposées est jugée suffisante par l'étude de risque pour éviter un risque de réactivation durant la stimulation.

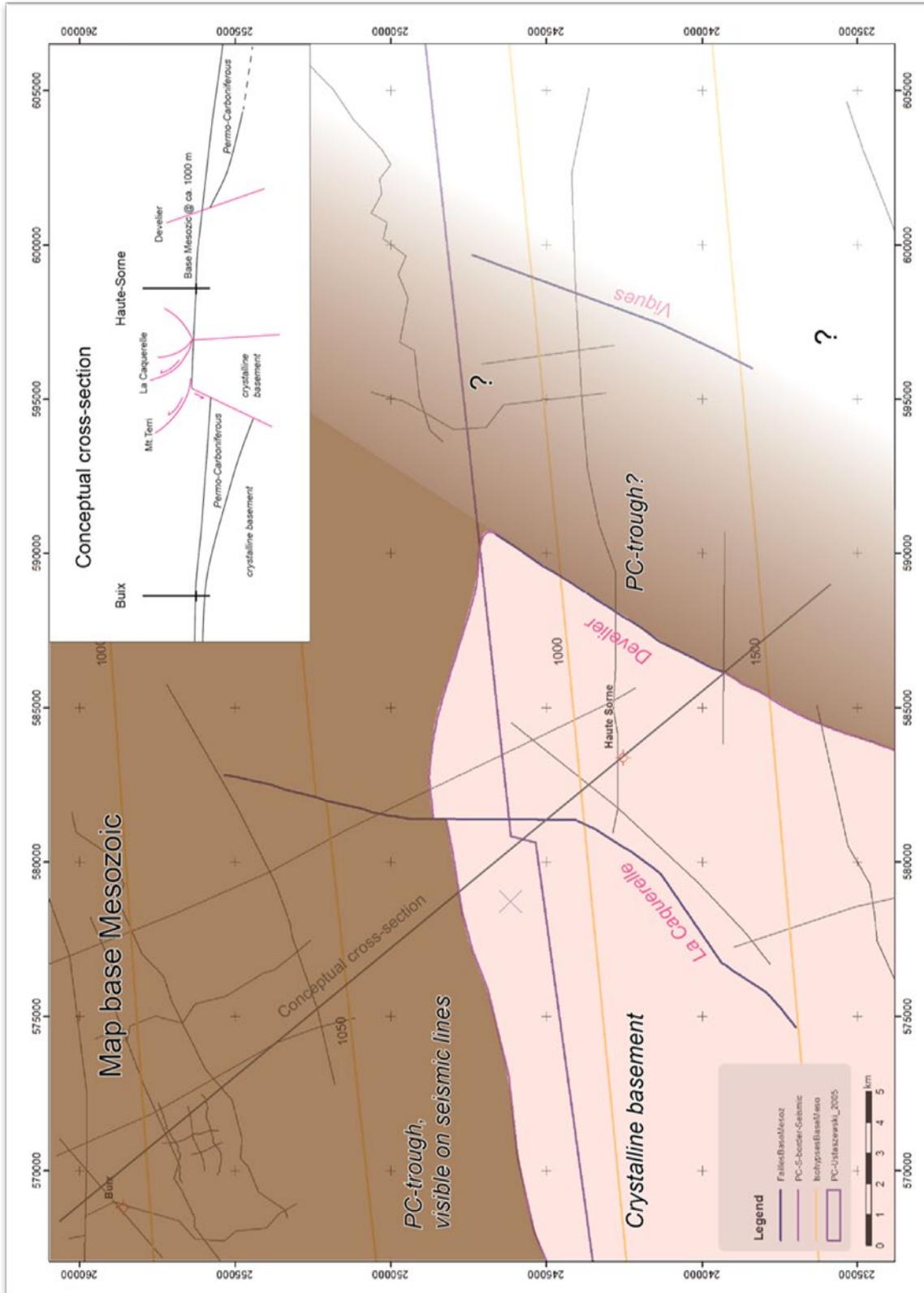


Figure 14 : Carte structurale à la base du Mésozoïque(modèle 2). Le modèle 1 est identique en ce qui concerne la répartition des fossés permo-carbonifères mais ne postule pas la continuation des autres failles dans le socle (La caquerelle, Develier, Viques). La coupe schématique en vignette illustre le concept tectonique régional.

2.6 Construction du modèle géologique de la Haute-Sorne

Le modèle géologique du bassin de Delémont a été construit sur la base d'une coupe longitudinale et de 5 coupes orthogonales réparties sur le secteur (voir Figure 15, ci-dessous et Annexes 1 et 2).

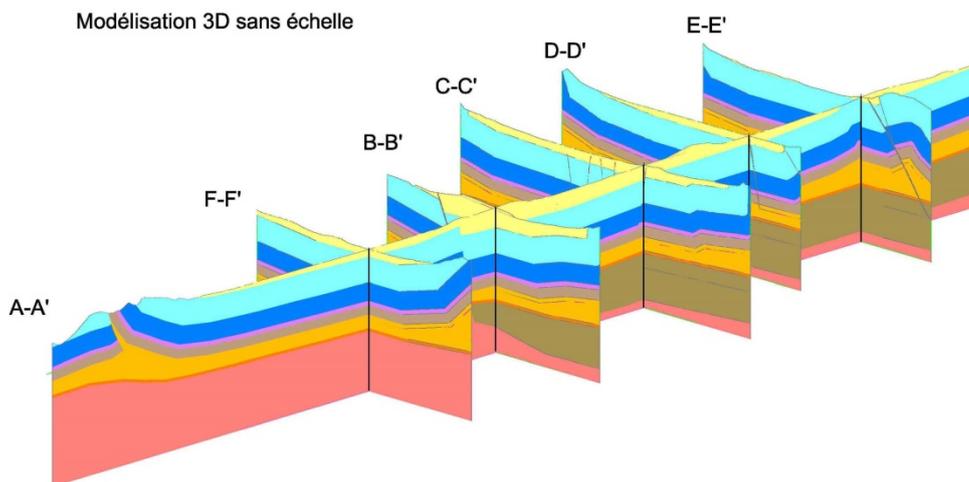


Figure 15 : Profils géologiques à travers le bassin de Delémont, de la couverture sédimentaire jusqu'au socle.

Ces profils s'appuient sur la connaissance de la géologie de surface, sur la réinterprétation de la sismique pétrolière et sur l'étude gravimétrique (chapitre précédent) pour ce qui est de la répartition des sédiments permo-carbonifères dans le socle (en brun sur ces profils).

Ces profils géologiques ont été calés dans la partie supérieure sur les 3 sondages profonds réalisés à Delémont jusqu'à 420 m de profondeur (voir Figure 3, ci-dessus - MFR, 1991). Pour les formations plus profondes du Mésozoïque, le forage de Buix a été considéré (Figure 4).

Le modèle structural admet généralement un épaissement de "l'Anhydritgruppe" (Muschelkalk moyen et inférieur), qui se comporte de manière ductile dans les zones de plissement et de failles (Pfiffner, 2009).

Le profil longitudinal AA' (Annexe 1) montre que le centre du bassin est caractérisé par une structure tabulaire avec quelques failles normales produisant localement un décalage des couches de l'ordre de 50-200 m. Les discontinuités majeures visibles à l'affleurement ou sur les profils sismiques dans les séries sédimentaires sont décrites d'ouest en est (voir Figure 5, § 3.1):

- le chevauchement de la Caquerelle est caractéristique d'un modèle de déformation de type *thin skin* avec un décollement de la couverture sédimentaire par rapport au socle;
- le décrochement sénestre de la Caquerelle, qui n'apparaît ici pas en surface, représente certainement la discontinuité majeure à l'échelle régionale. Elle conditionne en effet la

fermeture du bassin de Delémont à l'ouest en prenant vraisemblablement racine dans le socle cristallin (FOTs, 2008);

- la faille de Develier est clairement mise en évidence par la sismique avec une légère inclinaison vers l'est et un rejet des couches de l'ordre de 160-180 m (Suter, 1978, Swisstopo);
- la faille de Courrendlin est moins marquée et n'atteint vraisemblablement pas le socle (Suter, 1978);
- la faille de Vicques montre un système en compression avec une petite structure anticlinale du côté ouest et un rejet des couches de l'ordre de 130-150 m (Suter, 1978; Laubscher, 2008; Jordan, 2008).

La prolongation de ces failles dans le socle fait l'objet des discussions du chapitre précédent

2.7 Profil de forage prévisionnel

Le profil prévisionnel est illustré de manière détaillée à l'annexe 3.

Les connaissances sur la couverture sédimentaire du bassin de Delémont diminuent significativement en profondeur:

- l'épaisseur des formations tertiaires (Molasse / Miocène-Oligocène et Sidérolithique / Eocène) est relativement bien connue par l'inventaire des nombreux puits de mine excavés au début du siècle passé dans le centre-nord du bassin (Baumberger, 1923), par les forages réalisés à Delémont (MFR, 1991) et par les relevés des sondes géothermiques à disposition. D'une épaisseur maximale de plus de 300 m au centre du bassin, elle se réduit de manière significative en bordure de celui-ci, pour atteindre environ 50-100 m dans le secteur de Haute-Sorne;
- le Malm a été recoupé entièrement par les forages de Delémont mentionnés ci-dessus, où il présente une épaisseur totale de 360 m (y c. les marnes oxfordiennes);
- les épaisseurs respectives du Dogger et du Lias sont tirées de données régionales, principalement des tunnels autoroutiers de l'A16. On admet des épaisseurs respectives de 360 et de 50 m pour ces 2 ensembles;
- les formations du Trias (Keuper, Muschelkalk et Buntsandstein) ont été recoupées par le forage de Buix (Schmidt & al., 1924), situé à 22 km au nord-ouest de Delémont. Au sein de cette formation, l'épaisseur du Muschelkalk moyen et inférieur ou "Anhydritgruppe" est admise comme étant variable, dans la mesure où cette formation a joué comme horizon de décollement lors du plissement jurassien (Pfiffner, 2009);
- d'après certaines interprétations tirées notamment des données sismiques en Ajoie et en France voisine, la présence de sédiments du Permien (Rotliegendes) et du Carbonifère est possible dans le bassin de Delémont également (Ustaszewski, 2004). L'interprétation des données gravimétriques par Abdelfettah (2013) laisse supposer la

présence de sédiments permo-carbonifères à l'est de la faille de Develier uniquement (chapitre 2.5.1). Selon cette analyse, les couches du Mésozoïque reposeraient ainsi directement sur le socle au droit du site de Haute-Sorne;

- A l'est de la faille de Develier, nous avons admis la présence de sédiments permo-carbonifères d'une épaisseur maximale de 800 m, selon les données recueillies sur les forages ayant atteint le socle dans la région de Bâle (Valley & Evans, 2009).

Sur la base des hypothèses précédentes, le socle composé de granite et de gneiss est donc attendu vers 1.5 km de profondeur sur le site de Haute-Sorne (voir Figure 16, ci-dessous et Annexe 3).

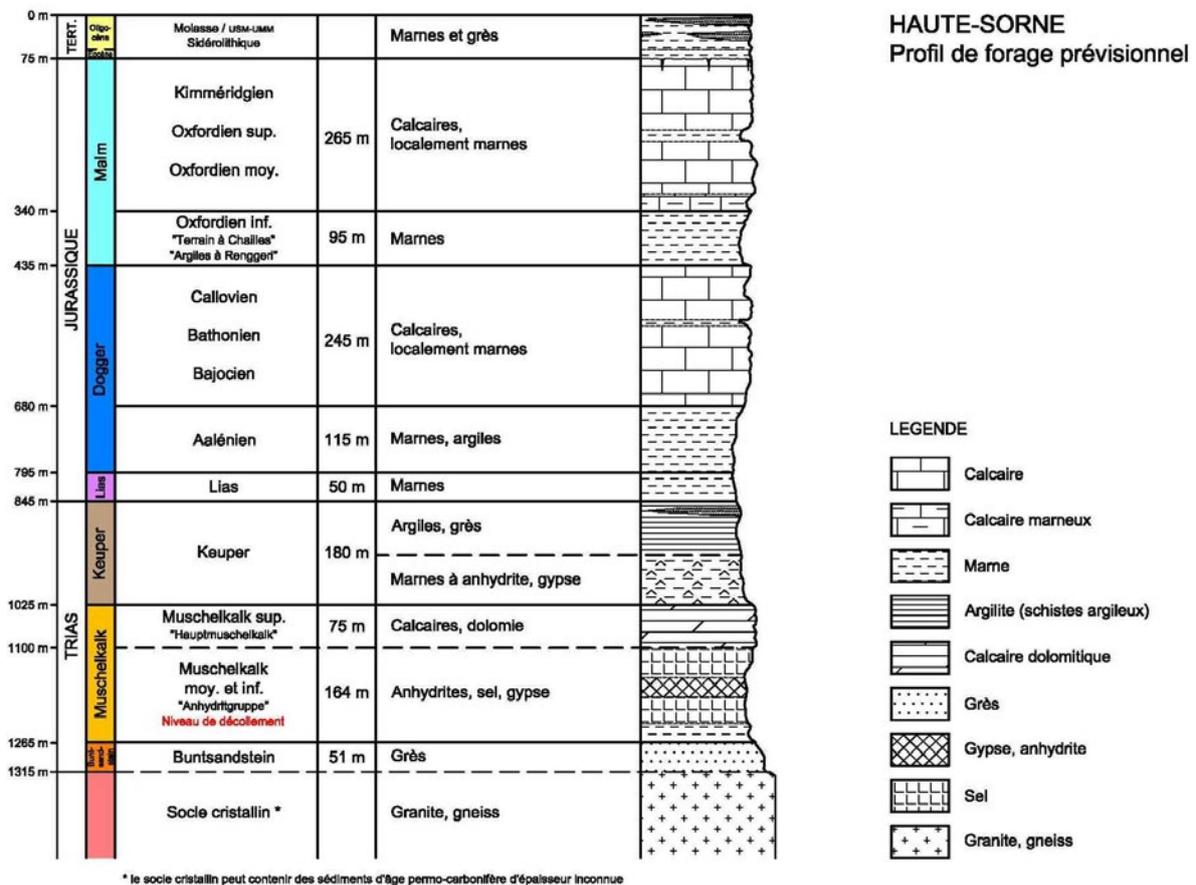


Figure 16 : Profil de forage prévisionnel

2.8 Modèle de températures

En l'absence de forage profond dans le bassin de Delémont, seules des hypothèses peuvent être émises sur les températures à la profondeur cible (3.5 à 5 km).

Le forage le plus proche (Delémont S1), d'une profondeur de 430m seulement présente un gradient moyen relativement bas de 28 à 29 °C/Km dans le Tertiaire et le Malm. Un gradient moyen bien plus élevé de près de 40 °C/km peut être déduit pour le Mésozoïque de 4 points de mesure effectués en 1921 dans le forage de Buix entre 469 et 888 m de profondeur. Ce forage se situe à plus de 20 km de la région étudiée. Ces valeurs doivent toutefois être prises avec précaution au vu de leur grand âge. Un gradient moyen d'environ 40 °C/km peut également être dérivé du forage Basel-1 (38 km) pour le Tertiaire et le Mésozoïque entre 0 et 1650 m de profondeur.

Une approche conservatrice a été retenue afin de définir un seuil inférieur à l'estimation de la température à la profondeur cible en Haute-Sorne (Figure 17, Variante basse, courbe orange). Le gradient de 28 à 29 °C/Km mesuré dans le forage de Delémont a été retenu pour toute la série sédimentaire jusqu'à la base du Mésozoïque. Un gradient plus faible, d'environ 25 °C/km a ensuite été retenu pour le socle cristallin. A l'opposé, un scénario optimiste basé sur les mesures du forage du Buix et son gradient élevé d'environ 40 °C/km dans la série sédimentaire et un gradient d'environ 30 °C/km pour le socle cristallin ont été retenus pour définir la « Variante haute » (Figure 17, courbe brune). Finalement, un scénario moyen « Variante de base » a été défini sur la base d'un gradient moyen entre les mesures de Delémont et de Buix dans les sédiments et d'un gradient d'environ 28 °C/km pour le socle cristallin (Figure 17, courbe rouge). Il est à noter qu'aucun des modèles ne tient compte de la présence éventuelle de sédiments Permo-carbonifères qui auraient un effet positif sur les températures au vu de leur caractère d'isolant thermique.

Les calculs ont été effectués au moyen d'une solution analytique unidimensionnelle et purement diffusive de l'équation du transfert de chaleur. Ces trois modèles conduisent à une température comprise entre 138 et 172 °C à 4500m de profondeur, soit un gradient géothermique moyen entre la surface et 4500m compris entre 28 et 35 °C/Km. Le gradient géothermique moyen retenu pour le cas de base est de 32.5 °C/Km .

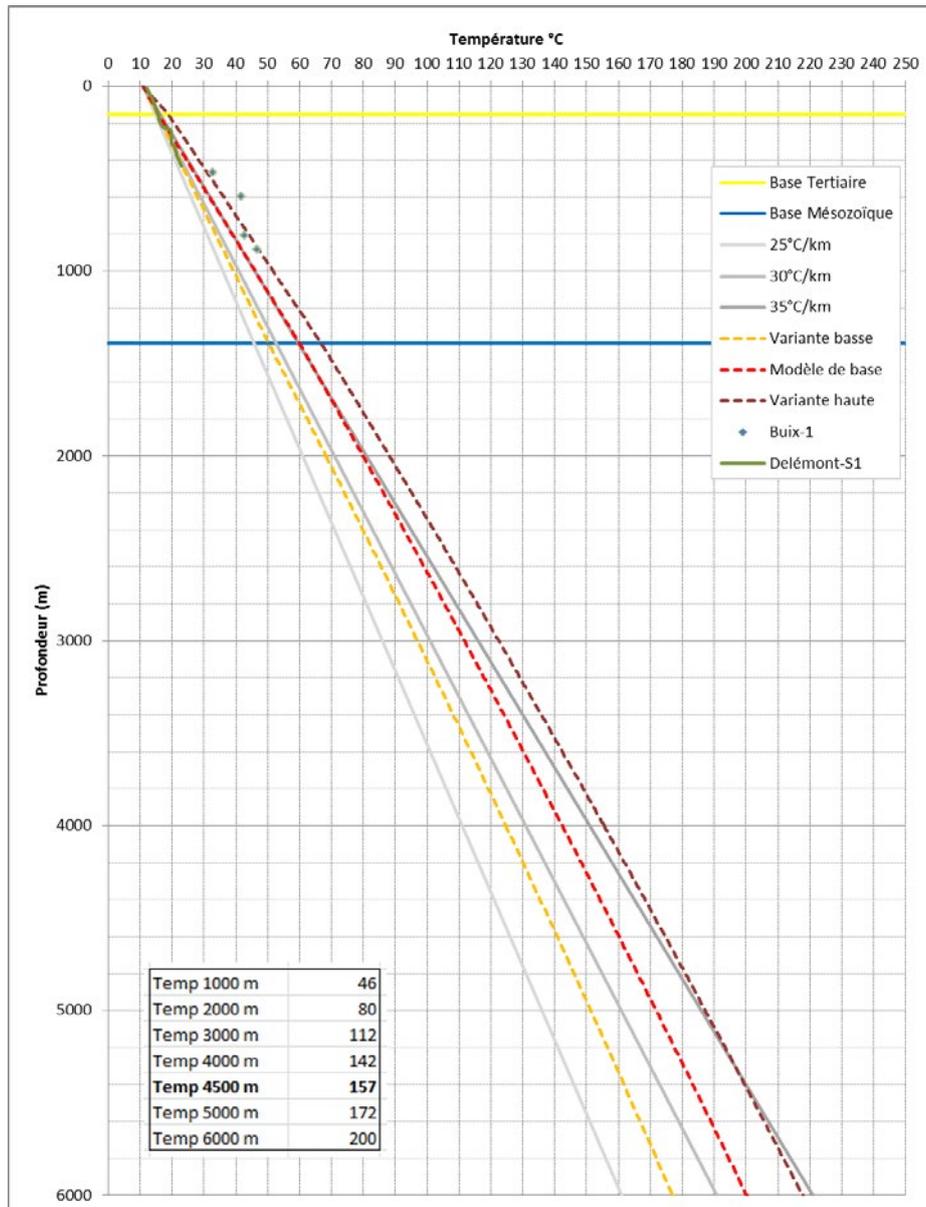


Figure 17 : Modèles de profils de température pour le bassin de Delémont. Les températures sont indiquées en bas à gauche pour la « Variante de base » (courbe rouge).

2.9 Champ de contraintes

Le champ de contrainte dominant dans la couverture sédimentaire a été étudié de manière très détaillée dans le laboratoire de roches du Mont Terri.

Dans ce laboratoire, situé près de St-Ursanne, sept méthodes différentes ont été appliquées pour déterminer qualitativement et quantitativement le champ de contraintes dans les Argiles à Opalinus du Dogger (Bossart & Wermeille, 2003). Bien que les résultats des différentes expériences soient partiellement contradictoires, le champ de contraintes dans les Argiles à Opalinus a été établi en s'appuyant sur des modèles de mécanique des roches (Figure 18).

Method	Reference	Elastic parameters				Stress Axis Orientations derived from breakouts (2-dimensional)		
		Young's Modulus E [GPa]		Poisson's Ratio ν		Method (E, ν)	Azimuth/dip angle σ_{max}	Azimuth/dip angle σ_{min}
		$E_2 = E_3$ Parallel to bedding	E_1 Normal to bedding	$\nu_{12} = \nu_{13}$ Parallel to bedding	ν_{23} Normal to bedding			
Borehole slotter	BOHLER (1997) RUMMEL et al. (1998a, b, c) COTTEUR et al. (1999)	6.7	2.4	0.35	0.35	Dilatometer		
Undercoring	BIGARRÉ & LIZEL (1997) HOMMANN et al. (1997) COTTEUR et al. (1999)	15.1	4.7	0.12	0.36	Laboratory tests		
Hydraulic fracturing	EVANS et al. (1999) HICKMAN & ZOBACK (1983) HAMMON & FAIRHURST (1967) BOHLER (1997)							
Small scale mapping of newly excavated side niches	BOSSART & ADLER (1999)						Sub-vertical Normal to tunnel axis. Subhorizontal	
Mapping borehole breakouts	WERMEILLE & BOSSART, present report	Horizontal boreholes normal to tunnel axis					Vertical NNW-SSE	
		Horizontal boreholes parallel to tunnel axis					Vertical WSW-ESE	
		Vertical borehole drilled downward (60 cm diam.)					WSW-ESE Sub-horizontal SW-NE	
Oriented caliper logging	ALBERT et al. (1998), MORI & BOSSART (1996), MORI et al. (1997), MORI et al. (1998)						Sub-horizontal Sub-horizontal	
Rock mechanical modelling	MARTIN & LANYON (2003)							



	Magnitudes and Orientations of Principal Stresses (3-dimensional)						Remarks
	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ_3 [MPa]	Azimuth/dip angle σ_1 [...°/...°]	Azimuth/dip angle σ_2 [...°/...°]	Azimuth/dip angle σ_3 [...°/...°]	
	3.1	1.6	0.15	181/46	74/16	330/40	Opalinus Clay behaves as a transverse isotropic rock. Values of elasticity modules in the bedding plane are identical ($E_2=E_3$), but not equal to the value normal to bedding plane (E_1). The same is true for the Poisson Ratio values. <ul style="list-style-type: none"> Linear elastic material Anisotropy is not considered Dry boreholes Stresses are calculated σ_1 and σ_2 in bedding plane
	6.5 – 8.0	4.0 – 5.5	0.6 – 1.1	Sub-vertical	50° to NE (\pm normal to tunnel axis)	320° to NW (\pm parallel to tunnel axis)	<ul style="list-style-type: none"> Linear elastic material Anisotropy is considered Dry boreholes Stresses are calculated Same result as hydraulic fracturing
	7.0	$3 < \sigma_2 < \sigma_1$ normal to bedding = 4.2	3	Sub-vertical	WSW-ESE (normal to tunnel axis)	NNW-SSE (parallel to tunnel axis)	<ul style="list-style-type: none"> Assumes linear elastic material (not valid at Mont Terri) Borehole filled with fluid Stresses are measured Hydrofrac parallel to borehole axis not observed Always fracturing parallel bedding
							Method mainly bound to a 2D-case.
							This method is bound to 2D-case.
							Stress-induced breakouts in horizontal boreholes and can be often distinguished from mechanically breakouts. Stress induced breakouts are difficult to distinguish from mechanically induced breakouts in vertical boreholes.
							Breakouts obtained from vertical boreholes should be used with caution to derive stress directions. Mechanical breakouts (e.g. bedding parallel slip) are difficult to distinguish from stress-induced breakouts.
	6 – 7	4 – 5	0.6 – 2	210/70	320/0	52/18	Elastic modelling with EXAMINE 3D, taking into account deformation measurements in boreholes and tunnel convergences of the ED-B mine-by test.



Figure 18 : Aperçu des principales méthodes et résultats des mesures du champ de contrainte au laboratoire souterrain du Mont Terri (source : Bossart & Wermeille, 2003).

Les directions principales des contraintes les plus probables sont les suivantes:

- σ_1 : contrainte majeure, subverticale (210/70), magnitude de 6 à 7 MPa
- σ_2 : contrainte intermédiaire, NE-SW, subhorizontale (320/10), magnitude de 4 à 5 MPa
- σ_3 : contrainte mineure, NW-SE, subhorizontale (050/20), magnitude de 2 à 3 MPa

Les magnitudes des contraintes principales sont définies plus précisément que leurs directions respectives, notamment pour σ_2 et σ_3 , qui présentent une variabilité importante. Ces deux directions de contrainte, intermédiaire et mineure, peuvent même parfois s'inverser.

Les contraintes les plus probables dérivées des travaux au laboratoire souterrain du Mont-Terri sont en bonne adéquation avec le champ de contrainte régional déduit de l'étude des mécanismes au foyer de tremblements de terre (Kastrup, 2004) et avec les mesures réalisées dans le forage profond de Bâle, si ce n'est que la contrainte majeure σ_1 y est subhorizontale (azimut 320°) et que la contrainte intermédiaire σ_2 y est subverticale, leur magnitudes étant toutefois très proches. Nous admettrons une situation semblable à celle de Bâle à la profondeur attendue du réservoir entre 3.5 et 5 km (voir Figure 19 et Figure 20).

En ce qui concerne la stimulation des fractures, le pronostic suivant peut être formulé :

L'orientation optimale des fractures qui pourraient être réactivés dans le champ de contraintes actuel forment un angle d'environ 30° avec σ_H (320°), c'est-à-dire de directions WNW-ESE et NNW-SSE (Figure 20). Les fractures parallèles à σ_H (NW-SE) présentent une faible probabilité de réactivation sous forme de faille décrochantes. Dans le cas d'une faille normale, la situation peut être bien différente comme l'a montré l'exemple de Bâle, où le champ de contrainte au niveau du réservoir est transtensif. Il s'agit d'un état particulier entre un régime de décrochement et d'extension, où σ_V (contrainte verticale) et σ_H (contrainte horizontale principale) sont très proches l'une de l'autre. Dans cette configuration, on peut envisager qu'une fracture a priori mal orientée pour être réactivée en décrochement présente un pendage favorable à une remobilisation en faille normale (extension). Nous nous attendons donc à une structure de réservoir formé en majeure partie d'une combinaison de discontinuités en échelons et stimulées dans une plage d'orientation s'étendant de 30° de part et d'autre de σ_H (Figure 19 et Figure 20). Un développement parallèle à σ_H n'est dans ce contexte pas exclu. Il faut relever que le modèle « en échelons » représente une interprétation possible du réservoir de Bâle développée dans Häring et al., 2008. D'autres modèles potentiels du réservoir de Bâle ont été développés dans l'étude de risque Serianex (Baisch et al., 2009 / AP3000).

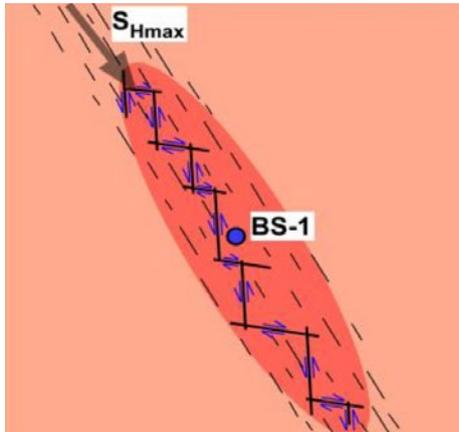


Figure 19 : représentation schématique du réservoir du projet DHM de Bâle selon Häring et al., 2008 qui s'est développé approximativement dans la direction de la contrainte horizontale principale S_{Hmax} par la connexion de fissures en échelon orientées à 30° par rapport à la direction de la contrainte principale.

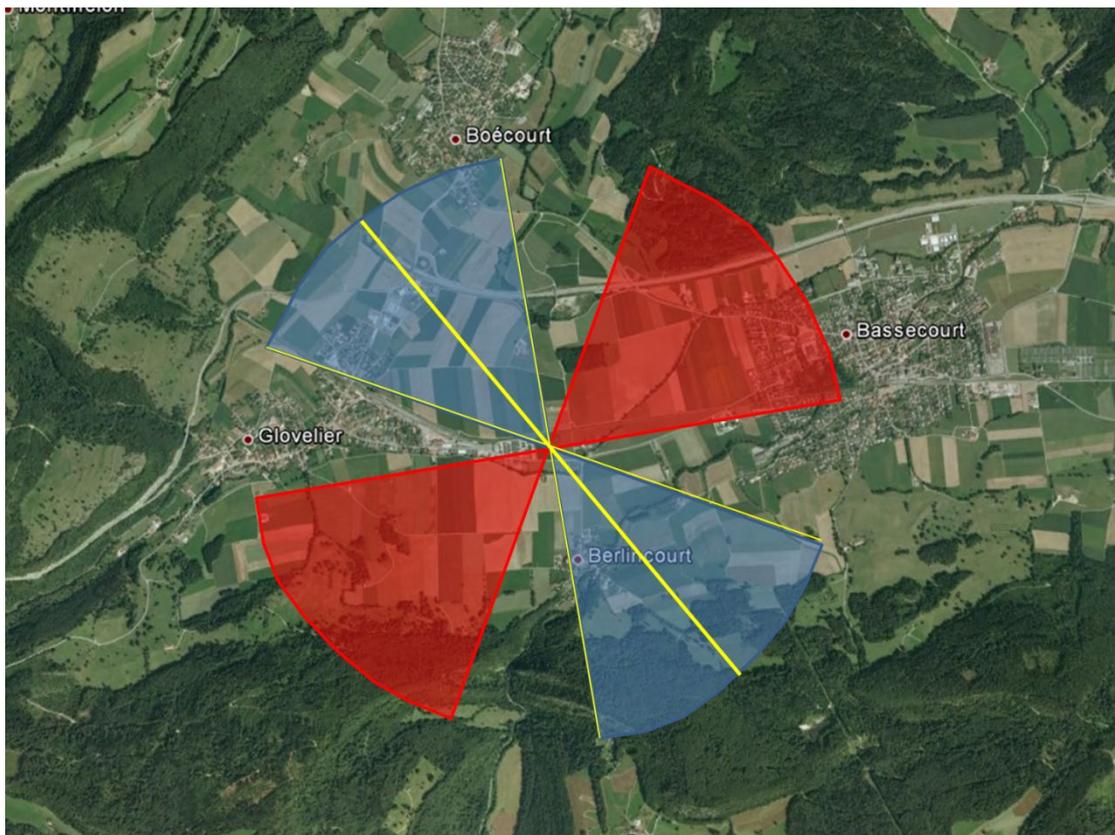


Figure 20 : La direction attendue de la contrainte horizontale principale σ_H est représentée à 320° (par rapport au nord) par le trait jaune épais. Les directions de cisaillement idéales se situent à 30° de part et d'autre et sont représentées par les traits jaunes fins. Sur le modèle du réservoir de Bâle, il est possible que les zones stimulées se développent dans la direction de σ_H par la combinaison en échelon de fissures orientées individuellement à 30° par rapport à σ_H . La zone en bleu indique ainsi le spectre des orientations les plus probables d'après les connaissances actuelles pour le développement des fissures stimulées.

Les forages seront orientés idéalement perpendiculairement à la direction de développement du réservoir, soit dans une zone de plus ou moins 30° de part et d'autre de la perpendiculaire à σ_H . Ce spectre de directions préférentielles pour la réalisation des forages est indiqué par la zone en rouge.

Les deux secteurs rouges (au SO et au NE) sont, d'après les connaissances actuelles, favorables pour la réalisation des forages. Le secteur NE a été retenu sur la base de l'étude de risque sismique afin de garantir une distance suffisante à la zone de faille de la Caquerelle qui pourrait s'étendre dans le socle au niveau du réservoir (voir chapitre 2.5).

L'orientation du réservoir retenue pour l'étude de risque est illustrée à la Figure 21. Elle correspond, en termes de risque sismique, à la variante la moins favorable pour le secteur NE retenu car elle implique qu'une partie du réservoir stimulé se situera directement sous le village de Bassecourt. Comme toujours, le choix d'une approche conservatrice en termes de risque sismique a été retenu.

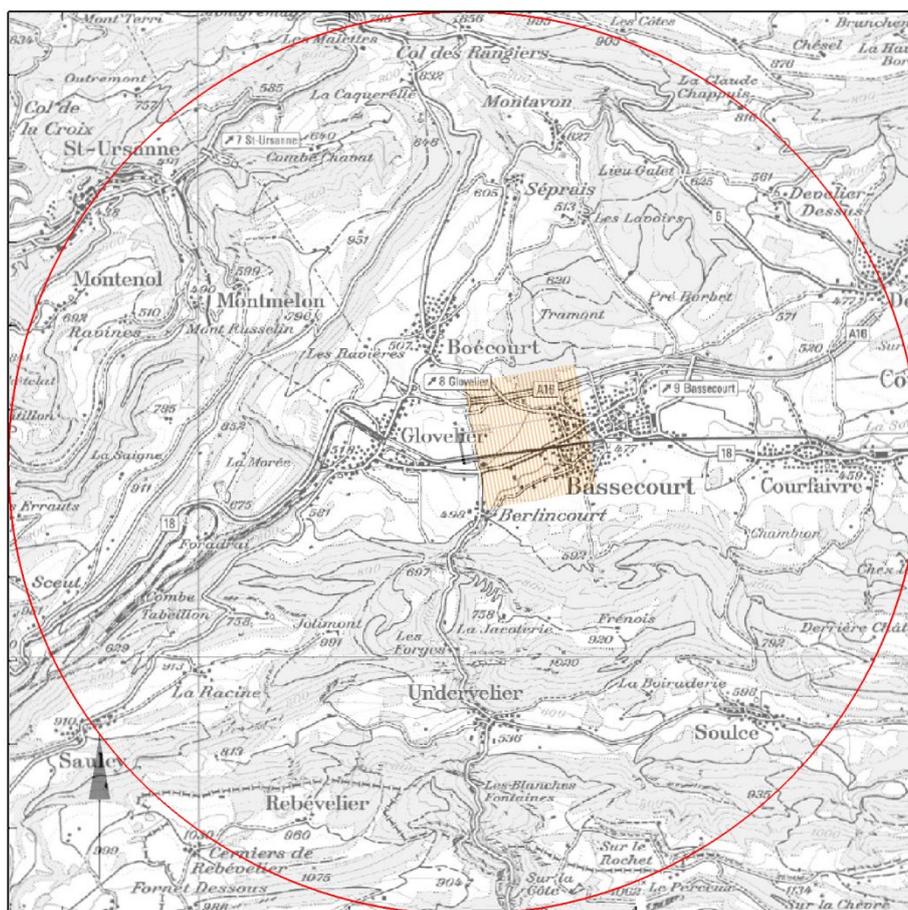


Figure 21 : Représentation schématique du réservoir stimulé (carré hachuré orange) dont l'orientation a été retenue pour l'étude de risque. Les hachures orange représentent l'orientation attendue des zones stimulées par rapport au champ de contraintes régional.

Il est finalement important de relever que l'orientation finale de la section inclinée du forage sera décidée une fois le test de stimulation effectué (voir chapitre 3.4). C'est en effet à ce moment que l'orientation de la contrainte horizontale principale du champ de contrainte sera connue et que l'orientation des zones stimulées aura pu être déterminée. Le forage sera alors dévié perpendiculairement à cette orientation pour la stimulation finale du réservoir.

La figure suivante représente le forage et le réservoir stimulé projetés sur la coupe géologique longitudinale de la vallée de Delémont (annexe 1).

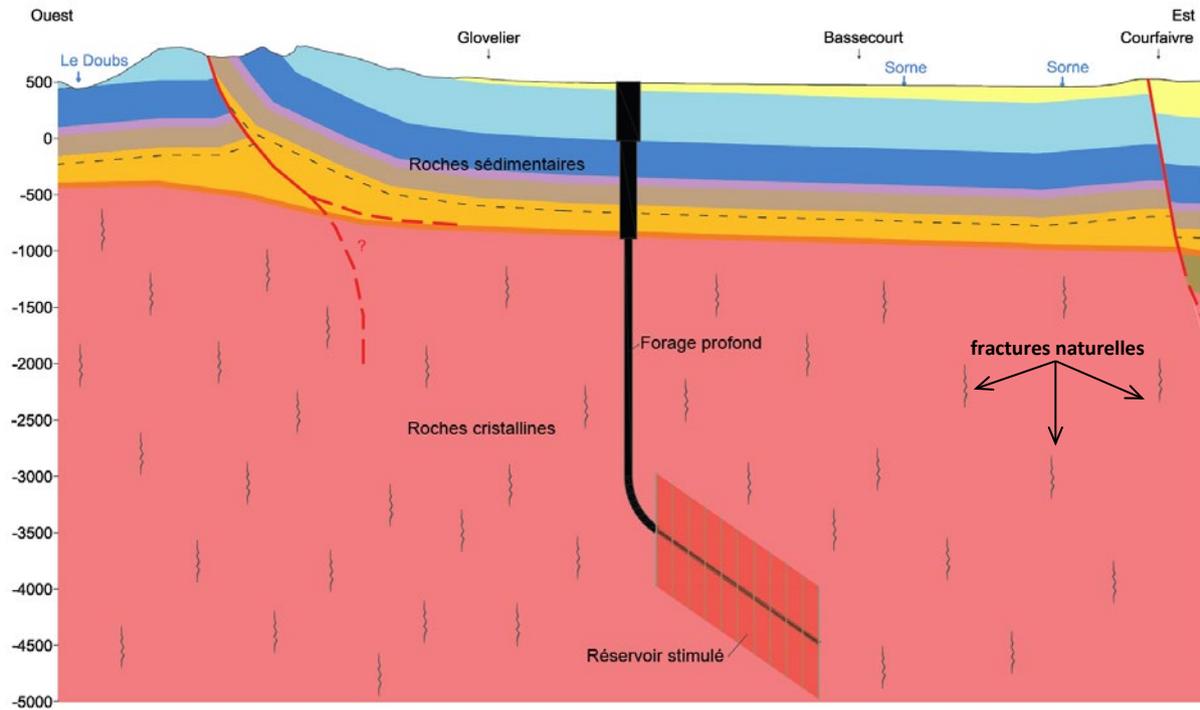


Figure 22 : Coupe géologique ouest-est entre le Doubs et Courfivaire avec forage profond et réservoir stimulé représentés de manière schématique. Le diamètre décroissant du forage correspond aux différentes sections de tubage. Les couleurs des formations géologiques correspondent au profil de forage prévisionnel du chapitre 2.7 (voir également l'annexe 1). Les failles principales sont indiquées en rouge. Les indications de profondeur sont données relativement au niveau de la mer.

3 Description du projet

Le présent chapitre décrit le projet de géothermie profonde et sa réalisation, étape par étape.

3.1 Etapes de réalisation

La technique utilisée pour rendre la roche perméable au passage de l'eau, appelée stimulation du réservoir, consiste à injecter de l'eau sous pression pour élargir les fissures naturellement présentes dans le sous-sol. De petites portions de roche seront stimulées successivement pour limiter au maximum les risques sismiques. Cette réalisation se fera par étapes. Ceci permettra des modifications du projet, voire son interruption, selon les résultats obtenus. Cette manière de faire garantit au maximum la sécurité tout en offrant les meilleures chances de réussite. Il est à noter que le graphique ci-dessus ne représente pas la phase optionnelle d'exploration préalable (géophysique et sondage d'exploration). Le calendrier de ces étapes est décrit au chapitre 5.

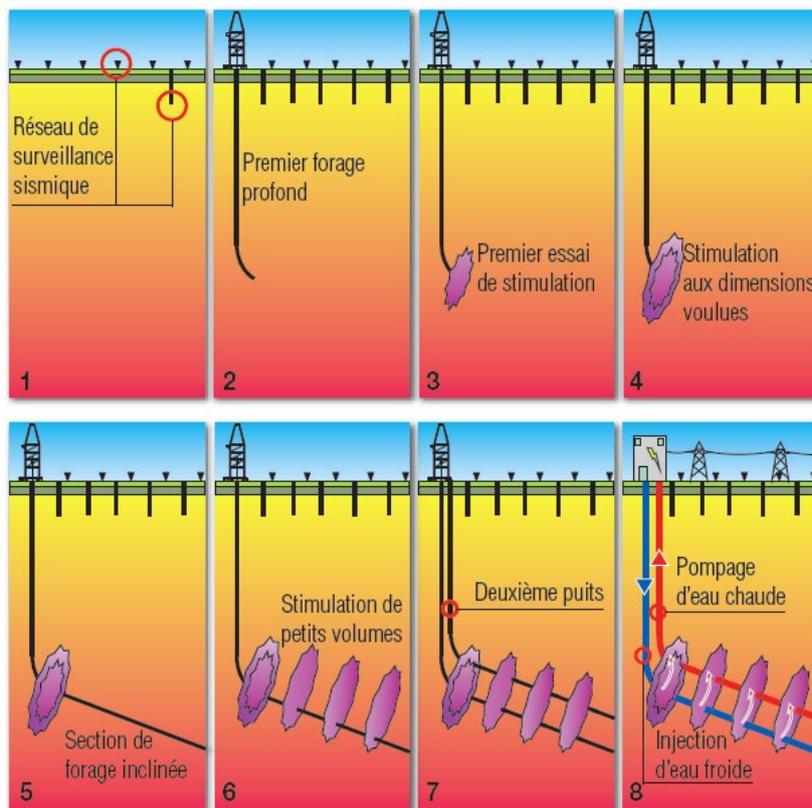


Figure 23 : étapes de réalisation du projet

1. Un réseau de surveillance sismique sera mis en place avant le début du forage. Il se composera d'un certain nombre de sismomètres installés en surface ou dans des forages de quelques centaines de mètres de profondeur et répartis dans toute la région. Il permettra de mesurer la sismicité naturelle et d'«écouter» la micro-sismicité produite lors de la stimulation du réservoir.

2. Le premier forage profond sera réalisé entre 3500 et 4500 mètres de profondeur.
3. Le premier essai de stimulation du réservoir sera réalisé pour mesurer la réponse sismique du sous-sol.
4. Si tout se déroule selon les plans, la stimulation sera poursuivie aux dimensions voulues.
5. La section inclinée pourra ensuite être forée.
6. Le long de cette section inclinée, de petits volumes de roche seront successivement stimulés, à l'identique de la première stimulation-test.
7. Le deuxième puits, destiné à la production de chaleur et d'électricité, pourra être foré.
8. Des tests de circulation d'eau entre les deux puits seront effectués et la centrale géothermique sera construite.

3.2 Exploration préalable optionnelle : sismique réflexion et sondage d'exploration

Le modèle géologique actuel du sous-sol a été réalisé sur la base des données géologiques et géophysiques existantes (chapitre 2). Ces données sont limitées tant par leur quantité que par leur qualité. L'acquisition de nouvelles données permettrait de réduire les incertitudes liées à la géologie du site. Elle n'aurait par contre pas d'impact significatif sur l'évaluation du risque sismique, raison pour laquelle ces travaux sont optionnels.

3.2.1 Campagne de sismique-réflexion

Les données sismiques actuellement disponibles pour la Haute-Sorne consistent en trois profils acquis par l'industrie pétrolière au début des années 70. En l'absence de forage profond, ces données constituent la principale base pour la construction du modèle géologique. Leur qualité est moyenne, elles permettent toutefois une interprétation des formations sédimentaires du Cénozoïque et du Mésozoïque. Les failles principales affectant ces formations sont clairement identifiables (voir chapitre 2.4). Ces données ne livrent par contre que peu d'informations sur le socle cristallin.

Si une campagne devait être réalisée, elle consisterait en l'acquisition de 3 à 4 profils sismiques d'une quinzaine de kilomètres chacun ; 1 à 2 dans l'axe de la vallée et 2 perpendiculaires.

Les travaux seraient réalisés au moyen de 3 à 4 camions vibreurs (Figure 24) et dureraient (avec le travail de permitting) environ 4 mois (voir calendrier des réalisations, chapitre 5).

L'enregistrement des données est effectué par des géophones répartis en groupe tous les 30 mètres environ est reliés à l'enregistreur par des câbles.



Figure 24 : camions vibreurs lors d'une campagne de sismique-réflexion.

Il est probable que l'acquisition de nouvelles données, au vu des progrès technologiques de ces 40 dernières années fournirait des données de qualité supérieure à celles actuellement disponibles. Il est brièvement discuté ci-dessous ce que l'acquisition de telles données apporterait et quelles en seraient les limitations :

- Identification de failles importantes dans le socle cristallin au niveau du réservoir : La sismique-réflexion ne peut « imager » une faille raide qu'indirectement grâce au décalage des réflecteurs des formations géologiques stratifiées. L'absence de stratification, comme dans le socle cristallin, implique une impossibilité de mettre des failles en évidence. On en est donc réduit à des conjectures basées sur l'extrapolation ou non des failles identifiées dans les formations sédimentaires plus récentes et situées environ 2 km au-dessus du niveau du réservoir.
- Présence d'épais dépôts sédimentaires permo-carbonifères : Des dépôts particulièrement épais (> 2000m) sont peu probables en Haute-Sorne (voir chapitre 2.5). Un tel scénario pourrait par contre rendre le site inadéquat à la réalisation du projet, des roches cristallines étant nécessaires à la stimulation du réservoir. Il est possible, mais pas certain, que de nouvelles données sismiques puissent apporter des informations supplémentaires sur cette question. En effet, les fossés permo-carbonifères ont parfois des caractéristiques telles que leur présence peut être postulée avec une grande probabilité sur la base de données sismiques. L'absence de telles caractéristiques ne représente toutefois pas une preuve de l'absence de tels dépôts sédimentaires !

En conclusion et au vu des connaissances actuelles, la réalisation d'une campagne d'acquisition sismique est jugée peu probable en Haute-Sorne au vu des coûts élevés (1-2 Mio CHF) et des bénéfices relatifs : pas de réduction du risque de sismicité induite ni de garantie quant à la présence de roches cristallines à la profondeur-cible.

3.2.2 Forage de reconnaissance

L'autre moyen d'acquérir des connaissances plus poussées sur le sous-sol profond consisterait à réaliser un forage d'exploration de petit diamètre jusqu'au socle cristallin (au moins 1500 m, jusqu'à 3000 m en cas de sédiments permo-carbonifères). Ces travaux seraient réalisés en trois mois environ (voir calendrier des réalisations, chapitre 5)



Figure 25 : Exemple d'une installation de forage susceptible de réaliser un forage d'exploration : Foreuse Wirth B12 (charge maximale 152 T) à Schlattingen (TG), avril 2011. Exploration géothermique, profondeur atteinte 1508 m

Les apports d'un forage d'exploration seraient :

- Reconnaissance de la profondeur du toit du socle cristallin
- Connaissance précise de la géologie jusqu'au socle cristallin permettant d'optimiser le design du forage profond principal
- Possibilité de faire des mesures et de collecter des informations sur les roches cristallines.

Ces bénéfices sont à mettre en rapport des coûts élevés d'un tel sondage (> 5 Mio CHF). L'alternative consiste à atteindre les mêmes objectifs avec le percement de la section verticale du forage principal (jusqu'à une profondeur de 3500 m environ). Celui-ci sera toutefois réalisé directement

avec le diamètre « final » (voir chapitre 3.4) et sera donc plus coûteux. Cette variante permettrait toutefois d'épargner la réalisation d'un sondage qui ne pourra être valorisé d'aucune autre manière.

L'option de réaliser un tel sondage d'exploration demeure réservée à l'heure actuelle. Les avantages et les inconvénients des deux approches devront encore faire l'objet de considérations détaillées.

3.3 Réseau de surveillance sismique

Hormis les éventuels travaux préliminaires d'exploration (chapitre précédent), la première réalisation concrète du projet de géothermie profonde consistera à mettre en place un réseau de surveillance sismique. Les objectifs d'un tel réseau sont

1. de pouvoir «écouter» la sismicité naturelle et la distinguer de la sismicité induite,
2. d'enregistrer précisément la sismicité induite, fournissant les données de base de la gestion du risque en permettant la mise en place d'un système de feux de circulation,
3. de livrer les informations indispensables à l'ingénierie d'un réservoir stimulé par l'enregistrement de la sismicité induite,
4. de fournir les données de base à un nouveau système de feux de circulation prédictif.

Les exigences posées à un tel système pour les points 1 et 2 ci-dessus sont définies dans des normes telles „Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität – Positionspapier des Forschungskollegiums Physik des Erdkörpers e.V. (FKPE)“, Ritter et al., 2012.

Les besoins de précision nécessaires à l'ingénierie du réservoir (point 3) sont toutefois supérieurs à ceux requis pour le seul contrôle du risque sismique. Cela implique notamment de placer un certain nombre de sismomètres dans des forages de manière à les isoler des bruits de surface et de pouvoir ainsi enregistrer des magnitudes plus faibles.



Figure 26 : sismomètre conçu pour être installé dans un forage.

Des modélisations ont été réalisées afin de définir les caractéristiques de ce réseau de manière à pouvoir répondre aux exigences formulées ci-dessus. Les résultats de ces travaux sont résumés ci-dessous et ont d'ores et déjà été validés par le Service sismologique suisse :

- Installation de 6 à 7 stations de mesure dans un rayon de 5 à 7 km autour du site du projet.
- Les stations se composent de senseurs placés en surface combinés à des sismomètres installés dans des forages de 30 à 300 m de profondeur pour les isoler des bruits de surface.



Figure 27 : A gauche, machine de forage pour la réalisation de sondes géothermiques pouvant servir à la réalisation du réseau de surveillance sismique. A droite, installation de surface contenant l'enregistreur et le système de transmission.

Le réseau de surveillance sismique devra être opérationnel environ 6 mois avant le début des travaux de manière à avoir enregistré le « bruit de fond » de la sismicité naturelle.

Afin d'assurer la transparence des résultats, ces derniers seront publiés en ligne en temps réel et de manière automatique.

3.4 1^{er} Forage profond

3.4.1 Déroulement des opérations de forage

Avant de pouvoir accueillir une installation de forage, une place de forage bétonnée et goudronnée devra d'abord être construite sur le site.

Une fois la place terminée et l'installation de forage montée sur le site, la partie verticale du forage sera réalisée jusqu'à une profondeur de 3500 m environ. Le forage sera ensuite dévié jusqu'à atteindre une inclinaison de 60° environ avec la verticale. Le premier test de stimulation pourra alors être réalisé afin de mesurer la réponse sismique du système. Le protocole de ce test est décrit au chapitre « sismicité » de l'étude de risque. La stimulation pourra ensuite être portée progressivement à la dimension finale. Si les résultats de cette première stimulation sont concluants, la section inclinée de près de 1000 mètres pourra être forée afin d'achever l'ouvrage.

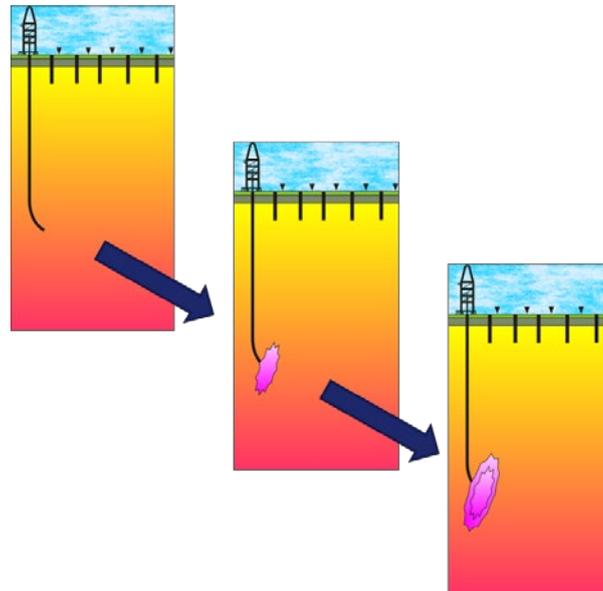


Figure 28 : Réalisation de la section verticale, déviation du forage, premier test de stimulation et stimulation aux dimensions voulues de la première section si les paramètres sismiques demeurent au « vert ».

3.4.2 Construction de la place de forage

La place de forage susceptible d'accueillir des installations de forage de grande dimension devra d'abord être construite. Elle se compose d'une partie centrale bétonnée pouvant supporter le poids des installations et d'un pourtour goudronné permettant la circulation des véhicules et assurant que les eaux de ruissellement potentiellement polluées ne s'infiltrent pas dans le sol et puissent être traitées de manière adéquate.

De plus, trois caves de forage seront construites. Elles serviront à la réalisation des deux forages principaux et permettent de plus la réalisation d'un troisième forage si nécessaire. Les caves de forages sont des cavités bétonnées de quelques mètres de profondeur au travers desquelles le forage est initié. Elles permettent de recueillir des éventuels écoulements d'eaux ou de boues de forage et serviront à accueillir et protéger les têtes de puits et le système de vannes.

Finalement, le raccordement aux infrastructures (eau claire, eaux usées, électricité) sera réalisé et les mesures de protection contre le bruit seront mises en œuvre avec la construction d'une paroi anti-bruit.

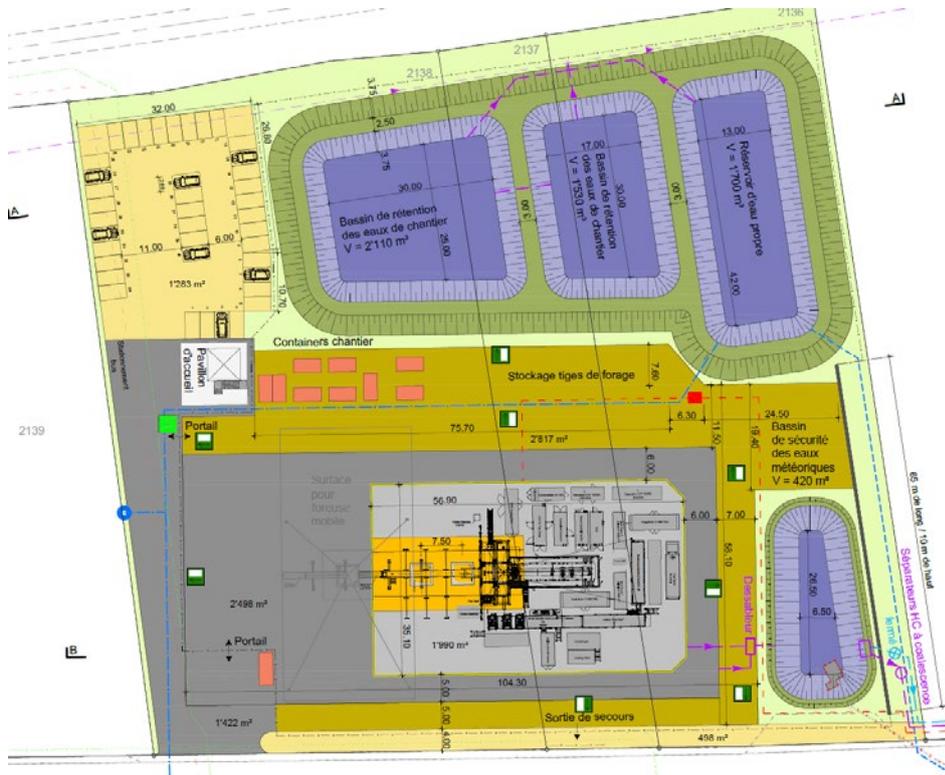


Figure 29 : Plans de la place de forage. En orange, la place de forage bétonnée avec les trois caves de forage ; en gris clair et foncé les surfaces goudronnées. Les bassins pour le stockage de l'eau nécessaire au forage et plus tard à la stimulation sont indiqués en bleu. Un bassin de décantation et un déshuileur sont prévus (en bas à droite) pour recueillir les eaux sales.



Figure 30 : Construction de la place de forage pour le projet de géothermie profonde DHM de Bâle. Au centre, les trois caves de forage sont visibles.

3.4.3 Installation de forage

La réalisation des forages représente la plus grande part des coûts d'un projet de géothermie profonde. Le type de forage et la machine pour le réaliser doivent ainsi être choisis avec soin. Les critères déterminants sont la profondeur totale à forer ainsi que le diamètre de l'ouvrage. En effet, la foreuse doit posséder la puissance suffisante pour pouvoir supporter la totalité de la tige de forage et du tubage et exercer un couple suffisant pour assurer la rotation adéquate de l'outil. Plusieurs types de foreuses sont disponibles sur le marché en fonction de la profondeur à atteindre. Un autre critère important est le bruit causé par les différents composants de la machine. Des critères très stricts doivent être respectés en termes d'immissions sonores, ce qui restreint le choix des machines disponibles. Les paramètres clés de l'installation (poids au crochet, immissions sonores, etc.) seront spécifiés dans l'appel d'offre.

Le forage est réalisé sans interruption en service par équipes, 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. Une demi-année environ est prévue pour la réalisation du premier forage (voir calendrier, chapitre 5)



Figure 31 : Forage géothermique profond de Geretsried en Bavière

3.4.4 Forages dirigés

La réalisation du « coude » du forage et de la section inclinée nécessitera de faire appel aux techniques de forage directionnel. Ces technologies ont initialement été mises en œuvre afin de maintenir un forage le plus vertical possible avant d'être utilisées pour le dévier à des degrés

toujours plus important et avec des géométries de plus en plus complexes. Les deux technologies principales de forage directionnel sont :

- *Mud Motor*, ou turbine entraînée par les boues de forage. Ce système permet de dévier le forage par étape grâce à une pièce coudée située en amont de l'outil de forage ou trépan (Figure 32). La rotation de l'outil au moyen de la turbine uniquement (sans rotation de la tige) permet ainsi d'imprimer une courbure à la trajectoire. En surimposant une rotation de la tige au moyen du moteur de forage principal en surface, le forage peut être poursuivi de manière linéaire, quoiqu'avec un diamètre légèrement supérieur à celui de l'outil.

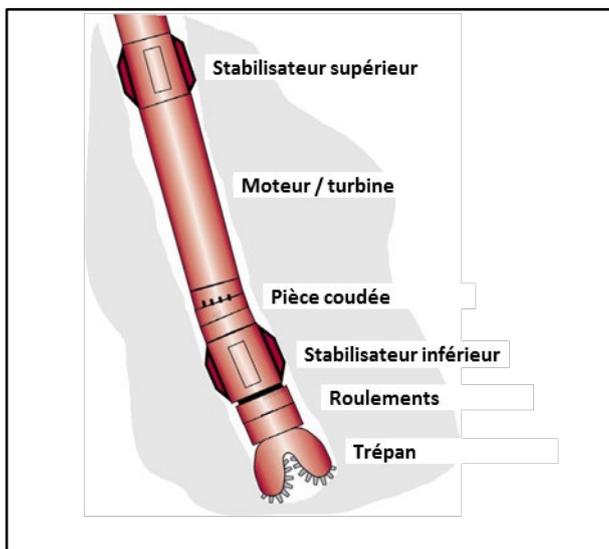


Figure 32 : Forages directionnels : Mud Motor (d'après A.Picksak, Bohrmeisterschule Celle)

- *Rotary Steerable System*, une variante du système *Rotary* impliquant une rotation continue de la tige de forage en même temps qu'une déviation grâce à des éléments orientables sur commande situés en amont de l'outil de forage (Figure 33). Cette méthode présente de nombreux avantages par rapport à la turbine seule. Elle permet en particulier une avancée du forage continue et sans à-coups résultant en une trajectoire plus régulière et des frictions sur la tige de forage plus faibles. Cette méthode est souvent utilisée lors de fortes déviations ou de forages horizontaux. Elle est par contre plus coûteuse à mettre en œuvre.

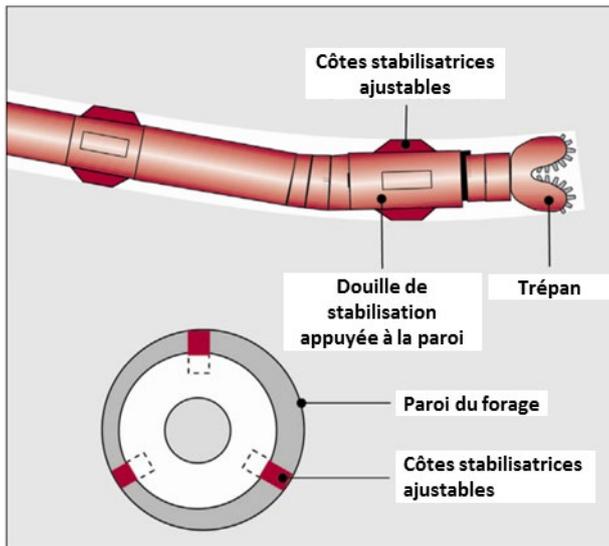
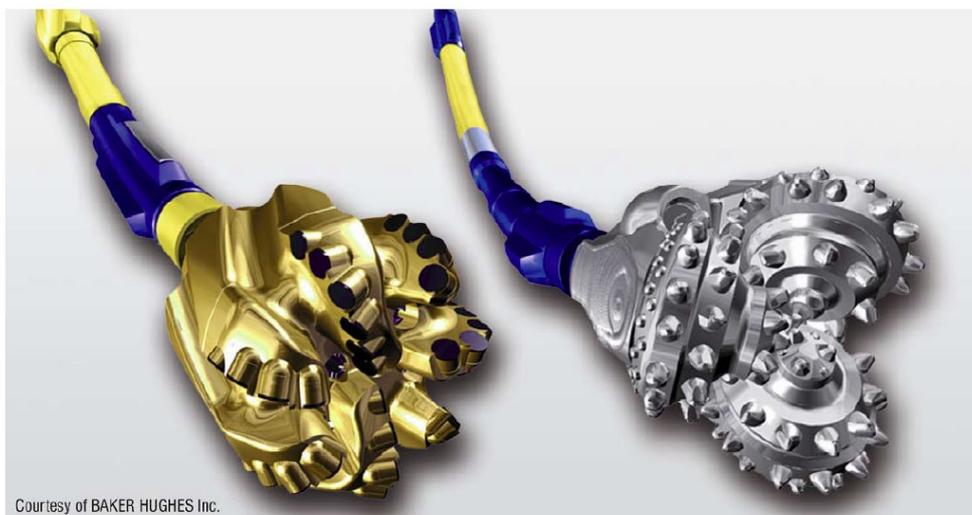


Figure 33 : Forages directionnels : Rotary Steerable System (d'après A.Picksak, Bohrmeisterschule Celle)

Le choix de la technique à mettre en œuvre se fera en même temps que l'établissement du programme définitif de forage.

3.4.5 Outils de forage

Le choix de l'outil de forage se fera en fonction du type de roche à forer et de l'optimisation du rapport entre sa durée de vie, son efficacité et son coût. Les principaux types d'outils sont les tricônes, les outils imprégnés de diamants et les outils de forage à diamants polycristallin (PCD) utilisés pour les roches dures comme le granite ou le gneiss p. ex. (Figure 34). Ces derniers sont bien plus résistants mais également beaucoup plus coûteux que les tricônes classiques.



Courtesy of BAKER HUGHES Inc.

Figure 34 : Outils de forage PCD (gauche) et tricône (droite) (Source : Baker Hughes Inc.)

3.4.6 Boues de forage

Les forages profonds sont toujours réalisés grâce au procédé *Rotary* (rotation de toute la tige de forage par en entrainement en surface) et à l'emploi de fluides de forages. Ces derniers ont diverses fonctions :

- Entrainement et évacuation des déblais de forage (cuttings)
- Lubrification et refroidissement de l'outil de forage
- Stabilisation des parois du trou
- Prévention de remontée de fluides en surpression
- Entrainement de la turbine (si nécessaire)

La composition des fluides de forage (essentiellement eau et bentonite) et des additifs est déterminée au cas par cas en fonction des problèmes spécifiques posés par la géologie. Les boues circulent en circuit fermé et sont entraînées en surface par de puissantes pompes.

Des tamis vibrants permettent de séparer les déblais de forage de la boue. Des centrifugeuses permettent de plus de séparer les particules fines. Ces déchets (déblais et fines) doivent être évacués de façon adéquate en fonction de leur teneur en eau et d'éventuelles contaminations chimiques. A la fin du forage, la boue, séparée de sa fraction solide, est prétraitée in situ avant d'être évacuée vers la STEP.



Figure 35 : Exemple d'un système de traitement de la boue de forage comprenant centrifugeuses et unité de floculation.



Figure 36 : Fraction fine à la sortie des centrifugeuses avant mise en décharge.

3.4.7 Tubage et cimentation

Le tubage et la cimentation ont pour objectif d'assurer la stabilité des parois du forage, d'empêcher la venue de fluides d'une formation géologique dans le trou ou d'empêcher la communication entre deux aquifères. Il n'est pas possible de réaliser un forage profond sans le chemiser au moyen de tubes d'acier au fur et à mesure de la progression pour des raisons de stabilité de l'ouvrage et de sécurité. Après la pose de chaque section de tubage, le forage reprend avec un diamètre inférieur au précédent, ce qui conduit *in fine* à la réalisation d'un forage de manière télescopique. Plus le forage sera profond, plus le nombre de tubes à insérer sera grand et ainsi plus le diamètre initial du forage sera important. Une *colonne perdue* (hanging liner) remplit la même fonction qu'un tubage mais ne remonte pas jusqu'à la surface, elle est « accrochée » à la section précédente avant d'être cimentée.

L'espace annulaire entre le tubage et les parois du trou est rempli de ciment après la pose de chaque section du tubage. La cimentation est garante à terme de la stabilité et de la sécurité du forage et doit être effectuée avec soin. Différents tests et outils de mesure permettent de s'assurer de la qualité de la cimentation.

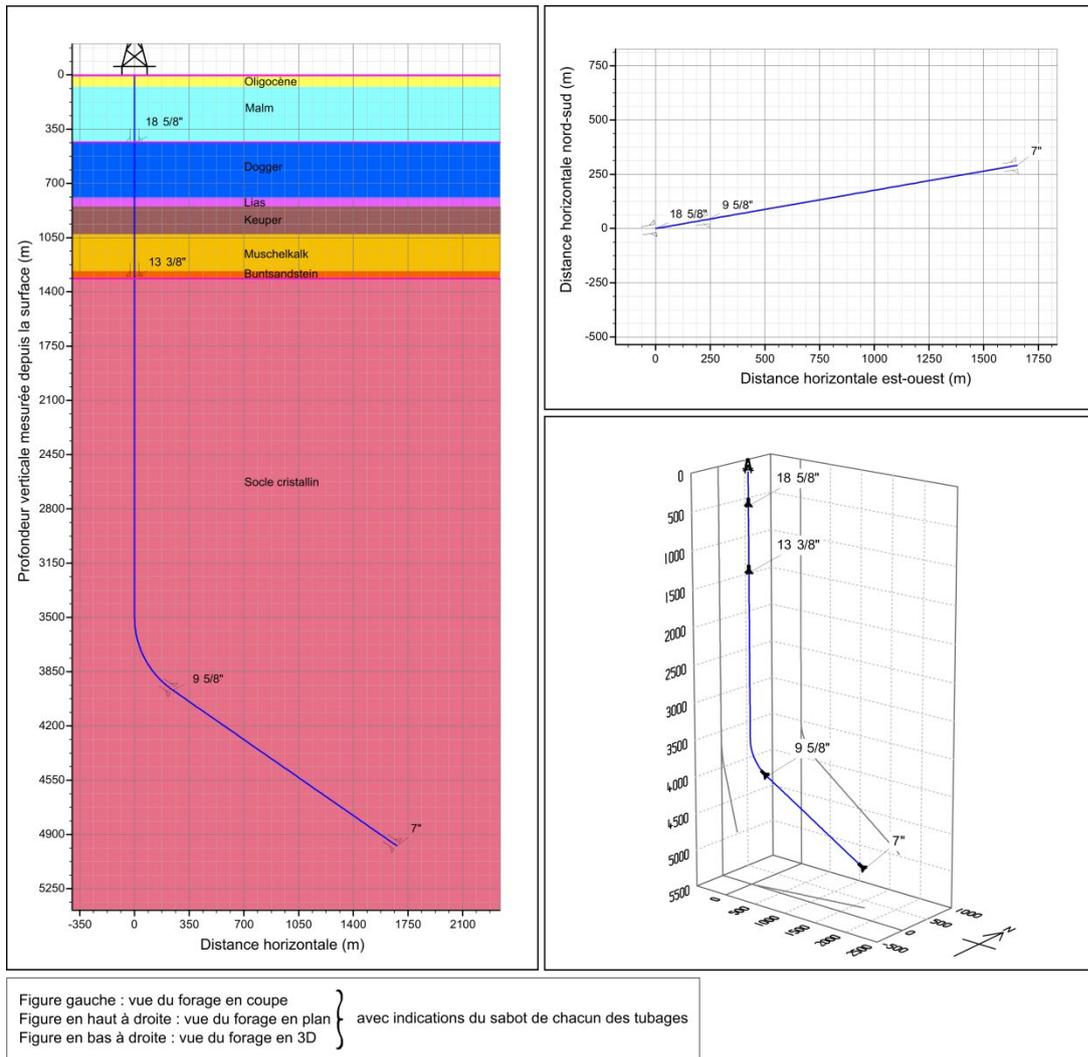


Figure 37 : profil prévisionnel de forage avec indication des diamètres des tubages et colonnes perdues (en pouces). Ce schéma pourra encore changer au cours de la planification de détail du puits.

3.4.8 Complétion

La complétion, à savoir l'équipement du forage dans la zone du réservoir, sera cruciale pour la réussite du projet. Le système choisi devra être susceptible de permettre la stimulation en série de multiples zones le long de la section inclinée en permettant d'isoler les zones à stimuler les unes après les autres. De plus, la stabilité de l'ouvrage à long terme devra être garantie.

Plusieurs solutions peuvent être envisagées, allant de trains de packers en trou ouvert à un tubage complet du réservoir suivi d'une perforation des zones à stimuler. Des études de détail permettront de déterminer la solution la plus appropriée.

3.5 Stimulation du réservoir

Lorsque la perméabilité naturelle de la roche ne permet pas de fournir des débits suffisants au fonctionnement d'un système géothermique, le réservoir peut être « stimulé » de différentes manières afin d'en augmenter la perméabilité.

En géothermie pétrothermale, la stimulation du réservoir représente la phase décisive du projet. La stimulation vise à créer une zone de dimension déterminée dans laquelle la perméabilité naturelle très basse est augmentée afin de permettre à l'eau de circuler entre deux puits avec un débit suffisant au fonctionnement du système.

La méthode employée en géothermie pétrothermale relève du cisaillement hydraulique ou « hydroshearing ». Il n'est pas ici question de créer de nouvelles fractures (fracturation hydraulique ou « fracking ») mais bien d'utiliser le réseau de fractures et les zones de faiblesse présentes naturellement dans la roche et de les « stimuler » en y provoquant un mouvement de cisaillement grâce à l'injection d'eau sous pression. Ce mécanisme est particulièrement efficace dans les roches compétentes comme le granite ou le gneiss et se produit en dessous de la pression de fracking de la roche. La stimulation peut être réalisée simplement avec de l'eau et ne nécessite pas l'emploi d'additifs chimiques.

Divers projets pétrothermaux en roches cristallines (Soultz-sous-Forêts, Bâle) ont démontré que la perméabilité naturelle de la roche peut être augmentée de plusieurs ordres de grandeur et que ce gain est durable, c'est-à-dire que les fissures stimulées ne se referment pas une fois l'injection terminée. Ce phénomène s'explique par la rugosité des parois de la fissure et porte le nom de « self-propping effect » (Figure 38).

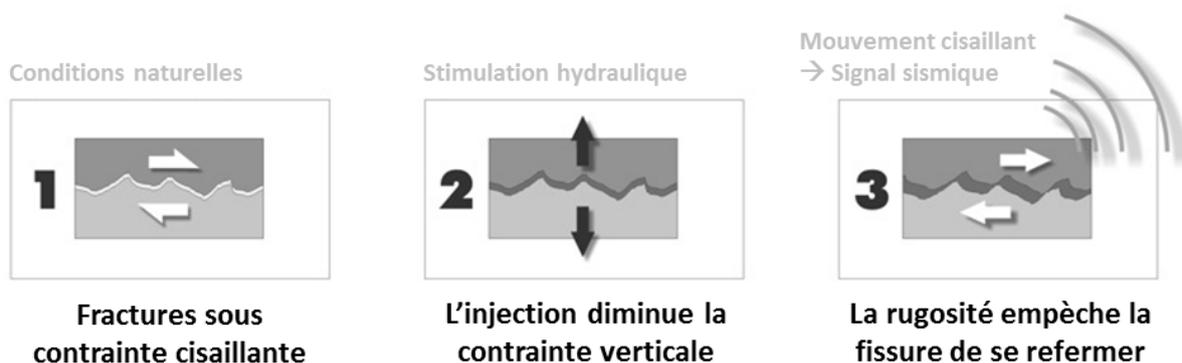


Figure 38 : Principe de la stimulation hydraulique par cisaillement (d'après S. Baisch, Q-con GmbH)

L'examen des données du projet abandonné DHM de Bâle a montré que la sismicité augmente avec l'augmentation de la surface simulée. Ces zones stimulées ont en gros la forme d'un disque vertical. C'est de cette constatation que découle le système de Geo-Energie Suisse consistant à réaliser de multiples stimulations le long d'un forage incliné afin de garder le volume stimulé de chacune d'elles en-dessous des dimensions critiques en termes de sismicité.

Après les essais de stimulation et le percement de la section horizontale (chapitre précédent), une trentaine de stimulations de même dimension seront entreprises. Chacune d'entre elles durera environ trois jours. Comme dans le cas de Bâle, la stimulation sera réalisée avec de l'eau



Figure 39 : Stimulation du forage Basel-1. Les tuyaux flexibles amenant l'eau sous pression dans le forage sont visibles sur la tête de puits.

Les paramètres définitifs de la stimulation feront encore l'objet de modélisations poussées. Il s'agira de définir les valeurs permettant d'atteindre le plus efficacement possible les objectifs de la stimulation. Il est à noter que ces paramètres seront également validés durant l'essai de stimulation et pourront faire l'objet d'adaptations :

- Pression en tête de puits (=surpression hydrostatique dans le réservoir)
- Débit d'injection
- Schéma d'injection (p.ex. montée rapide en pression suivie d'un pallier vs. montée lente en pression)

Les valeurs suivantes ont été définies comme valeurs maximales de dimensionnement des équipements pour l'appel d'offre :

- Pression d'injection maximale en tête de puits durant la stimulation : 300 bar
- Pression de fonctionnement maximale en tête de puits : 50 bar
- Débit d'injection maximal durant la stimulation : 50 l/s
- Débit de fonctionnement maximal : 100 l/s

Les résultats de la stimulation seront observés en temps réel grâce au réseau de surveillance sismique qui permettra de déterminer la géométrie exacte de chaque zone stimulée et d'interrompre les travaux si la sismicité dans le réservoir devait augmenter trop rapidement.

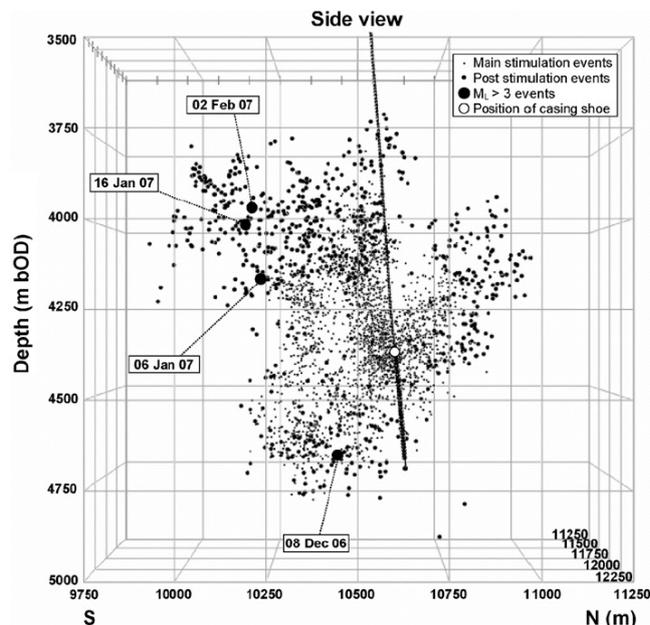


Figure 40 : Géométrie du réservoir du projet DHM de Bâle obtenu par monitoring sismique de la stimulation. Coupe en profondeur N-S passant par le forage Basel-1 (trait). Chaque point représente un événement sismique ayant pu être localisé. Les 4 événements d'une magnitude supérieure à 3 sont aussi représentés. (Häring, 2008)

3.6 2^{ème} forage profond et tests de circulation

Le deuxième forage sera réalisé quasiment à l'identique du premier avec tout d'abord le percement de la section verticale puis de celle inclinée (voir chapitre 3.4). Il n'y aura par contre évidemment plus de test de stimulation avant la réalisation de la section inclinée.

Le principal challenge de second forage sera d'intercepter de manière optimale la région stimulée (le réservoir) du premier forage de manière à établir une communication hydraulique entre les deux puits. La géométrie du réservoir aura été déterminée grâce à l'étude de la micro-sismicité enregistrée par le réseau de surveillance sismique. La distance optimale au premier puits sera quant à elle déterminée par des modélisations numériques basées sur les tests hydrauliques réalisés dans le premier forage. En effet, une distance trop grande impliquerait une grande dépense énergétique au niveau des pompes entretenant la circulation de l'eau. A l'opposé, une distance trop courte pourrait conduire à un court-circuit thermique, c'est-à-dire que l'eau n'aurait pas le temps de se réchauffer avant d'être pompée vers la surface. A l'heure actuelle, une distance de 500 mètres environ est envisagée.

En fonction des résultats de la stimulation du premier forage et des essais hydrauliques qui y seront menés, il est possible qu'il soit également nécessaire de stimuler le deuxième puits de façon analogue à la stimulation du premier.

Une fois le second forage achevé et complété avec les tubes et équipements nécessaires à la production, des tests de circulation de l'eau entre les deux forages pourront débuter. Il s'agira de déterminer les débits maximaux pouvant être atteints. Ce sont ces tests qui apporteront la preuve ultime du fonctionnement du système géothermique stimulé. Ce n'est qu'en cas de résultats positifs que les installations de surface de la centrale géothermique pourront finalement être construites.



Figure 41 : premier test de circulation des forages géothermiques de Habanero en Australie (source : Geodynamics Limited)

4 Description de la centrale géothermique

4.1 Procédé de production d'électricité

Le procédé de production d'électricité dans la centrale géothermique de la Haute-Sorne prévoit l'utilisation d'eau thermale chaude du sous-sol cristallin comme source énergétique. Une température de l'eau de 150°C et un débit de 100 l/s sont attendus. La centrale fonctionnera avec deux circuits fermés.

L'eau géothermale en circuit fermé sera amenée en surface par une pompe. Là, les éventuelles particules présentes dans l'eau seront retirées puis l'eau sera conduite dans un échangeur de chaleur. Après la récupération d'une partie de la chaleur, l'eau sera réinjectée dans le sous-sol par une ou plusieurs pompes.

Le transfert de chaleur au cours du processus de production de courant s'effectuera avec des échangeurs de chaleur tubulaires, où l'eau thermale se trouvera sur le côté tube et le fluide caloporteur sur le côté calandre. Un ORC (Organic Rankine Cycle) sera utilisé comme processus de production de courant électrique, couplé à des refroidisseurs à sec (aérorefroidisseurs) pour le refroidissement et la condensation du fluide caloporteur. Les ORC sont particulièrement répandus dans le domaine des centrales thermiques à biomasse où les températures peuvent aller jusqu'à 350°C.

Pour la production de courant à partir de la géothermie, les températures de service maximales sont sensiblement plus faibles. Elles atteignent des valeurs de 100 à 200°C. Des centrales géothermiques avec cette technologie ont déjà été réalisées avec succès en Allemagne (par ex. Dürnrhaar, Sauerlach, Kirchstockach, Insheim, Landau) et en France (Soulz-sous-Fôrets).

Les températures de l'eau thermale et de service déterminent pour l'essentiel le type de fluide caloporteur. Ces fluides sont généralement soit des hydrocarbures (par ex. propane, isobutane, isopentane, etc.), soit des hydrocarbures fluorés (agents frigorifiques, par ex. R134a, R245fa, etc.). A l'échelle industrielle ces substances sont utilisées comme agents d'expansion ainsi que dans les techniques de climatisation et de réfrigération.

Sur le site de la Haute-Sorne, c'est un hydrocarbure (propane, isobutane ou isopentane) qui sera utilisé comme fluide caloporteur. A pression atmosphérique, ces substances sont gazeuses (propane, isobutane) ou liquides (isopentane) à température ambiante. Selon la pression et la température, ces fluides caloporteurs sont soit sous forme liquide soit sous forme gazeuse dans le processus de travail. La température dans le circuit du fluide caloporteur oscillera entre celle de l'eau du circuit et celle de l'air ambiant.

Principe de fonctionnement : le fluide caloporteur sera tout d'abord amené à une pression de 6 à 50 bars. Puis la chaleur apportée par l'eau géothermale évaporerait le fluide. La vapeur sera détendue

dans une turbine où l'énergie mécanique produite sera transformée en courant électrique dans un générateur. Le fluide caloporteur encore gazeux à la sortie de la turbine sera liquéfié par les aéroréfrigérants (la chaleur est dissipée par l'air ambiant). Le processus pourra alors recommencer.

4.2 Description du projet/Données techniques

L'installation géothermique de Haute-Sorne servira prioritairement à la production de courant. Cependant, la possibilité d'utiliser une partie de la chaleur récupérée dans un chauffage à distance reste ouverte.

4.2.1 Production d'énergie

Partant de l'hypothèse d'une température extérieure moyenne d'env. 10°C sur le site de la Haute-Sorne et d'un rendement thermique d'env. 13 à 14% de l'installation ORC, on estime le rendement électrique brut à environ 5 MW_{él}. L'installation de production du courant sera équipée d'une installation de refroidissement, pour que le fluide caloporteur encore gazeux après le passage dans la turbine soit condensé. Afin de garantir une production de courant électrique aussi efficace que possible, un maximum de chaleur doit être tiré de l'eau du circuit géothermal. En conséquence, l'utilisation de la chaleur résiduelle à d'autres fins (par ex. pour le chauffage) sera limitée. En fonction des résultats du projet (débit, température), il pourrait aussi être décidé d'accorder plus d'importance à un réseau de chauffage à distance au détriment de la production d'électricité ou d'alterner les deux productions en fonction des saisons (électricité en été et chaleur en hiver).

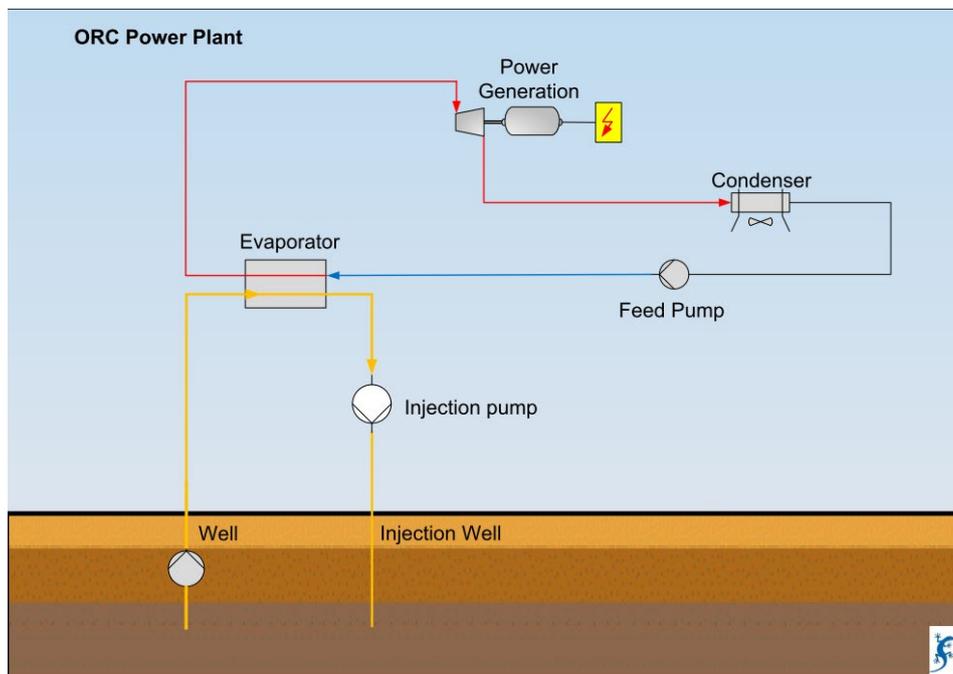


Figure 42: Schéma de la centrale géothermique

4.2.2 Protection contre le bruit

L'expertise bruit de l'étude d'impact montre la nécessité de réaliser une paroi anti-bruit sur le côté est de la zone de chantier (Figure 43). La paroi anti-bruit projetée, d'une longueur de 65 m, aura une hauteur de 10 m calculée depuis la hauteur de la plate-forme de forage. Elle assurera le respect des valeurs prescrites pour les locaux sensibles dans le voisinage.

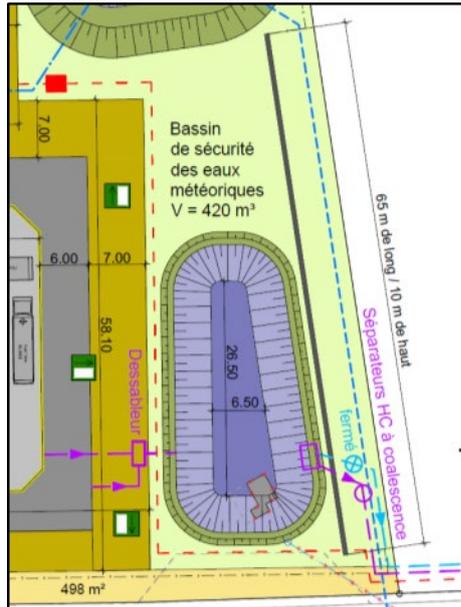


Figure 43 : zone d'implantation de la paroi anti-bruit

Le bruit émis par les équipements de forage se situant prioritairement dans les basses fréquences, la mesure de protection contre le bruit sera choisie de manière à assurer une absorption suffisante du bruit dans ces fréquences. Le type de paroi sera soit de type paroi lourde (béton armé), soit de type paroi légère avec la garantie d'un affaiblissement suffisant dans les gammes de fréquences critiques. Le taux d'affaiblissement (R_w) sera supérieur à 15 dB pour ces gammes de fréquences.

Le choix définitif sera effectué avant la phase de construction. 2 solutions sont actuellement envisageables, soit :

- La construction d'une paroi en béton d'une épaisseur d'environ 15 cm posée sur une semelle filante. Le degré d'affaiblissement dans les gammes critiques y est largement supérieur à 15 dB ou
- La pose d'une paroi anti-bruit provisoire pour la durée du chantier. La Figure 44 présente un exemple de paroi anti-bruit provisoire posée en Allemagne.



Figure 44 : exemple de paroi anti-bruit provisoire (Allemagne)

Le détail constructif de la paroi pour une solution de type provisoire est précisé sur le plan 12J049-806A. Il est également donné à la Figure 45. Le haut de la semelle, d'une largeur de 5.6 m, sera posé à la hauteur de la plateforme de forage (niveau 494.60). Les éléments mobiles de la paroi anti-bruit d'une hauteur de 10.0 m et d'une largeur de 2.5 m seront ensuite fixés sur la semelle. Des soutènements seront également posés et fixés à la semelle filante. L'ensemble du système est dimensionné pour assurer la résistance au vent.

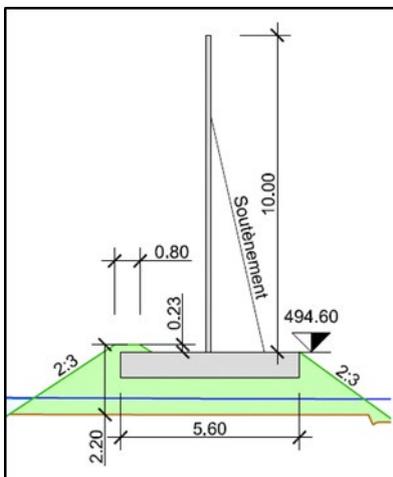


Figure 45 : détail de la PAB

4.3 Description de l'installation

Les plans des installations prévues figurent dans le dossier de demande de permis de construire.

4.3.1 Système d'eau thermique

Le système d'eau thermique fonctionnera conformément aux indications de la production de courant électrique. La régulation de puissance du système d'eau thermique s'effectuera essentiellement par des pompes d'injections et d'alimentation à vitesse/régime réglable. Le débit des pompes sera dimensionné pour fournir la puissance électrique maximale attendue. La durée de fonctionnement de l'installation prévue sera supérieure à 8.000 h/an

Le système d'eau thermique englobe toutes les parties de la centrale géothermique en contact avec l'eau thermique. Afin d'assurer une utilisation maximale des installations, tous les composants auront une redondance ou seront prévus avec un bypass afin qu'une réparation, un échange ou une maintenance puisse s'effectuer.

Le système de conduites sera conçu pour une vitesse d'écoulement ≤ 2 m/s. Pour 100 l/s, le diamètre nominal sera DN250 (diamètre extérieur = 273mm) pour la conduite principale. La longueur de la conduite principale de surface peut être estimée à env. 100 à 150 m. En considérant tous les éléments présents, le volume d'eau thermique en surface sera d'env. 30 m³ en fonctionnement normal. La pression de service dans les installations en surface sera d'environ 10 bars afin d'éviter son ébullition et le dégazage respectivement la précipitation des substances dissoutes.

4.3.1.1 Matériaux

Le type et le choix définitifs de matériel pour l'installation (conduites, armatures, récipients, ...) seront définis dans le cadre du projet d'exécution une fois la composition et les propriétés de l'eau thermique connues.

4.3.1.2 Maintien de la pression

En fonctionnement normal, il est essentiel de maintenir la pression à un niveau suffisamment élevé pour éviter le dégazage et la précipitation.

Pour la compensation de petites variations de pression dans le système en cas d'arrêt des installations ou de variations des conditions d'exploitation, le maintien de la pression et des équilibres est prévu par le biais d'un volume tampon.

Lors de l'arrêt des pompes d'alimentation et d'injections, la chute de pression dans le système entraînera la fermeture des conduites d'arrivées d'eau thermique et celles de réinjection. Une réalimentation dans la conduite s'effectuera en utilisant le volume du récipient de maintien de pression, afin d'éviter toute entrée d'air dans le système.

Lors d'une chute de tension ou d'une coupure de courant, les vannes d'arrêt se mettront en position de sécurité prévue pour la fonction du système de maintien de pression. Une alimentation de secours sera prévue afin d'assurer le fonctionnement des systèmes de mesure et de régulation de l'installation.

4.3.1.3 Filtration

La filtration de l'eau thermale s'effectuera par 2 filtres (redondance : 2x 100%). Ces filtres seront automatiquement rétrolavés avec de l'eau thermale (fluide propre), sans interrompre le fonctionnement du filtre. Selon le dimensionnement des filtres et la charge en particules en suspension, on aura 1 à 2 lavages par jour. La quantité d'eau utilisée pour chaque lavage s'élèvera à environ 100 litres.

Le traitement des résidus de filtration s'effectuera avec un décanteur approprié. Les résidus solides seront conduits dans des containers et si nécessaires, ils seront analysés et éliminés selon les filières appropriées. L'eau épurée sera soit réinjectée avec une pompe dans le circuit d'eau thermale avant la pompe de réinjection, ou déversée dans les canalisations des eaux usées.

4.3.1.4 Traitement de l'eau thermale

L'eau thermale provenant des soupapes de sécurité, de l'aération ou de la vidange des différentes installations sera récupérée dans une cuve. Cette cuve sera conçue afin d'assurer la stabilisation et le refroidissement de l'eau thermale. Les substances précipitées seront évacuées régulièrement selon dans les règles de l'art.

4.3.1.5 Pompes de réinjection

Des pompes centrifuges ou à piston seront utilisées pour injecter l'eau du circuit dans le sous-sol. Le type exact de pompe ne pourra être déterminé qu'une fois les forages terminés.

4.3.2 Processus de production de courant électrique (ORC)

4.3.2.1 Echangeurs de chaleur

Le transfert de chaleur de l'eau thermale vers le fluide caloporteur sera assuré par des échangeurs de chaleur tubulaires.

Selon le procédé, le réchauffement et l'évaporation s'effectuera dans plusieurs préchauffeurs et évaporateurs. Habituellement 2 à 5 appareils sont utilisés pour les installations pour le dimensionnement prévu de l'installation. Les éléments en contact avec l'eau dans l'échangeur de chaleur seront adaptés aux conditions d'exploitation.

4.3.2.2 Pompes d'alimentation

Des pompes en redondance seront utilisées pour amener le fluide caloporteur à la pression de fonctionnement appropriée. Le type de pompes sera précisé en fonction du fluide caloporteur qui sera choisi.

4.3.2.3 Réservoir de stockage du fluide caloporteur

Un réservoir de stockage est prévu pour pouvoir vidanger une partie du fluide caloporteur lors de la révision des installations. Avec l'aide de pompes à vide, le circuit pourra être partiellement vidangé et à nouveau rempli avec une pompe d'alimentation. La citerne se trouvera à l'extérieur du bâtiment technique, probablement recouverte de terre.

4.3.2.4 Turbines et générateurs

La vapeur du fluide caloporteur se détendra dans la turbine et actionnera un générateur. Selon le concept retenu et les paramètres de l'eau thermale, un système de turbine à un ou plusieurs étages sera utilisé.

Le générateur alimentera le réseau électrique de moyenne tension via un transformateur.

Des systèmes d'huile de refroidissement seront nécessaires pour refroidir la turbine et le générateur. De ce fait, chaque groupe possèdera sa propre station d'huile de refroidissement en circuit fermé. Le refroidissement de l'huile sera réalisé via un autre circuit contenant du glycol-eau et des aérorefroidisseurs installés à l'extérieur, ou via un autre système.

4.3.2.5 Vannes d'arrêt rapide de la turbine

Pour pouvoir découpler la turbine du processus lors de défaillances du réseau (pas d'alimentation en courant) ou d'arrêts d'autre sorte, une vanne d'arrêt rapide sera installée sur le circuit du fluide caloporteur avant l'entrée dans la turbine. La vanne sera conçue de telle manière qu'elle se ferme dans les plus brefs délais. Le fluide caloporteur sera alors amené aux refroidisseurs en by-passant la turbine.

4.3.2.6 Installations de refroidissement pour le fluide caloporteur ORC

Le refroidissement/la condensation s'effectuera directement, sans circuit intermédiaire, via des aérorefroidisseurs. L'utilisation d'aérorefroidisseurs dans les centrales géothermiques est conforme à l'état de la technique.

La vapeur provenant de la turbine sera amené aux condensateurs à air via un système de distribution approprié. La taille et le nombre d'aérorefroidisseurs ont été calculés en fonction de la chaleur à dissiper dans le fluide de refroidissement en sortie de la turbine.

La hauteur à laquelle se trouveront les échangeurs de chaleur des aérorefroidisseurs sera d'approximativement 8-10m. Grâce à la grande surface de refroidissement et au passage forcé d'air à température ambiante, le fluide caloporteur passera de l'état gazeux à l'état liquide. Pour des travaux de maintenance, des échelles et plateformes appropriées seront mises en place sur les aérorefroidisseurs.

4.3.2.7 Contrôle de la centrale géothermique

La régulation du processus de production de courant et du système d'eau thermale sera réalisée avec système de contrôle central. Tous les paramètres importants de mesure sur le terrain y seront recensés et traités. L'ensemble de l'installation sera équipé afin qu'il puisse fonctionner à terme en mode entièrement automatique et, qu'en cas de défaillance, il se mette automatiquement en mode sécurisé.

4.4 Liste et quantités de substances

Les substances suivantes seront utilisées dans la centrale géothermique de la Haute-Sorne

Fluide caloporteur :

- Substances utilisées: hydrocarbures (isobutane, propane, isopentane)
- Utilisation: Circuit ORC
- Circuit fermé
- Contenu: environ 30 à 50 tonnes
- Stockage supplémentaire: environ 500 kg
- Durée de vie attendue selon le fluide caloporteur : > 20 ans

Huile de refroidissement / Lubrifiants :

- Substance utilisée: huile hydraulique
- Utilisation: lubrification et refroidissement primaire de la turbine, de la transmission et du générateur
- Circuit fermé
- Contenu: approximativement 500 kg pour chaque unité de refroidissement
- Stockage: environ 400kg

Glycol :

- Utilisation: refroidissement secondaire de la turbine, de la transmission et du générateur
- Circuit fermé
- Contenu : environ 100 l (proportion de mélange de 1:3 (glycol : eau))
- Stockage: environ 200 l (1 fût)

Eau du circuit d'eau thermale :

- Circuit fermé
- Sera soutirée depuis le forage de production et réinjectée dans le forage d'injection
- De petites quantités provenant des soupapes de ventilation et des prises d'échantillon seront éliminées à la canalisation des eaux usées
- Volume présent dans les installations en surface : environ 25 à 30 m³ en fonctionnement normal

Résidus des filtres:

- Circuit ouvert

- Résidus récupérés après le rétrolavage des filtres
- Quantités produits : en fonctionnement, concentration attendue < 1 mg/l ; au démarrage, les concentrations en substances non dissoutes pourront être plus élevées.
- Elimination : après décantation, la phase liquide pourra être réinjectée dans le sous-sol sous certaines conditions. Les matières solides seront éliminées après analyse de manière conforme.

Eaux usées de l'ORC respectivement du nettoyage des aérorefroidisseurs :

- Pas de production en continu d'eaux usées
- Le nettoyage des installations se fera à haute pression avec de l'eau potable
- Les eaux usées pourront, sous condition de respect des exigences applicables, être évacuée à la canalisation des eaux usées

Maintien de la pression dans le système d'eau thermique :

- Quantité stockée: 2 à 3 racks de bouteilles d'azote, chaque rack contenant 12 bouteilles de 50L à 300 bar

En option : produits chimiques pour le traitement de l'eau destiné à la réalimentation en eau :

- par ex. phosphates/sulfites
- éventuellement biocides

4.5 Bruit dans les zone environnantes

Les principales sources d'émission du bruit en provenance de la centrale géothermique sont les ventilateurs de l'installation de refroidissement ainsi que la turbine, les pompes d'alimentation et les pompes d'injections. Les modélisations des émissions sonores de la centrale géothermique effectuées dans le cadre de l'étude d'impact sur l'environnement ont montré qu'en choisissant des équipements appropriés sur le marché (aérorefroidisseurs particulièrement silencieux) et moyennant des mesures de protection (disposition du bâtiment de la centrale pour faire obstacle au bruit), il est possible de respecter les exigences légales de l'Ordonnance sur la protection contre le bruit.

4.6 Qualité de l'air dans les zones environnantes

Une contamination de l'air environnant par le circuit ORC ou celui de l'eau thermal peut être exclue.

Système ORC :

Les raccords entre les différents éléments du circuit ORC seront en matériaux étanches et durables. Les raccords critiques seront équipés d'un système de détection de fuite. De ce fait, aucune fuite ne devrait se produire.

Système d'eau thermal :

Tous les raccords du système d'eau thermale seront également étanches et durables.

4.7 Paysage naturel et bâti

Les installations de refroidissement de la centrale devront s'intégrer le mieux possible dans l'environnement existant du site. Le design ne devra cependant pas engendrer une perte de performance de l'installation.

Pour la centrale géothermique de la Haute-Sorne, les installations suivantes seront nécessaires :

Installations de refroidissement

L'écoulement optimal de l'air dans les aérorefroidisseurs influe fortement sur le rendement du processus de production de courant électrique. Pour garantir une bonne arrivée d'air et un écoulement libre dans les aérorefroidisseurs, la hauteur de l'installation devra se situer entre 8 et 10m.

Bâtiment d'exploitation

Hormis les aérorefroidisseurs, toutes les installations techniques seront dans le bâtiment technique. La hauteur du bâtiment a été fixée d'après la hauteur de l'installation de refroidissement. Ce dernier servira de protection phonique pour la Ferme des Croisées (habitation la plus proche de la centrale)

4.8 Substances dangereuses

Des bacs de rétention étanches seront installés pour sécuriser tous les liquides polluants.

Cela est valable pour les parties de l'installation suivantes :

- Surface sous les échangeurs de chaleur de l'ORC
- Surfaces sous la turbine et les pompes d'alimentation
- Surfaces sous le refroidisseur à air
- Surfaces sous les agrégats de lubrifiants
- Local de stockage pour les substances polluantes (huiles)

4.9 Déchets

Les déchets suivants seront produits à intervalles réguliers dans l'usine de la centrale géothermique :

- Huiles usagées des systèmes de refroidissement des machines (tous les 3 à 5 ans jusqu'à 1'500kg)
- Le cas échéant le fluide caloporteur (temps de vie environ 20 ans)
- Résidus du nettoyage de l'eau thermal (annuellement environ 1 à 2t)
- Le cas échéant, la crépine, respectivement les bougies filtrantes, provenant des filtres d'eau thermale (la fréquence de changement dépendra de la qualité de l'eau)
- Des résidus d'eau thermale
- Les pompes immergées/submersibles pourront éventuellement contenir des traces de substances radioactives, qui, après analyse, devront être éliminées selon les directives de la SUVA (cf. chapitre correspondant de l'étude d'impact)
- Autres déchets, emballages
- Des déchets verts provenant du terrain de l'entreprise

5 Surfaces agricoles

5.1 Recherche d'un site d'implantation minimisant l'emprise sur les surfaces agricoles

La recherche d'un site d'implantation pour le projet de géothermie a fait l'objet d'investigations de détail. Une analyse multicritère a été menée par le bureau RWB en octobre 2012 en Haute-Sorne. Cette analyse s'est basée sur les concepts de l'aménagement du territoire pour trouver et évaluer des sites susceptibles d'accueillir le projet. Elle s'est appuyée sur les sources suivantes :

- Plans cadastraux des communes concernées ;
- Plans de zones et règlements communaux sur les constructions en vigueur ;
- Plan directeur cantonal ainsi que les documents de base de référence pour ce type d'étude, y compris fiche 5.07.1;
- Plan directeur régional de la Haute-Sorne (en cours d'élaboration) ;
- Données SIT.

Le projet de géothermie nécessite une surface totale d'environ 20'000 m². Les friches et les surfaces disponibles affectées en zones d'activités ou mixte dans la Haute-Sorne ont été prises en considération mais n'ont pas été retenues (Figure 46). Aucune parcelle mentionnée n'atteint la taille de 20'000 m². Les nuisances liées au forage et à l'exploitation de la centrale géothermique limitent également les possibilités de développement en zone d'activités ou en zone mixte adjacentes ou à proximité d'une zone d'habitation. En effet, le système de refroidissement de la centrale engendre des émissions sonores de jour comme de nuit. Aussi, les terrains ou les friches situés au milieu de la zone à bâtir ont été estimés inappropriés.

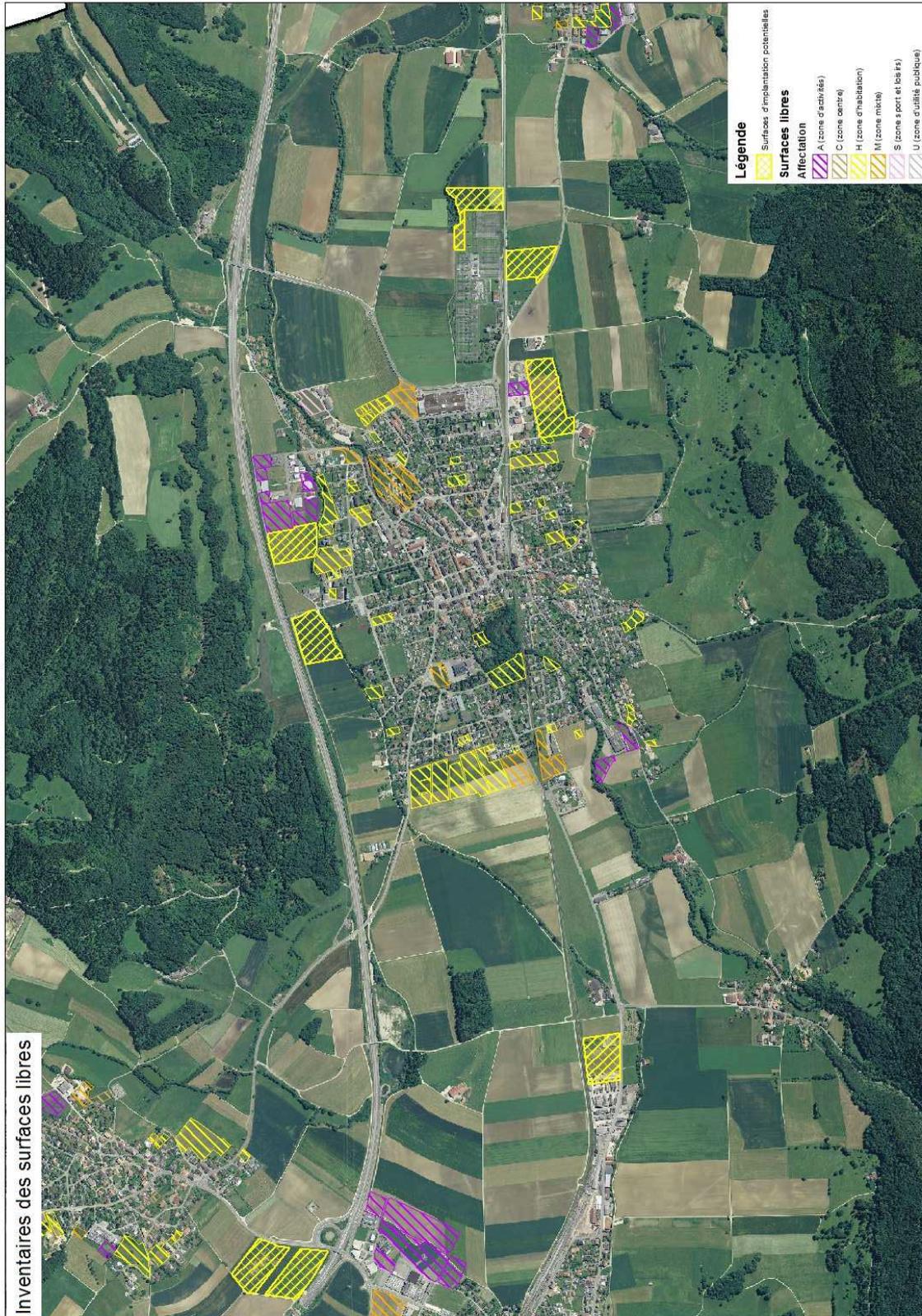


Figure 46 : Aperçu des surfaces constructibles libres dans l'espace central de la Haute-Sorne (état octobre 2012)

Parmi les 8 emplacements retenus et évalués (Figure 47), tous se situent par conséquent entièrement ou partiellement en zone agricole et représentent tous des surfaces d'assolement (SDA 1 ou 2).

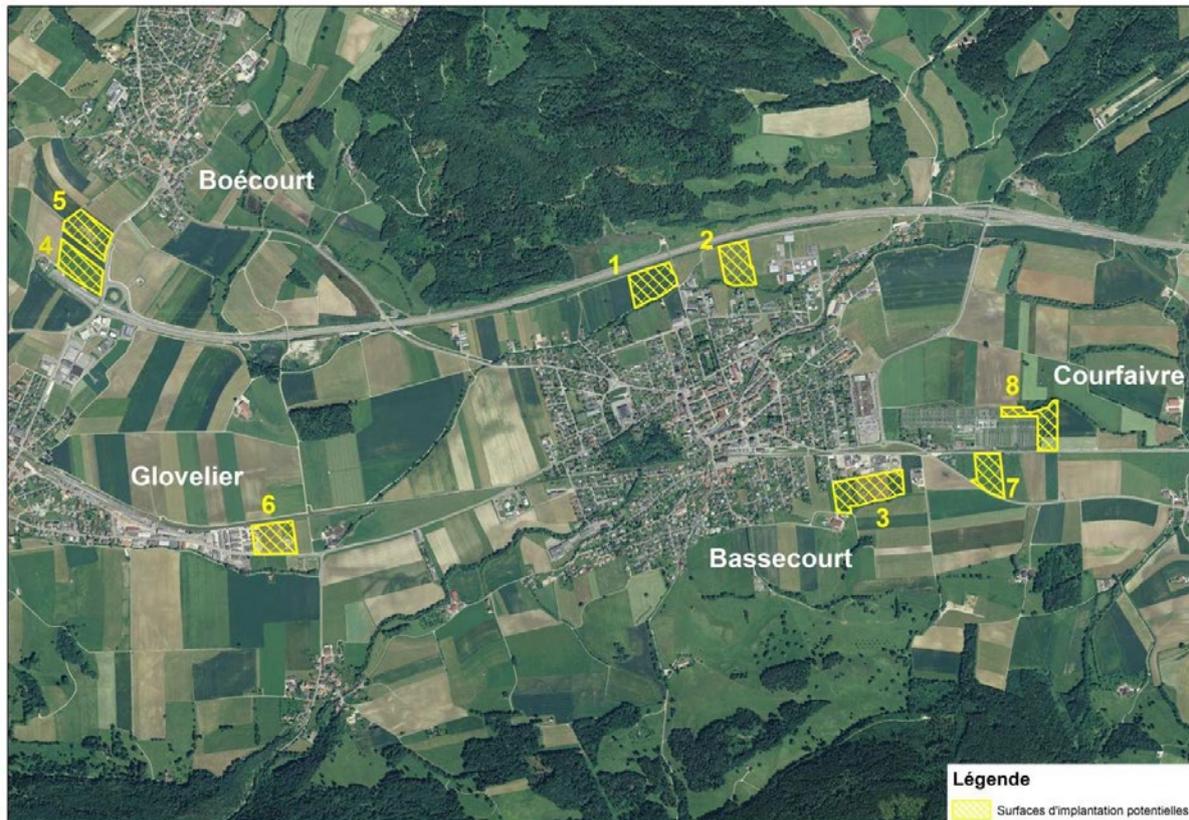


Figure 47 : Aperçu des 8 sites d'implantation potentiels en Haute-Sorne ayant fait l'objet d'une analyse multicritère suivant les concepts de l'aménagement du territoire

Le site retenu (n° 6) est celui représentant le plus faible impact sur la zone agricole, car il est le seul partiellement en zone d'activité et ce ne sont ainsi que 9'244 m² de SDA 2 qui sont impactés par ce projet contre environ 20'000 m² de SDA 2 ou de SDA 1 (sites n° 4 et 5) pour les autres emplacements évalués (Figure 48).

Le site retenu est de plus le plus favorable aussi bien en termes d'aménagement du territoire qu'en termes de géologie (distance suffisante aux zones de faille régionales) et d'impact sur l'environnement. C'est pour toutes ces raisons convergentes qu'il a finalement été retenu.

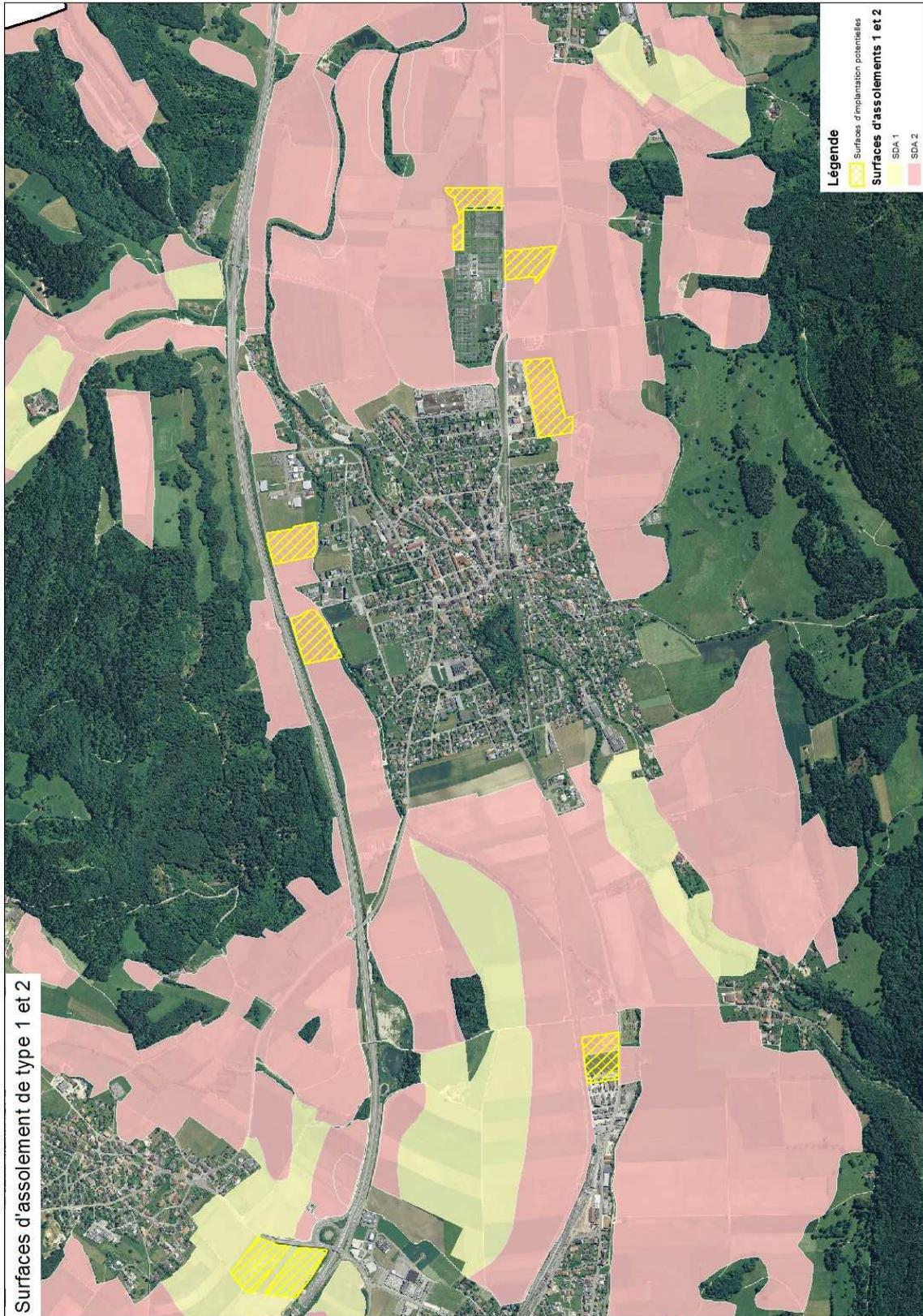


Figure 48 : Aperçu des surfaces d'assolement de type 1 et 2 dans l'espace central de la Haute-Savoie (état octobre 2012)

5.2 Extension de la zone à bâtir et retours à la zone agricole

5.2.1 Nouvelle affectation, parcelle 2137 et 2136

Le projet de géothermie nécessite une extension de la zone d'activité actuellement disponible à Glovelier. Le projet englobe les parcelles 2137 et 2136. La surface complémentaire nécessaire au projet est de 9240 m² (Figure 49 ci-dessous). Afin de permettre cette extension de la zone à bâtir, la commune de Haute-Sorne a identifié trois secteurs à retourner à la zone agricole sur son territoire communal. Ces trois restitutions sont situées dans la localité de Glovelier.



Figure 49 : Extension de la zone à bâtir

5.2.2 Tableau des parcelles et des surfaces

La commune de Haute-Sorne souhaite compenser l'extension de la zone d'activités destinée au projet de géothermie profonde par le retour de trois secteurs situés dans la localité de Glovelier et actuellement affectée à la zone HA.

Les parcelles concernées sont les suivantes :

N° parcelle	Surface totale (m ²)	Surface retournée à la zone agricole (m ²)
71	3'146	2'463
73	562	73
75	746	70
77	3'284	3'284
788	753	753
2035	1'876	1'876
2053	17'759	1'464
2185	1902	75
2234	10'418	161
Totaux	40'446	10'219
A restituer		9'240
Solde pour la Haute-Sorne		979

La compensation nécessaire est de 9'240 m².

Les restitutions envisagées dans la cohérence du bâti représentent 10'219 m²

- **Un solde positif de 979m² est donc à relever. Les autorités communales de Haute-Sorne se réservent le droit de disposer de ce solde pour tout autre projet nécessitant une restitution à la zone agricole.**

5.2.3 Localité de Glovelier, parcelles 71, 73, 75 et 77 + parcelles 788, 2035, 2185, 2234

Les parcelles sont actuellement affectées à la zone HA. Ces parcelles sont en partie dans des secteurs soumis aux dangers de crues (moyens et résiduels) et dans un périmètre de protection de la nature (PNa).

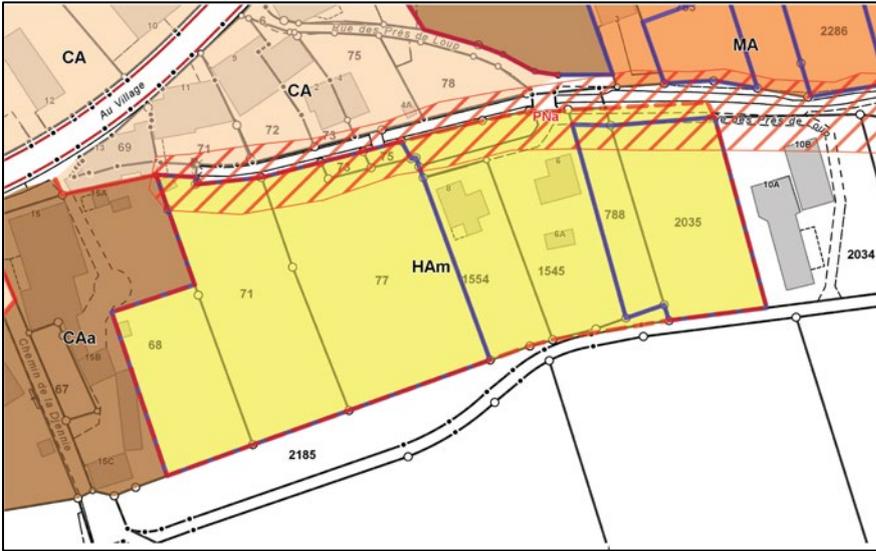


Figure 50 : Affectation actuelle, source géoportail RCJU



Figure 51 : Projet de retour à la zone agricole

5.2.4 Localité de Glovelier, parcelle 2053

Cette parcelle est actuellement affectée à la zone HA. Le propriétaire ne souhaite pas construire dans les 15 prochaines années.

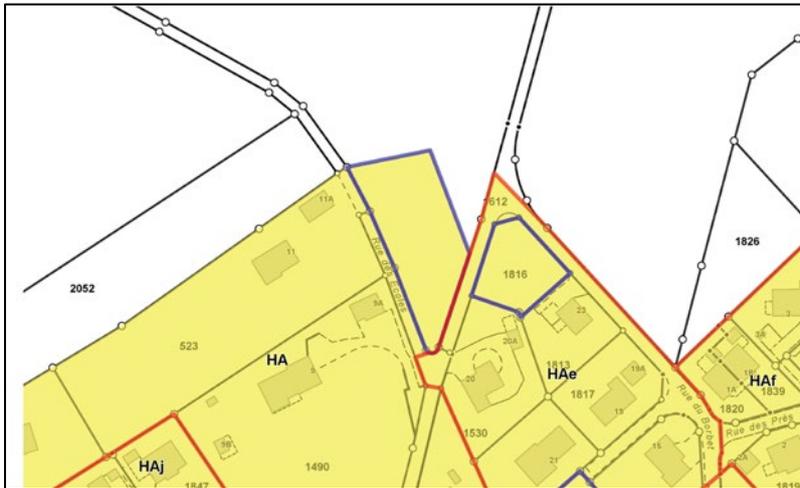
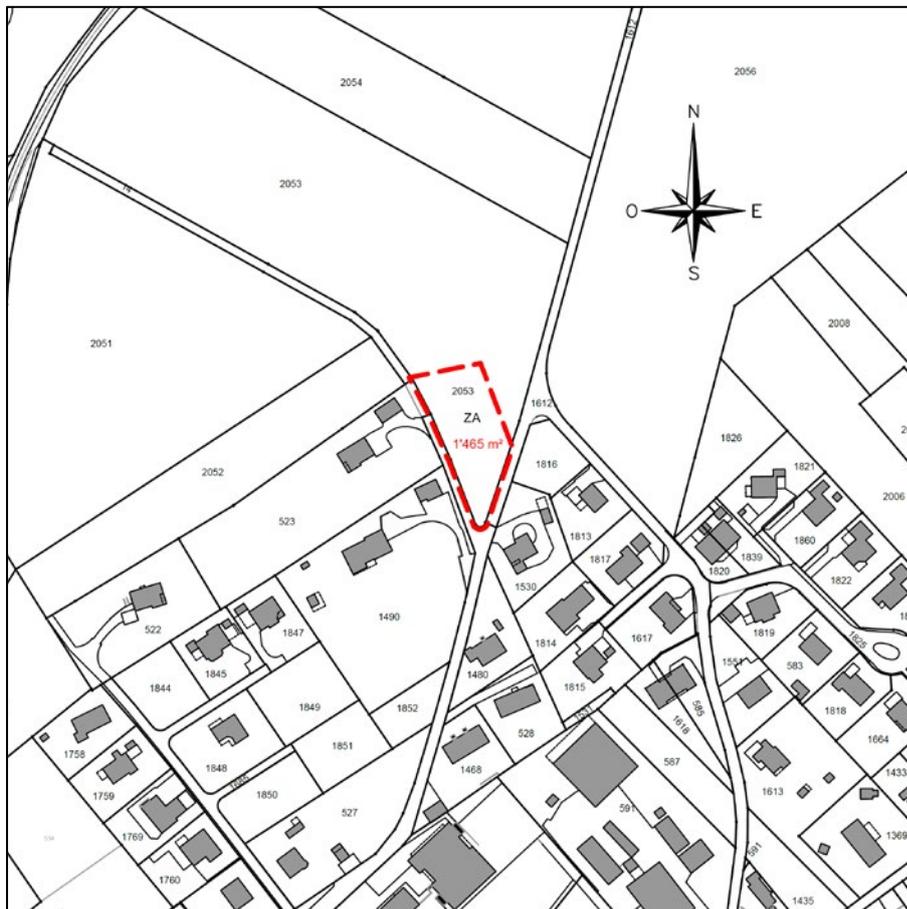


Figure 52 : Affectation actuelle, source géoportail RCJU



5.2.5 Compensation des surfaces d'assolement

La surface de 1465 m² de la parcelle 2053 retournée à la zone agricole peut faire l'objet d'une intégration aux surfaces d'assolement. Cela n'est pas le cas des autres parcelles (71, 73, 75, 77 et 788, 2035, 2185, 2234).

7 Budget

Au prix actuels du marché, la réalisation du premier forage profond est estimée à environ **35 millions de francs**.

Le budget du projet global atteint d'après les prévisions actuelles à **80 à 100 millions de francs**.

8 Bibliographie

Abdelfettah Y. (2013) : Étude gravimétrique pour détecter la présence de fossés permocarbonifères sur le site d'investigation géothermique de Haute-Sorne. Rapport Final pour Geo-Energie Suisse, Rapport CREGE 13-12, 39 pp.

Abdelfettah, Y. & Schill (2013): Exploration of geothermally relevant structures in the crystalline basement of Switzerland using gravity constrained by seismic data. Proceedings of the European Geothermal Congress 2013 Pisa, Italy, 3-7 June 2013.

Baisch, S., Carbon, D., Dannwolf, U., Delacou, B., Devaux, M., Dunand, F., Jung, R., Koller, M., Martin, C., Sartori, M., Secanell, R., and R. Vörös, 2009. Deep Heat Mining Basel - Seismic Risk Analysis. SERIANEX study prepared for the Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt des Kantons Basel-Stadt, Amt für Umwelt und Energie, <http://www.wsu.bs.ch/geothermie>, 553 pages.

Bichet, V. & Campy, M. (2008): Montagnes du Jura - Géologie et paysages. Néo-Edition, Besançon, 29.08.2008, p. 303.

Bossart, P. and Wermeille, S. (2003): The Stress Field in the Mont Terri Region – Data Compilation. Report of the FOWG, Geology Series, N°4 (Switzerland), p. 65-92.

Burkhard, M. & Grünthal, G. (2009): Seismic source zone characterization for the seismic hazard assessment project PEGASOS by the Expert Group 2 (EG 1b). - Swiss J. Geosci. 102/ 1, p. 149-188.

Butterworth, S. (1930): On the theory of filter amplifiers. Wireless Engineering, 1: 536-541.

Federal Office of Topography swisstopo (2008): Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. Rapports du Service géologique national. Paul Bossart & Marc Thury, N°3, Swiss Geological Survey, Wabern, 2008, p. 194.

Geo Explorers (2013): Geologischer Bericht. Standort Haute-Sorne. Rapport pour Geo-Energie Suisse SA.

Häring, M., Schanz, U., Ladner, F., & Dyer, B. (2008). Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system. Geothermics, S. 469-495.

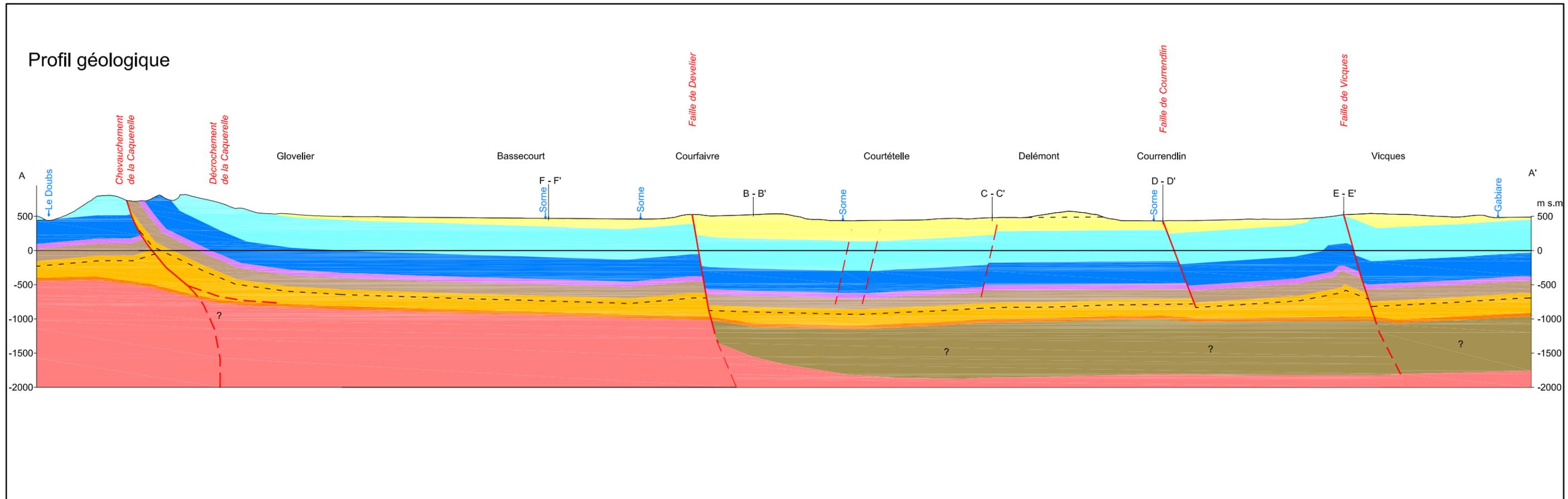
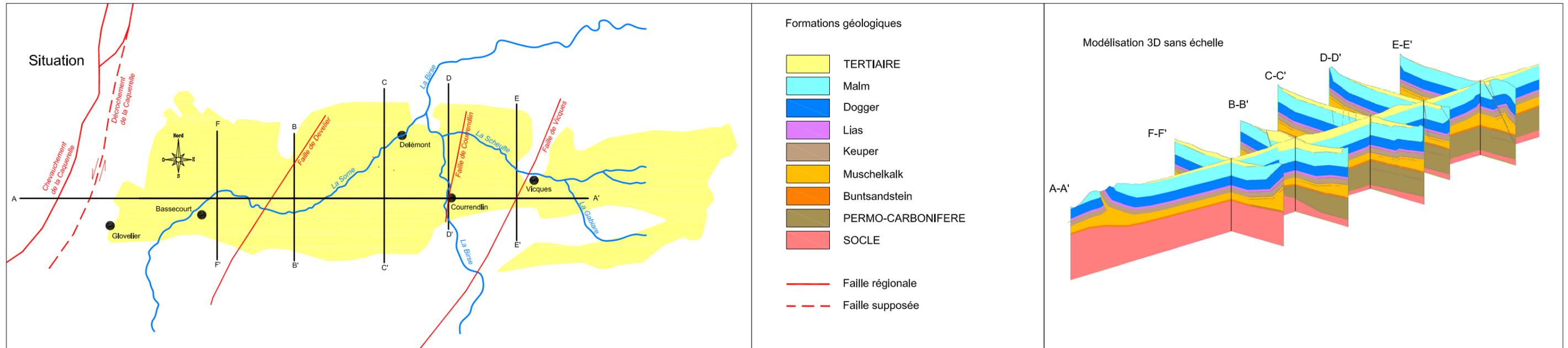
Jordan, P (2008): Nagra NAB 08-43

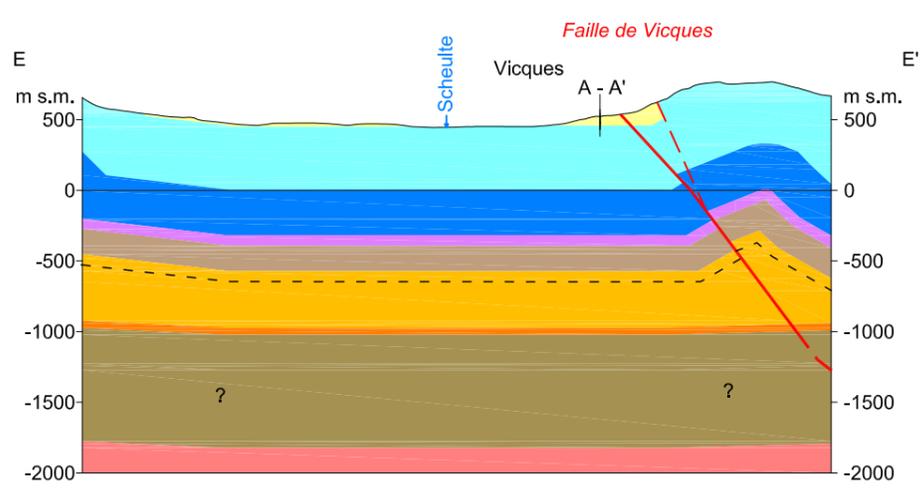
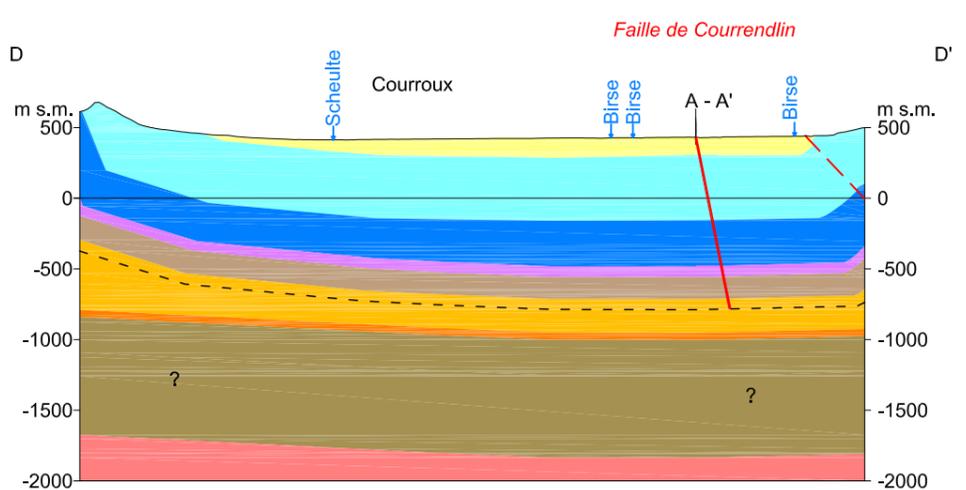
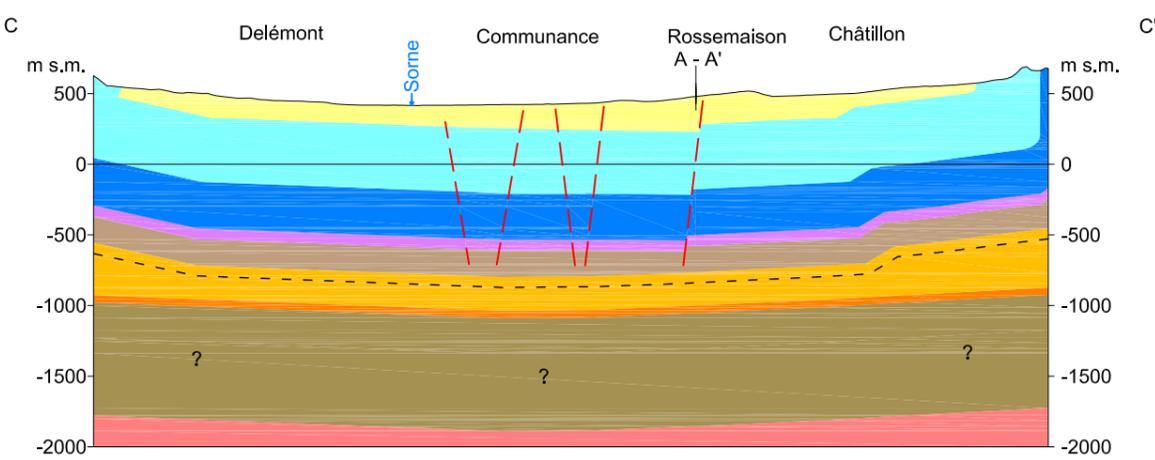
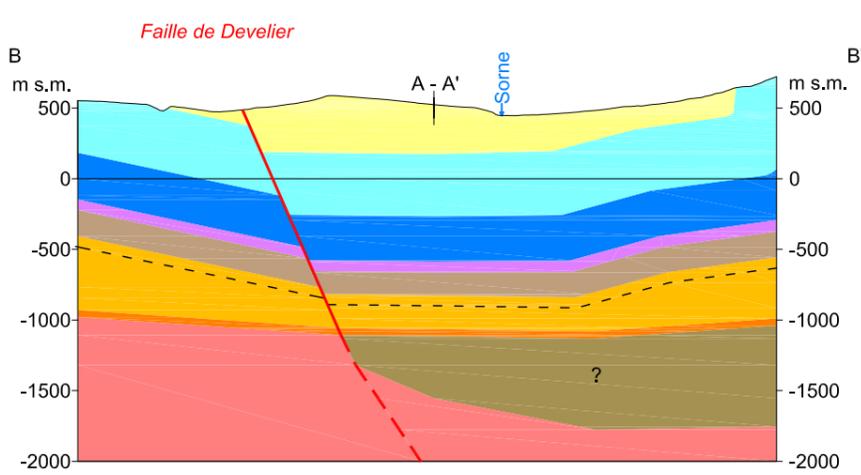
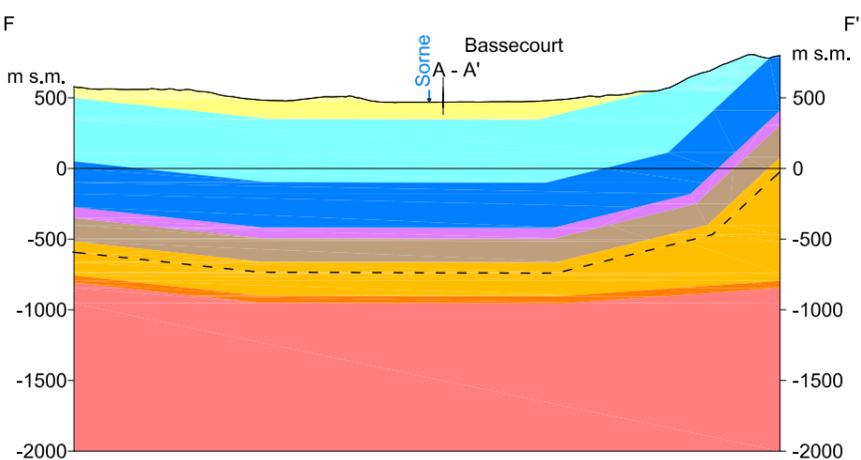
Kastrup, U., Zoback, M.L., Deichmann, N., Evans, K.F., Giardini, D. & Michael, A.J. (2004): Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine foreland derived from inversion of fault plane solutions. Journal of Geo- physical Research 109, B01402, doi:10.1029/2003JB002550.

Laubscher, H. (1948): Geologie de Gebietes von Siegfriedblatt St-Ursanne (Berner Jura). Matériaux carte géologique de la Suisse, 92.Lief, p. 49.

- Laubscher, H. (2008): The Grenchenberg conundrum in the Swiss Jura: a case for the centenary of the thin-skin décollement nappe model (Buxtorf 1907). *Swiss J. Geosci.* 101/1, p. 41-60.
- Liniger, H. (1925): *Geologie des Delsbergerbeckens und der Umgebung von Movelier*. Matériaux carte géologique de la Suisse, 55. Lief, Berne, 1925, p. 71.
- Madritsch, H., Kounov, A., Schmid, S. M. & Fabbri, O. (2009): Multiple fault reactivations within the intra-continental Rhine–Bresse Transfer Zone (La Serre Horst, eastern France), *Tectonophysics* 471, 297–318, DOI:10.1016/j.tecto.2009.02.044
- Marchant, D., Ringgenberg, Y., Stampfli, G., Birkhäuser, P., Roth, P. & Meier, B. (2005): Paleotectonic evolution of the Zürcher Weinland (northern Switzerland), based on 2D and 3D seismic data. *Eclogae geol. Helv.* 98/3, 345–362.
- Meury Flury Rieben SA (1991): Recherche d'eau par forages dans l'aquifère profond du Malm au Sud-Ouest de la ville. Résultats de la phase d'exploration. Rapport hydrogéologique.. Services Industriels Delémont, Delémont, 095, 02.05.91, p. 18.
- MFR Géologie-Géotechnique SA (1993): Exploitation du gisement géothermique du bassin de Delémont. Etude préliminaire de faisabilité. Services Industriels Delémont, Delémont, 135, 30.09.93, p. 36.
- Nussbaum, C., Bossart, P., Amann, F. et Aubourg, C. (2011): Analysis of tectonic structures and excavation induced fractures in the Opalinus Clay, Mont Terri underground rock laboratory (Switzerland). *Swiss J. Geosci.* 104/2, p. 187-210.
- Olivier R., Dumont B. & Klingele E. (2010): Atlas gravimétrique de la Suisse. Commission Suisse de Géophysique, N. 43, ISSN 0253-1186.
- Pfiffner (2009): *Geologie der Alpen*. Haupt / TTB Fig 5.2.3
- Schmid, S. M. & Slejko, D. (2009): Seismic source characterization of the Alpine foreland in the context of a probabilistic seismic hazard analysis by PEGASOS Expert Group 1 (EG1a), *Swiss J. Geosci.* 102, 121–148, DOI 10.1007/s00015-008-1300-2.
- Schmidt, C., Braun, L., Paltzer, G., Mühleberg, M., Christ, P., Jacob, F. (1924): Die Bohrungen von Buix bei Pruntrut und Allschwil bei Basel. *Beitr. z. Geol. Schweiz, Geoth.*, X. Lief., Zürich, 1924, p. 74.
- Suter, M. (1978): Geologische Interpretation eines reflexionsseismischen W-E-Profiles durch das Delsberger Becken (Faltenjura). *Eclogae Geol. Helv.*, Basel, 07.1978, p. 267-275.
- Ustaszewski, K.M. (2004): Reactivation of pre-existing crustal discontinuities: the southern Upper Rhine Graben and the northern Jura Mountains - a natural laboratory. PhD Thesis. Naturw. Fak. Univ. Basel, p. 145.

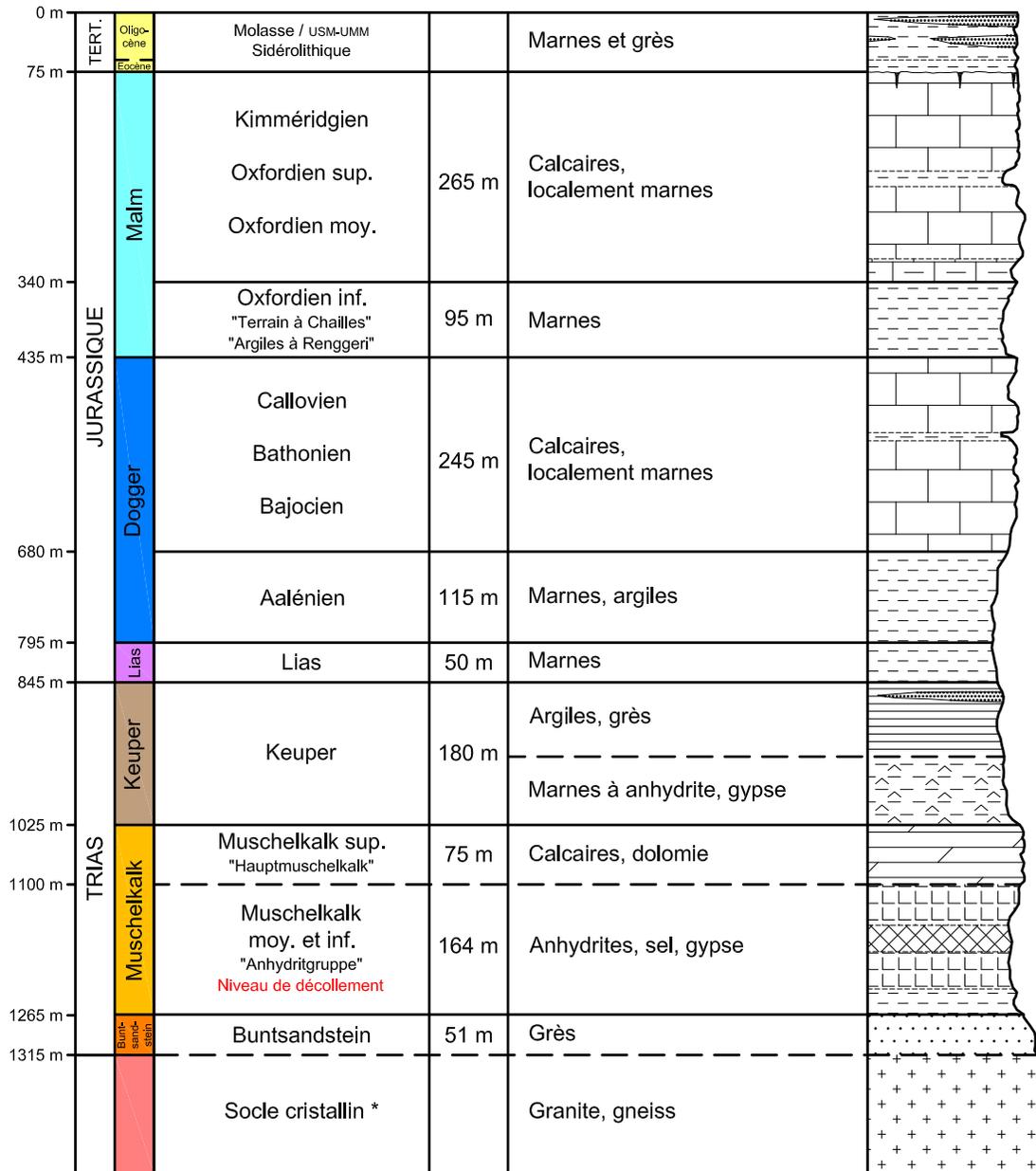
Valley, B. & Evans, K.E. (2009): Stress orientation to 5 km depth in the basement below Basel (Switzerland) from borehole failure analysis. *Swiss J. Geosci.* 102/3, p. 467-480.





HAUTE-SORNE

Profil de forage prévisionnel



LEGENDE

- Calcaire
- Calcaire marneux
- Marne
- Argillite (schistes argileux)
- Calcaire dolomitique
- Grès
- Gypse, anhydrite
- Sel
- Granite, gneiss

* le socle cristallin peut contenir des sédiments d'âge permo-carbonifère d'épaisseur inconnue

