

3



VULCAN ENERGY
ZERO CARBON LITHIUM™



Demande d'octroi d'un Permis Exclusif de Recherches de mines de Lithium et toutes autres substances connexes dit « Kachelhoffa minéral »

3.

Mémoire technique et justification des limites

Rédaction du document

Document	Date	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
1_VEF_PERL_KACHELHOFFA_MEMOIRE	27/02/2023	Alexandre RICHARD Coralie AICHHOLZER	Vincent LEDOUX PEDAILLES	Vincent LEDOUX PEDAILLES

Diffusion du document

Date	Destinataire	Organisme	Version numérique	Version papier
27/02/2023	Jean-Raymond PHILIPOT Cécile CARON	Direction Générale de l'Aménagement et du Logement et de la Nature	1	1
27/02/2023	Contact générique	Préfecture du Bas-Rhin	1	1
27/02/2023	Marc LITZENBURGER Émilie JACQUOT	Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement	1	1

Vulcan Énergie France S.A.S.

84 route de Strasbourg

67500 Haguenau

info@v-er.eu

Table des matières

1	Préambule	15
2	Contexte du développement	17
2.1	Objectif de production de chaleur décarbonée	17
2.1	Les besoins et dépendances en Lithium.....	20
3	Situation des permis de recherches dans le périmètre sollicité	27
3.1	Permis Exclusif de Recherches de minéraux et métaux.....	30
3.2	Concession d'exploitation de minéraux et métaux.....	30
3.3	Permis Exclusif de Recherches de gîtes géothermiques	30
3.4	Concessions d'exploitation de géothermie profonde.....	30
3.5	Permis Exclusif de Recherches d'hydrocarbures liquides ou gazeux.....	30
3.6	Concessions d'exploitation d'hydrocarbures liquides ou gazeux	30
3.7	Permis Exclusif de Recherches de stockage souterrain	30
3.8	Concessions de stockage souterrain	30
4	Le réservoir du Fossé Rhénan Supérieur	33
4.1	Géologie et structure globale.....	33
4.2	Caractéristique de réservoir géothermique	45
4.1	Roche mère du lithium géothermal.....	56
4.1.1	Source granitique	57
4.1.2	Source triasique.....	58
5	Justification de l'emprise sollicitée	61
5.1	Connaissances géologiques et structurales	61
5.1.1	Géologie du permis sollicité.....	61
5.1.2	Les horizons géologiques ciblés.....	72
5.2	Données de puits	87
5.3	Connaissances géophysiques	89
6	Impacts socio-économiques.....	99
6.1	Impact sociétal	99
6.1.1	Acceptabilité	99
6.1.2	Gouvernance.....	104
6.2	Impact économique	104
6.2.1	La filière lithium.....	104
6.2.2	Dépenses, emplois et décarbonation	106
6.2.3	Substances connexes	111
7	Durée d'exclusivité sollicitée	115
8	Bibliographie	117

Table des illustrations

Figure 1 : Liste des projets allemands et européens dans lesquels le Groupe Vulcan participe activement.	16
Figure 2 : Consommation totale (hors perte) de gaz naturel par secteur en France.	17
Figure 3 : Pays d'origine des importations de gaz naturel en France. (Source : Commissariat général au développement durable, Service des données et études statistiques)	18
Figure 4 : Historique de production d'énergie fossile en Norvège depuis 2010 et projection jusqu'en 2030.	18
Figure 5 : Contexte de la dépendance énergétique allemande au gaz russe et apport de la géothermie pour la décarbonation de la filière chaleur. (Source : Vulcan Energie Ressourcen)	19
Figure 6 : Bilan et projection des productions d'énergie renouvelable par filière et mise en regard avec les objectifs PPE 1/2. (Source : ADEME, Synthèses des propositions de l'ADEME pour la PPE : Les filières EnR en action)	20
Figure 7 : Chaîne de valeur et déficit commercial français sur la filière Électronique.	21
Figure 8 : (en haut) Usages mondiaux du lithium en 2008 et en 2018 (Source : MinéralInfo, BRGM) et (en bas) en 2020 (Source : Institut Français du Pétrole et Énergies Nouvelles)	22
Figure 9 : Évolution et prévision de la demande mondiale en lithium d'ici 2030 (exprimée en tLCE).	23
Figure 10 : Évolution de la demande mondiale en lithium d'ici 2030 au regard de la production de lithium (Source : S&P Global Platts, Benchmark Mineral Intelligence & Fastmarkets, 2020).....	23
Figure 11 : (à gauche) Nombre d'immatriculations de voitures 100% électriques par en France, (à droite) part des véhicules 100% électrique dans le parc automobile dans une sélection mondiale de pays. (Source : Statista).....	23
Figure 12 : Évolution de la demande mondiale en batterie pour l'électromobilité et le stockage stationnaire (exprimé en Gwh). (Source : European Technology and Innovation Platform on Batteries – Batteries Europe, « Strategic Research Agenda for batteries », 4 décembre 2020, page 11).....	24
Figure 13 : Carte de l'Europe présentant des zones à fort potentiel en termes de concentration en Lithium dans des saumures géothermales. (Source : (Sanjuan et al. 2020)).	25
Figure 14 : Carte représentant l'état d'avancement des projets d'extraction de lithium de qualité batterie en Europe.	25
Figure 15 : Carte de la localisation de l'emprise sollicitée dans le cadre de la demande de Permis Exclusif de Recherches de mines de Lithium.....	27
Figure 16 : EPCI concernés par l'emprise du permis Exclusif de Recherches sollicité.	28
Figure 17 : Communes concernées par l'emprise du permis Exclusif de Recherches sollicité.....	28
Figure 18 : Cartes des concessions de stockage souterrain.	31
Figure 19 : Structuration géologique du Fossé Rhénan Supérieur (en haut à gauche) (Source : (Dezayes et al. 2007)) avec la carte globale des différentes zones de la chaîne Varisque en Europe (en haut à droite) (Ballèvre et al 2009), et schéma simplifié des structures majeurs du Fossé Rhénan Supérieur (en bas) (Source : E. Oliot, laboratoire Géosciences, université de Montpellier, 2018, « De la roche aux modèles : que peuvent nous apprendre les pierres dans les chaînes de montagnes ? »).	34
Figure 20 : Extrait de la figure présentant les profils thermiques de Rittershoffen, Cronenbourg et Bâle (respectivement du nord au sud) associés à la géologie et aux zones de fractures perméables dans les puits géothermiques du centre et du sud de l'URG (Source : Vidal et Genter, 2018).	35
Figure 21 : Coupe schématique comparative entre la pile sédimentaire au droit du projet de Rittershoffen (à gauche) et au droit du projet d'Illkirch-Graffenstaden (à droite). (Source : (Glaas 2021))	36
Figure 22 : A (en haut à gauche) - Carte de l'épaisseur totale des sédiments tertiaires dans le Fossé Rhénan Supérieur d'après les données de forages et de sismique ((Doembl 1967) redessiné par J-B.	

Edel), B (en bas) – coupe Nord – Sud schématique à travers les sédiments cénozoïques du Fossé Rhénan Supérieur par unités stratigraphiques majeures, montrant le profil longitudinal du graben et l'influence des zones de failles varisques sur la disposition et le remplissage différentiel des bassins principaux (par (Roussé 2006) compilé d'après (Sittler 1992); (Sissingh 1998); (Schumacher 2002))	36
Figure 23 : Position des puits (représenté par une tour de rig) MUM-1, MAM-1 et SCR-101 par rapport au périmètre sollicité (encadré en bleu sur la figure ; source : Aichholzer 2019).....	37
Figure 24 : Tableau stratigraphique du Keuper au Muschelkalk (Trias) avec les épaisseurs observées entre le nord (Rittershoffen) et le sud (Sainte-Croix-en-plaine) du Fossé Rhénan Supérieur (Source : Düringer et al 2019).	39
Figure 25 : Tableau stratigraphique du Jurassique supérieur à inférieur avec les épaisseurs observées entre le nord (Rittershoffen) et le sud (Sainte-Croix-en-plaine) du Fossé Rhénan Supérieur (Source : Aichholzer 2019).	41
Figure 26 : La série Jurassique d'Alsace (Rauscher et Schmitt, 1990).	42
Figure 27 : Tableau stratigraphique du remplissage sédimentaire paléogène du Fossé Rhénan Supérieur du nord au sud du fossé (Source : Aichholzer et al 2021).	44
Figure 28 : Conglomérat de bordure du Fossé Rhénan, processus de progradation érosive et de rétrogradation des cônes de déjection provoqués par l'alternance de phases climatiques arides et humides (Source : Düringer 1988).....	44
Figure 29 : Pancarte à l'emplacement du premier forage mécanique effectué sur le champ pétrolifère dit de « Pechelbronn » (à gauche), Conrad Schlumberger et son frère réalisant les premiers essais d'acquisition de données géophysique par méthodes électriques (à droite) (Source : Musée du Pétrole de Merckwiller-Pechelbronn).....	45
Figure 30 : Carte des isothermes à la profondeur de 400 m, dans la région N du champ de Pechelbronn (Source : (Haas & Hoffmann 1929) ; révisée en 1938).....	46
Figure 31 : Principe du modèle de géothermie profonde dit Hot Dry Rock (HDR) (Source : The Open University).....	46
Figure 32 : Évolution des modèles d'exploitation des gisements hydrothermaux de l'HDR à l'EGS (Source : Genter 2021, d'après S. Wiemer, 2018).....	47
Figure 33 : Correspondance entre le développement des projets géothermiques du Fossé Rhénan et l'évolution du concept d'exploitation de la ressource géothermique (Source : Glaas 2021).....	47
Figure 34 : Localisation des puits géothermiques pour lesquels une mesure de la concentration en lithium a été effectuée. (Source : Banque du Sous-Sol, (Sanjuan et al. 2016), (Pauwels et al. 1993), (Aquilina et al. 1997), (Bosia et al. 2021), (Dezayes et al. 2013), (Mundhenk et al. 2013)).....	48
Figure 35 : Mesure de concentration en lithium sur les sites géothermiques allemand (Source : (Watzel 2022), Geothermal Information System GeotIS, (Agemar et al. 2014), (Sanjuan et al. 2016))	49
Figure 36: Suivi géochimique des saumures géothermales des projets de Soultz-sous-Forêts et de Rittershoffen.	49
Figure 37: Modèle descriptif (en haut) et modélisé (en bas) de circulation hydrogéologique des saumures à l'échelle du Fossé Rhénan (Source : (Stober & Bucher 2015) et (Freymark et al. 2019)).	50
Figure 38 : Types et répartitions spatiales au sein des puits des diagraphies réalisées sur les projets géothermiques profonds d'Électricité de Strasbourg (Source : (Glaas 2021)).....	51
Figure 39 : Schéma illustratif de la circulation hydrothermale profonde des saumures au sein des failles et des couches triasiques (Source : Haffen 2012).	52
Figure 40 : Schéma conceptuel de la circulation des saumures géothermales dans un contexte de blocs synthétiques résultant de l'accommodation de la flexure du graben (Source : (Bossennec et al. 2021)).	52

Figure 41 : (à gauche) Calcul du champ de température relatif dans un maillage de 10 x 5 km faisant apparaître des boucles de convection dans un modèle à couches géologiques homogènes (Source : (Magenet et al. 2014)), (à droite) et correspondance entre des profils thermiques provenant des modélisations THM et les profils de températures observées dans les puits profonds de Soultz-Sous-Forêts et Rittershoffen dans (Vallier et al. 2020)).	53
Figure 42 : Prise en compte d'une faille majeure de pendage 45° dans les modélisations numériques du champ de température au droit du projet de Rittershoffen (Source : (Vallier et al. 2020)).	53
Figure 43 : Profils de températures pour 6 puits de Soultz-Sous-Forêts (Source : Maurer et al. 2018).	54
Figure 44 : Carte présentant la position de 2 puits de Soultz-Sous-Forêts présentant une variabilité de plus de 10% du gradient thermique et mise en correspondance avec les données structurales de la zone (Source : GeORG, (Richard et al. 2019), (Maurer et al. 2018)).	54
Figure 45 : Localisation des 7 forages de gradient réalisés par Électricité de Strasbourg en Alsace du Nord (Source : (Maurer et al. 2018)).	55
Figure 46 : Profils de températures de 7 forages de gradient sur les 200 premiers mètres et leurs extrapolations jusqu'à la cible géothermale (Source : (Maurer et al. 2018)).	55
Figure 47 : Carte de la localisation des projets géothermiques du Fossé Rhénan Supérieur comprenant : coupe géologique, profil de température, zones perméables et concentration en lithium. (Source : modifié d'après (Vidal & Genter 2018)).	56
Figure 48 : Éléments traces au sein de granites muscovite-biotite (a et b) et de monzonite (c). (Source : Drüppel et al., 2020)	58
Figure 49 : Comparaison des concentrations des éléments de dissolution entre des saumures géothermales et des eaux de laboratoires provenant uniquement de processus de dissolution à forte température. (Source : (Drüppel et al. 2020))	58
Figure 50 : Composition chimique des fluides géothermaux du Trias français. (Source : (H. Pauwels 1991))	59
Figure 51 : Composition de la phase micacée en fonction de la granulométrie d'une psammite. (Source : Mosser et al., 1972)	59
Figure 52 : Concentration en éléments chimiques présents dans les illites en fonction du faciès gréseux, dolomitique ou argileux. (Source : (Mosser et al. 1972))	60
Figure 53 : Composition minéralogique du Muschelkalk et du Buntsandstein au droit du projet de Soultz-sous-Forêts (puits EPS1). (Source : (Heap et al. 2019))	60
Figure 54 : Carte géologique simplifiée et situation du PER dit "Kachelhoffa minéral" (Source : BRGM).	61
Figure 55 : Carte structurale du périmètre sollicité. (Source : GeORG)	62
Figure 56 : Puits extrait de GeORG démontrant la variabilité importante des formations du tertiaire (Source : GeORG).	63
Figure 57 : Localisation du PER sollicité, des puits étudiés dans ce paragraphe : SCR-101, BLO-1, WIT-1, SCG-2 et ILF-1 ainsi que la position des diapirs de sel (Source : Wanesson, 1998).	63
Figure 58 : Coupes transversales dans le bassin potassique de Mulhouse (Source : Courtot et al 1972).	64
Figure 59 : Localisation des coupes transversales A et B (figure 39) par rapport au périmètre sollicité (Source : Courtot et al 1972).	64
Figure 60 : Localisation des diapirs de sel selon les différentes études (Source : Wanesson, 1998 et Lutz 1999).	65
Figure 61 : Localisation des puits ainsi que la superficie et l'épaisseur du niveau appelé Sel inférieur (Source : Wanesson, 1998).	67
Figure 62 : Localisation des puits ainsi que la superficie et l'épaisseur du niveau appelé Sel moyen (Source : Wanesson, 1998).	67

Figure 63 : Localisation des puits ainsi que la superficie et l'épaisseur du niveau appelé Sel supérieur (Source : Wanesson, 1998).....	67
Figure 64 : Remplissage sédimentaire évaporitique du Bassin de Mulhouse et dans le Fossé de Dannemarie (Source : Blanc-Valleron et al., 1991).....	68
Figure 65 : Localisation du PER dit “Kachelhoffa minéral” superposé à la carte hypogéologique (Source : Edel et al 2018).	71
Figure 66 : Focus sur la stratigraphie du Jurassique au Permien au droit du forage GCR-1 afin de visualiser les formations sédimentaires cibles aux projets de géothermie profonde (projet géothermique de Cronenbourg) – Jurassique, Trias supérieur (Keuper), Trias moyen (Muschelkalk), Trias inférieur (Buntsandstein), Permien (Source : Aichholzer 2019).....	72
Figure 67 : Formations sédimentaires du Bajocien dans le Fossé Rhénan Supérieur (Source : Ménillet et al 2019).....	73
Figure 68 : Carte présentant la profondeur du toit de la Grande Oolithe (Source : GeORG).	74
Figure 69 : Carte de l'épaisseur de la Grande Oolithe (Source : GeORG).	74
Figure 70 : Porosité minimales et maximales (en haut à gauche) et moyennes (en bas à gauche) de la Grande Oolithe, ainsi que son diagramme en boîtes à moustache (Source : GeORG).	75
Figure 71 : Température au toit de la Grande Oolithe (Source : GeORG) au niveau du périmètre sollicité.....	75
Figure 72 : Perméabilités minimales et maximales (en haut à gauche), moyennes (en bas à gauche) de la Grande Oolithe, ainsi que son diagramme en boîtes à moustache (Source : GeORG).....	76
Figure 73 : Carte présentant la profondeur du toit du Muschelkalk (Source : GeORG).....	77
Figure 74 : Carte de l'épaisseur du Muschelkalk Supérieur (Source : GeoRG).....	78
Figure 75 : Coupe lithostratigraphique des calcaires du Muschelkalk formant le principal aquifère de cet horizon géologique (Source : Atlas hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse).	79
Figure 76 : Porosité moyennes du Muschelkalk supérieur (A) et du Muschelkalk inférieur et moyen (C), ainsi que les perméabilités moyennes du Muschelkalk supérieur (B) et du Muschelkalk inférieur et moyen (D) (Source : GeORG).	79
Figure 77 : Température au toit du Muschelkalk (Source : GeORG) au niveau du périmètre sollicité.	80
Figure 78 : Coupe lithostratigraphique des couches permo-triasiques (Source : Atlas hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse).	81
Figure 79 : Carte présentant la profondeur du toit des couches permo-triasiques (Source : GeORG).	81
Figure 80 : Carte de l'épaisseur des couches permo-triasiques (Source : GeoRG).....	82
Figure 81 : Porosités moyennes (A) et perméabilités moyennes (B) du Buntsandstein (Source : GeORG).....	82
Figure 82 : Température au toit du Buntsandstein (Source : GeORG) au niveau du périmètre sollicité.	83
Figure 83 : Température au toit des couches stéphano-permiennes (Source : GeORG) au niveau du périmètre sollicité.....	84
Figure 84 : Coupe lithostratigraphique du Paléozoïque du socle du massif Vosgien (Source : Atlas hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse).	85
Figure 85 : Porosités moyennes (A) et perméabilités moyennes (B) du socle hercynien (Source : GeORG).....	85
Figure 86 : Carte présentant la profondeur du toit du socle hercynien (Source : GeORG).	85
Figure 87 : Température au toit du socle hercynien (Source : GeORG) au niveau du périmètre sollicité.	86
Figure 88 : Carte de la température estimée au toit du socle versus la nature du socle.	86

Figure 89 : Carte des puits profonds présents dans le PER dit “Kachelhoffa minéral” (Source : BRGM).	87
Figure 90 Température mesurée ou calculée dans les puits pétroliers (Source : BRGM).	89
Figure 91 : Carte présentant la position des lignes sismiques vintages 2D dans le périmètre sollicité.	90
Figure 92 : Carte présentant la position des lignes sismiques vintages 2D utilisées pour la construction du modèle de GeORG.	90
Figure 93 : Carte de la localisation des failles au toit du Buntsandstein (Source : GeORG).....	91
Figure 94 : Carte de la profondeur du toit du Buntsandstein (Source : Dezayes et al 2007) avec la représentation des failles majeures (en noir) présent à cet horizon.....	91
Figure 95 : Profil sismique A à B composite à travers le bassin de Mulhouse et la localisation de la ligne par rapport au périmètre du PER (Source : Wannesson 1998).....	92
Figure 96 : Une partie de la coupe sismique 87SEL9 montrant le dôme de sel en remontée affectant ainsi la formation d'âge Tertiaire (en jaune) et Quaternaire (en bleu) (Source : Bouiflane, 2008)....	93
Figure 97 : Interprétation de lignes sismiques à différents endroits du PER du "Kachelhoffa" (Source : GeORG).	93
Figure 98 : Localisation des lignes interprétées A, B et C ainsi que la localisation des diapirs de sel (Source : GeORG et Wanesson, 1998).....	94
Figure 99 : Tenseur de vitesse de déformation concernant le Fossé Rhénan Supérieur (Henrion et al 2020).....	95
Figure 100 : Activité néotectonique dans le Fossé Rhénan Supérieur (Illies et al., 1979).	95
Figure 101 : Carte de la cinématique actuelle du Fossé Rhénan Supérieur (Source : Lopes et Behrmann, 2006).	96
Figure 102 : Température estimée à 2 500 m de profondeur (Source : GeORG).....	97
Figure 103 : Ouverture d'un bureau d'accueil dans les villes accueillant un projet de production d'énergie renouvelable et de lithium géothermal.	99
Figure 104 : Réunion publique d'échanges autour du projet de Vulcan Energie Ressourcen en Allemagne.	100
Figure 105 : Présentation des équipements d'acquisition de sismique réflexion 3D dans le cadre du programme exploratoire.	101
Figure 106 : Participation aux congrès géothermiques et lithium afin de présenter les travaux du Groupe Vulcan au reste de la communauté industrielle et académique.....	101
Figure 107 : Ouverture de la centrale géothermique d'Insheim aux élèves, aux élus, aux associations et à nos partenaires industriels afin de promouvoir la filière géothermique et lithium offrant de nombreuses opportunités.....	102
Figure 108 : Perception des risques pour les personnes informées (n=268) sur les projets de géothermie profonde. Question posée : Selon vous, l'exploitation d'une centrale géothermique peut générer... (Source : (Chavot et al. 2019)).....	103
Figure 109 : Variation de la confiance des personnes questionnées (n=221) concernant la provenance d'une information. Question posée : En qui avez-vous le plus confiance pour vous informer concernant les aspects techniques de la géothermie profonde ? (Source : (Chavot et al. 2019))...	103
Figure 110 : Exemple de réflexion autour d'un montage de sociétés de production d'EnR. (Source : (Anon 2017)).....	104
Figure 111 : Description des phases et des coûts de développement prévus pour le projet Outre-Rhin de Vulcan Energie Ressourcen GmbH.....	105
Figure 112 : Répartition des coûts d'un projet de géothermie profonde et localisation des dépenses. Cas de la centrale géothermique de Rittershoffen. (Source : (Dalmais et al. 2022))	106
Figure 113 : Part des emplois directs et indirects d'un projet de géothermie profonde dans le cas de la centrale géothermique de Rittershoffen. (Source : (Dalmais et al. 2022))	106

Figure 114 : Carte des sites industriels et de réseaux de chaleur présents dans l'emprise sollicitée.	107
Figure 115 : Évolution du prix de vente moyen de la chaleur de 2016 à 2019 en fonction de l'énergie majoritaire utilisée par le réseau. (Source : (Anon 2021))	109
Figure 116 : Prix du gaz (en €/MWh) de juillet 2007 à mars 2022. (Source : Bloomberg)	109
Figure 117 : Impact du taux d'EnR dans un réseau de chaleur sur le prix de vente moyen de la chaleur. (Source : (Anon 2021))	110
Figure 118 : Répartition part fixe et part variable des recettes en fonction de l'énergie majoritaire utilisée par le réseau en 2019. (Source : (Anon 2021))	110
Figure 119 : Consommation de chaleur au sein et à proximité du territoire sollicité. (Source : CEREMA)	111
Figure 120 : Suivi géochimique des saumures géothermales des projets de Soultz-sous-Forêts et de Rittershoffen.	111
Figure 121 : (à gauche) Composition géochimique de la saumure issue du puits producteur de Rittershoffen (GRT-2) et (à droite) la composition en gaz dissous dans cette même saumure. (Source : (Mouchot et al. 2018))	112
Figure 122 : Estimation de la possible valorisation des substances connexes considérées comme métaux critiques présentent dans la saumure géothermale. (Source : (Dalmais et al. 2022))	113

Table des tableaux

Tableau 1 : Liste des EPCI concernés par l'emprise sollicitée et populations respectives.....	27
Tableau 2 : Liste des communes concernées par l'emprise sollicitée.....	29
Tableau 3 : Situation administrative des concessions de stockage souterrain.	31
Tableau 4 : Épaisseur du Jurassique dans les puits SCR-101, BLO-1, WIT-1, SCG-2 et ILF-1. *Données de GeORG	69
Tableau 5 : Puits issus de la BSS (BRGM) présent dans le périmètre du PER dit “Kachelhoffa minéral” (puits avec une profondeur supérieure à 500 m).	88
Tableau 6 : Catégorie et description des postes nécessaires au fonctionnement d'une usine de sorption adjointe à la centrale géothermique.....	105

1 Préambule

La présente sollicitation pour l'octroi d'un Permis Exclusif de Recherches de mines de Lithium et matières connexes est soumise à la réglementation relative aux demandes de titres d'exploration et d'exploitation de mines, selon les dispositions du décret n°2006-648 du 2 juin 2006 et de la récente ordonnance n° 2022-536 du 13 avril 2022 modifiant le modèle minier et les régimes légaux relevant du code minier prises en application de la loi Climat et Résilience.

Ce Mémoire Technique a pour vocation de présenter et de justifier l'emprise du permis sollicité ainsi que l'adéquation entre le réservoir identifié et la technique d'exploration mise en œuvre par Vulcan Énergie France. En effet, cette demande de titre minier s'inscrit dans la valorisation de la saumure géothermale dont l'identification remonte à plus de 35 ans dans le Fossé Rhéna Supérieur grâce au projet géothermique dit de « Soultz-sous-Forêts » lancé en 1987 et géré par le Groupement Européen d'Intérêt Économique (GEIE) Exploitation minière de la chaleur. Les premières analyses géochimiques montrèrent rapidement une concentration importante en lithium et un programme de recherches, financé en partie par la Commission des Communautés Européennes et en particulier le sous-programme « Matières premières primaires (métaux et substances minérales) », permis de mettre en exergue le fort potentiel de ce gisement estimé entre 1 et 2.2 millions de tonnes de lithium métal (Source : (H. Pauwels 1991)).

Ce potentiel, autant en énergie renouvelable qu'en lithium décarboné, apparaît aujourd'hui important dans le cadre de la recherche de souveraineté des États pouvant bénéficier de ce double gisement. Vulcan Energie Ressourcen GmbH (filiale en charge du développement en Allemagne) a ainsi déployé en Allemagne une stratégie visant à rapidement aboutir à la sécurisation de l'intégralité de la chaîne de valeur et cela sur le territoire Européen. Pour ce faire, le Groupe Vulcan s'est constitué autour d'une très forte expertise technique autant sur la partie géothermie que sur le lithium avec près de 260 employés dédiés à la maîtrise de la technicité de ces 2 domaines distinctifs (cf. Document des capacités techniques et financières) qu'il s'agit de coordonner de manière efficiente pour la première fois. C'est ainsi toute la phase initiale du projet qui est sécurisée avec une dizaine de permis d'exploration et une concession d'exploitation octroyés en Allemagne, la capacité de conduire en interne les études préalables (géologie, géophysique, modélisation) ainsi que la capacité à forer avec ses propres machines de forages. Concernant la particularité de l'extraction de lithium, le Groupe Vulcan possède en interne les sachants ayant d'ores et déjà développé des technologies similaires de sorte qu'il fut possible de mettre en œuvre très rapidement le premier pilote d'extraction de lithium sur la centrale géothermique d'Insheim et maintenant en fonctionnement continu depuis plus de 18 mois. Pour la suite de la chaîne de valeur qui consiste en la purification et dans le raffinage du lithium, Vulcan s'est associé avec des acteurs majeurs de l'industrie que sont par exemple les entreprises Dupont et Nobian. Ainsi, un premier site industriel de conversion du chlorure de lithium en hydroxyde de lithium a été sécurisé dans la région de Francfort. Inscrit dans l'ADN industriel du Groupe, Vulcan souhaite en priorité monter des partenariats forts avec les opérateurs / industriels locaux comme cela a encore démontré avec le dépôt conjoint d'un permis d'exploration en Italie avec l'opérateur local ENEL.

Dans cette perspective, Vulcan Énergie France aura pour objectif de suivre la même stratégie que celle mise en œuvre côté Allemand, en sécurisant des permis d'exploration, en s'assurant le soutien du projet par les élus et les citoyens et en fédérant les industriels tricolores autour de la future production nationale d'énergie renouvelable et de lithium décarboné.

De plus, le Groupe Vulcan s'inscrit également dans une démarche scientifique de collaboration et de partage avec les autres industriels et académiques afin de permettre le développement rapide de toute une filière combinant pour la première fois la production d'énergie renouvelable et d'extraction de lithium. Ainsi, ce n'est pas moins de 7 projets de recherches (Figure 1) qui sont actuellement en cours au sein du Groupe Vulcan autant sur des aspects techniques (Effeo, GreGeo, GeoThermScaling, MEET, DGE-Rollout) que sur les aspects financiers (GeoRisk) et de gouvernance participative (Crowdthermal).

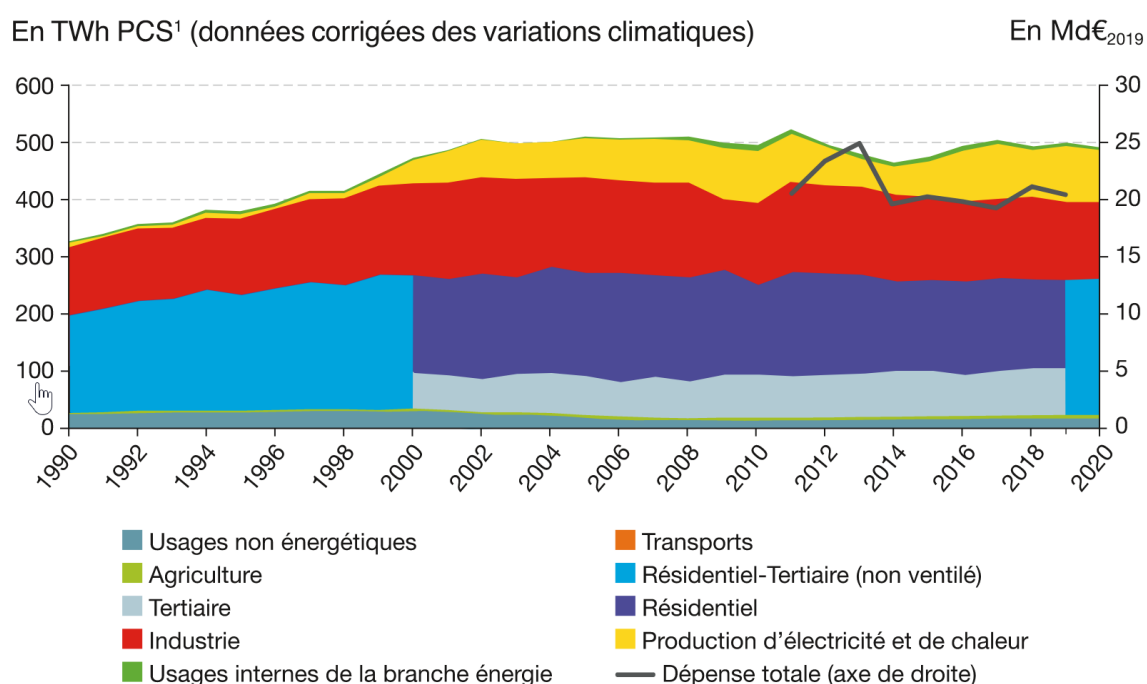


Figure 1 : Liste des projets allemands et européens dans lesquels le Groupe Vulcan participe activement.

2 Contexte du développement

2.1 Objectif de production de chaleur décarbonée

Le contexte géopolitique actuel a poussé bon nombre d'États à réévaluer leur politique énergétique avec un focus particulier sur l'approvisionnement et les usages en gaz naturel. Les données françaises mettent en évidence le résidentiel et l'industrie comme les deux secteurs ayant une part prépondérante dans l'usage du gaz naturel (Figure 2). Selon le Service des Données et Études Statistiques (SDES), le résidentiel a représenté 41% de la consommation de gaz avec plus de 12 millions de résidences principales concernées. La grande majorité de ce gaz est employé pour le chauffage (110 TWh PCS). Le reste sert à l'eau chaude sanitaire (17 TWh PCS) et à la cuisson (9 TWh PCS).



¹ 1 TWh PCS = 1 milliard de kWh en pouvoir calorifique supérieur (voir définitions).

Champ : France entière (y compris DROM, dans lesquels la consommation de gaz naturel est nulle).

Figure 2 : Consommation totale (hors perte) de gaz naturel par secteur en France.

(Source : Commissariat général au développement durable, Service des données et études statistiques)

Concernant les sources d'approvisionnements, elles demeurent diversifiées malgré des sources dépassant le seuil de 20% présentant dès lors un risque inhérent de mise en tension (Figure 3).

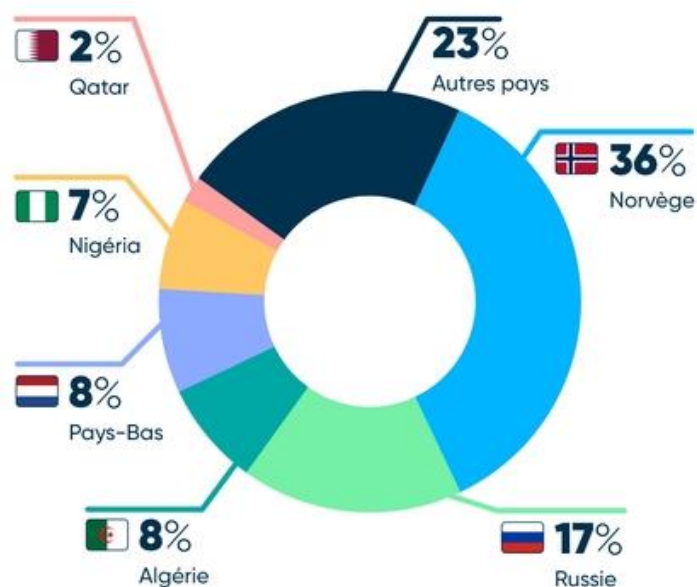


Figure 3 : Pays d'origine des importations de gaz naturel en France. (Source : Commissariat général au développement durable, Service des données et études statistiques)

Hormis les problématiques géopolitiques affectant potentiellement 17% des approvisionnements Français en provenance de Russie, le socle de 36% originaire de Norvège sera mécaniquement contraint par les capacités de production à long terme de ce pays (Figure 4).

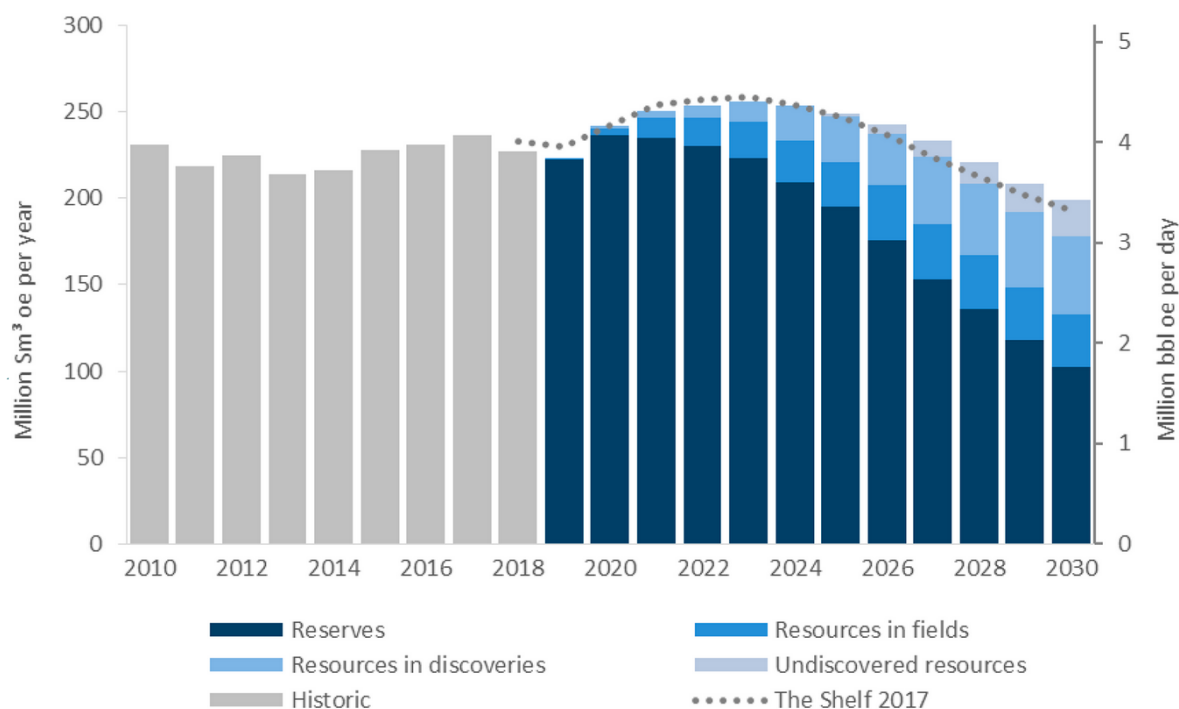


Figure 4 : Historique de production d'énergie fossile en Norvège depuis 2010 et projection jusqu'en 2030. (Source : Norwegian Petroleum Directorate (NPD))

Cette problématique similaire, voire aggravée en Allemagne, a d'ores et déjà fait partie d'une stratégie Étatique et Industrielle en Allemagne dans laquelle Vulcan Energie Ressourcen sera un acteur majeur. En effet, sur le thème de la production de chaleur renouvelable, Vulcan Energie

Ressourcen s'inscrit parfaitement dans le plan de remédiation à la dépendance énergétique allemande au regard du gaz russe en mettant en œuvre un projet de production de chaleur géothermale renouvelable de grande ampleur (Figure 5).

Comment pallier la crise énergétique allemande ?

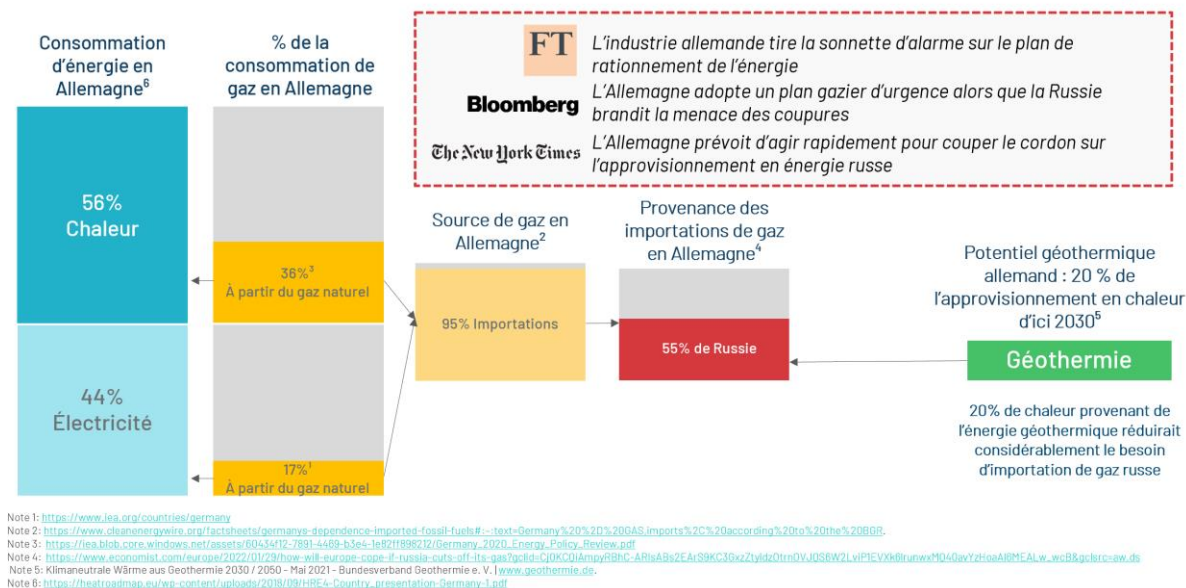


Figure 5 : Contexte de la dépendance énergétique allemande au gaz russe et apport de la géothermie pour la décarbonation de la filière chaleur. (Source : Vulcan Energie Ressourcen)

Plus globalement, le marché de la chaleur géothermale est en constante augmentation et se trouve être encore accéléré par le contexte géopolitique qui tend à pousser l'Europe vers la souveraineté de ses approvisionnements.

En France, la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE) inscrit des objectifs clairs quant à la production de chaleur géothermale :

En termes de production globale de chaleur et de froid renouvelable : passer de 154 TWh en 2017 à 196 TWh en 2023 et entre 219 TWh et 247 TWh en 2028 (Figure 6). Concernant la géothermie :

- Passer de 3,14 TWh en 2017 à [5 – 7] TWh en 2028 pour la géothermie de surface (PAC géothermiques)
- Passer de 2 TWh en 2017 à [4 - 5,2] TWh en 2028 pour la géothermie profonde

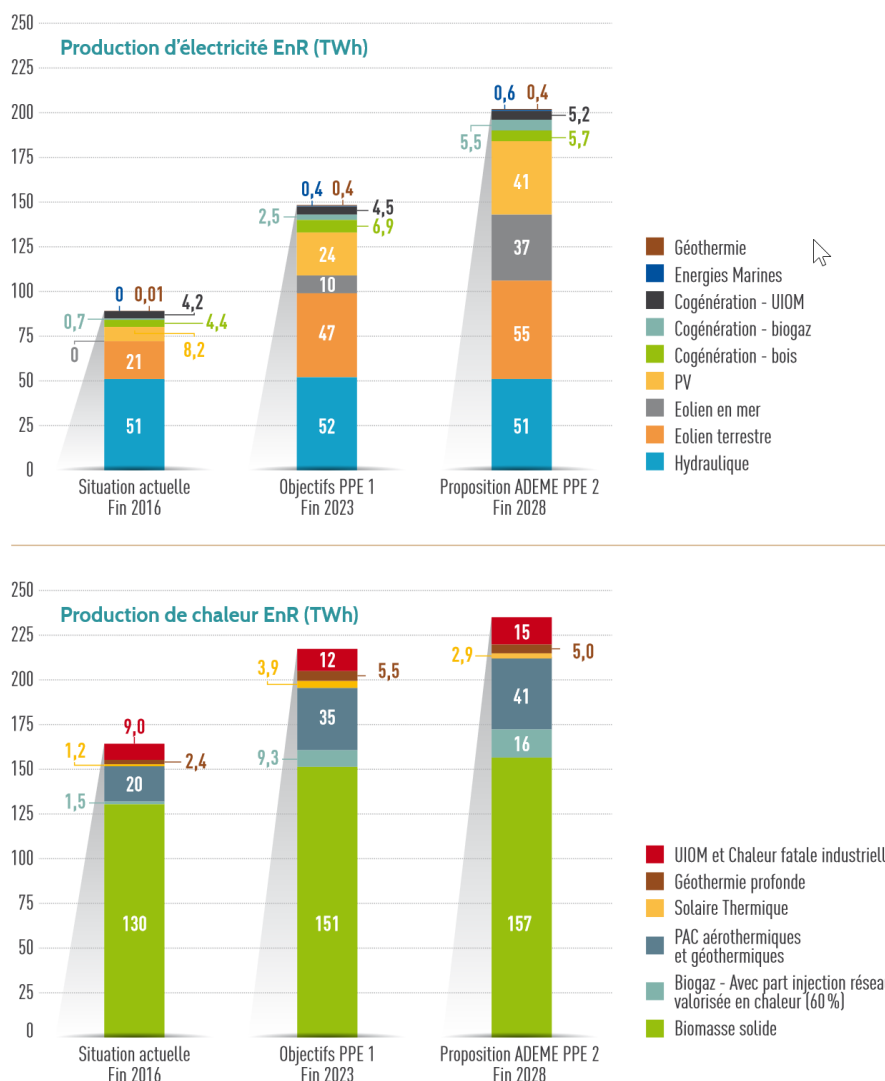


Figure 6 : Bilan et projection des productions d'énergie renouvelable par filière et mise en regard avec les objectifs PPE 1/2. (Source : ADEME, Synthèses des propositions de l'ADEME pour la PPE : Les filières EnR en action)

Ces objectifs de transition écologique se voient encore plus adossés à la géothermie avec la mise en œuvre par le gouvernement français d'un Plan d'Action pour la géothermie qui doit permettre de produire en 15 à 20 ans suffisamment de chaleur géothermale pour économiser 100 TWh/an de gaz, soit plus que les importations de gaz russe avant 2022.

Vulcan Énergie France mettra également en œuvre ses compétences, autant techniques que financières, afin de permettre l'essor de la filière géothermie profonde et atteindre les objectifs écologiques pour la production de chaleur géothermale renouvelable.

2.1 Les besoins et dépendances en Lithium

En 2016, le déficit commercial français pour les accumulateurs Li-ion s'élevait à 283 M€ en valeur pour 9,2 kt en masse (Source : BRGM, Fiche de synthèse sur la criticité des matières premières minérales - Le lithium - décembre 2017) pour atteindre en 2020 environ 800 M€ en valeur (Figure 7) et 15 kt en masse (Source : Association Française des Professionnels de la Géothermie, AFGP).



Figure 7 : Chaîne de valeur et déficit commercial français sur la filière Électronique.

(Source : Etude sur la Relocalisation des Achats Stratégiques CNA-CNI-DGE-PwC, 9 juillet 2020)

L'électrification du parc automobile mondial entraîne une très forte augmentation de la demande en lithium passant en moins de 10 ans de 21 kt à 50 kt (Figure 8) avec un recentrage de l'usage principalement vers la production de batteries de types Lithium-ion (Figure 8, Figure 9).

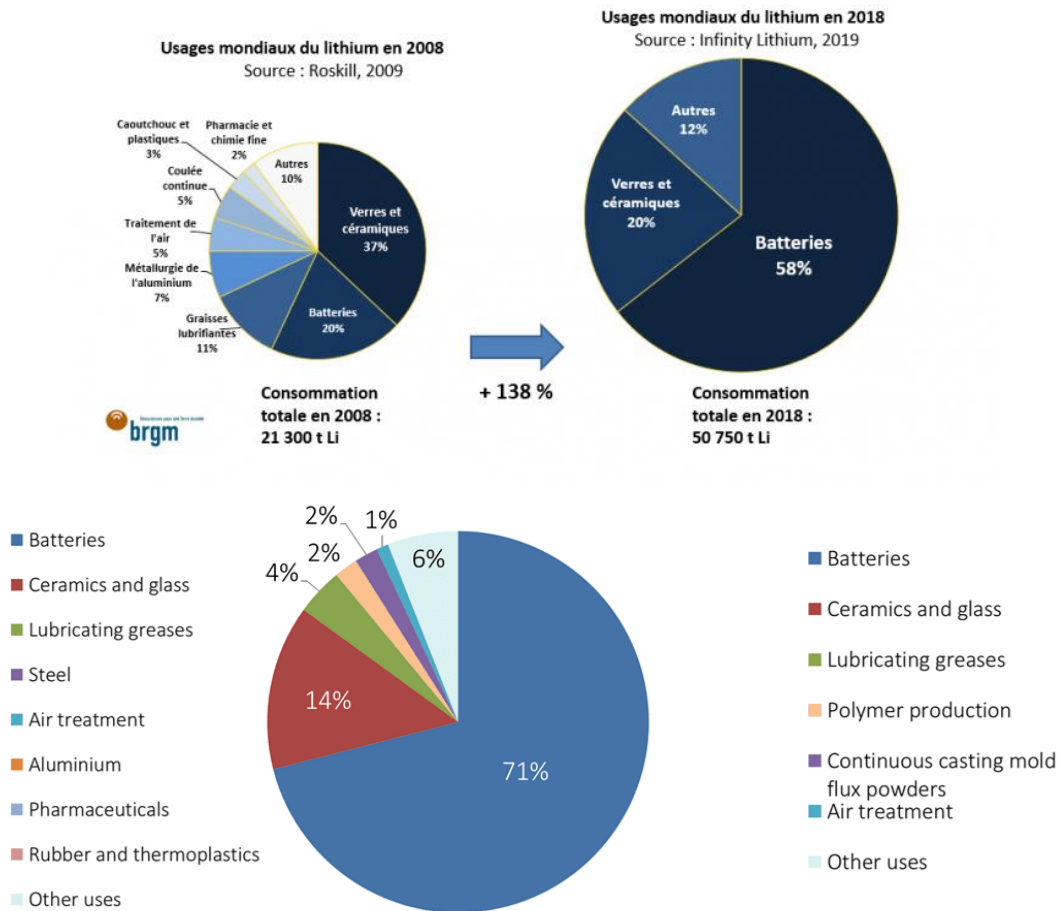


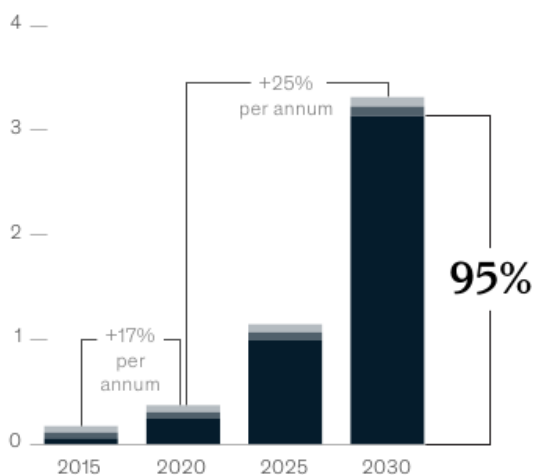
Figure 8 : (en haut) Usages mondiaux du lithium en 2008 et en 2018 (Source : MinéralInfo, BRGM) et (en bas) en 2020 (Source : Institut Français du Pétrole et Énergies Nouvelles)

Batteries are expected to account for 95 percent of lithium demand by 2030.

Lithium demand by end use, million metric tons lithium carbonate equivalent

■ Batteries ■ Ceramics and glasses ■ Other¹

Base scenario



Aggressive electric-vehicle adoption scenario

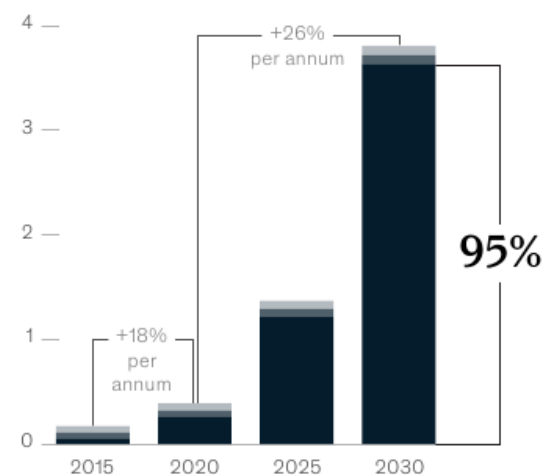


Figure 9 : Évolution et prévision de la demande mondiale en lithium d'ici 2030 (exprimée en tLCE).
 (Source : (Marcelo Azevedo 2022))

Si cette accélération de la demande en lithium se confirme, la courbe entre demande et production s'inversera à partir de 2025 faisant peser un risque d'approvisionnement pour toutes les filières dépendantes et donc fortement la filière automobile (Figure 10).

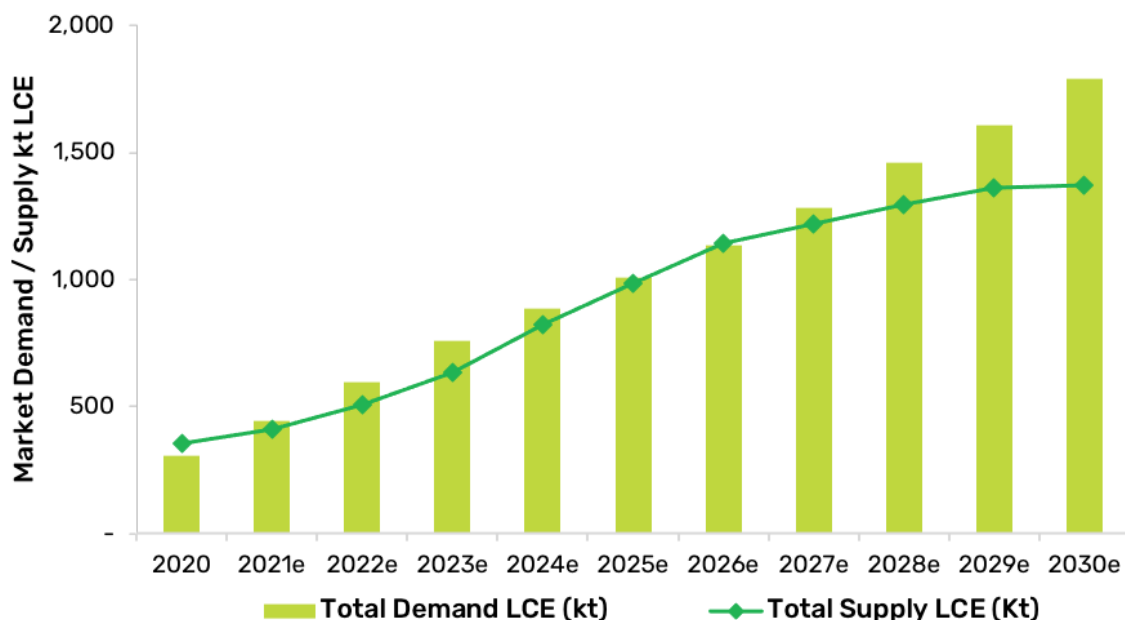


Figure 10 : Évolution de la demande mondiale en lithium d'ici 2030 au regard de la production de lithium (Source : S&P Global Platts, Benchmark Mineral Intelligence & Fastmarkets, 2020)

Or, sur le marché français, la croissance des ventes de véhicules électriques se poursuit et s'accélère depuis 2020 (Figure 11). Au regard de l'électrification actuelle du parc français (~10%, Figure 11) et de la récente décision de l'Union européenne concernant l'interdiction de la vente de véhicules à moteur thermique en 2035, le besoin en batteries ne fera que s'accroître nécessitant pour les constructeurs automobiles de sécuriser leurs approvisionnements en lithium.

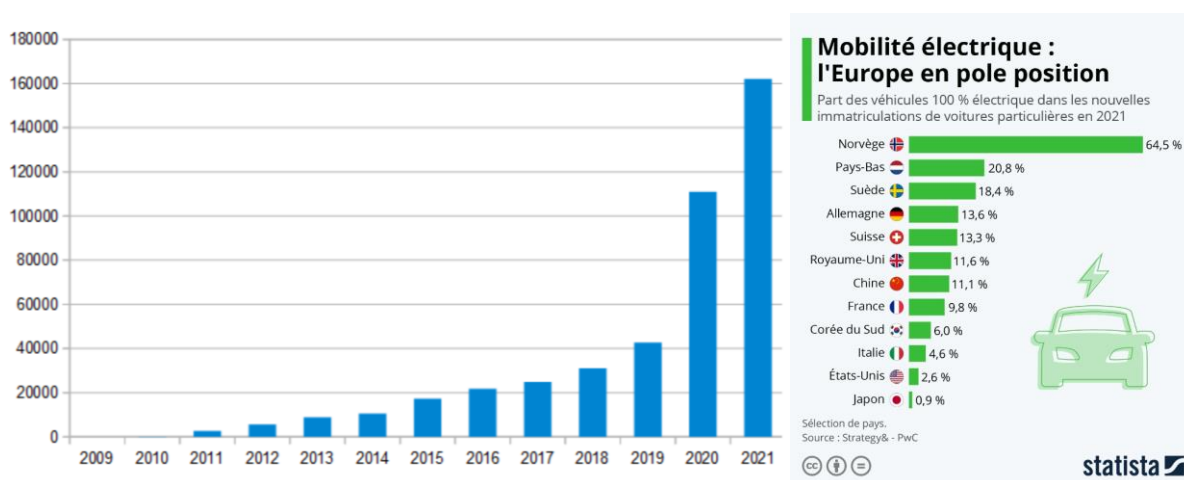


Figure 11 : (à gauche) Nombre d'immatriculations de voitures 100% électriques par en France, (à droite) part des véhicules 100% électrique dans le parc automobile dans une sélection mondiale de pays. (Source : Statista)

Cette demande du marché mondial des batteries restera en 2030 tournée à hauteur de 43% vers la Chine. A ce même horizon, l'Union Européenne dépassera les États-Unis en devenant le deuxième marché client du lithium (Figure 12).

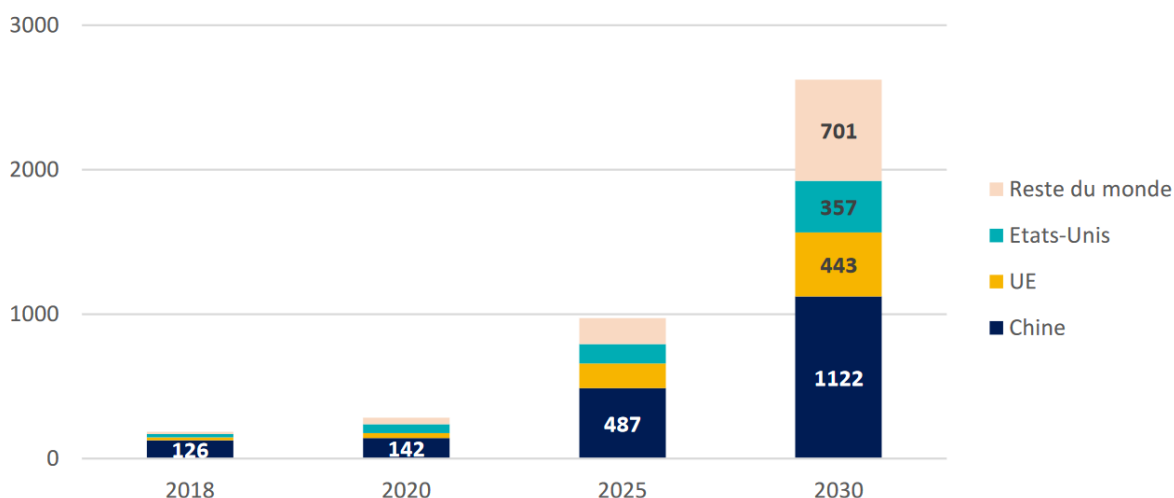


Figure 12 : Évolution de la demande mondiale en batterie pour l'électromobilité et le stockage stationnaire (exprimé en Gwh).
(Source : European Technology and Innovation Platform on Batteries – Batteries Europe, « Strategic Research Agenda for batteries », 4 décembre 2020, page 11)

Cela renforce d'autant plus la pertinence d'une production et d'une sécurisation de l'ensemble de la chaîne de valeur du lithium sur le territoire de l'Union Européenne. Le potentiel européen (Figure 13) fait l'objet de nombreuses études prospectives atteignant pour l'instant le stade des études de faisabilités. Cependant, à l'heure actuelle, seul le projet porté par le Groupe Vulcan semble en mesure d'assurer une production significative et s'effectuant avec un bilan carbone neutre (Figure 14).

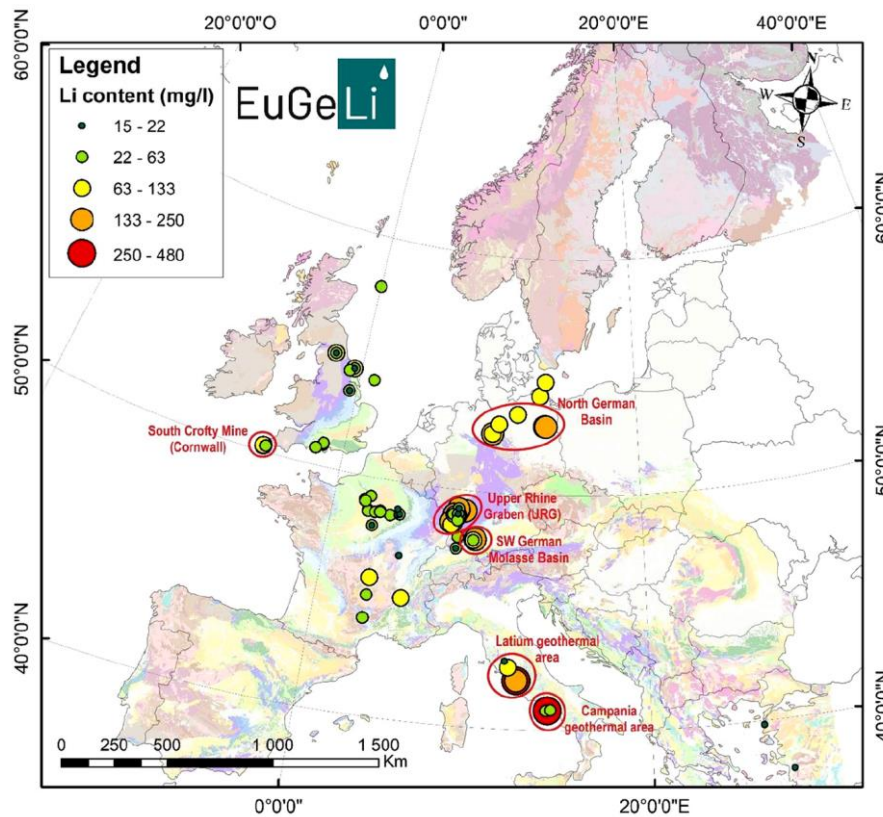


Figure 13 : Carte de l'Europe présentant des zones à fort potentiel en termes de concentration en Lithium dans des saumures géothermales. (Source : (Sanjuan et al. 2020)).

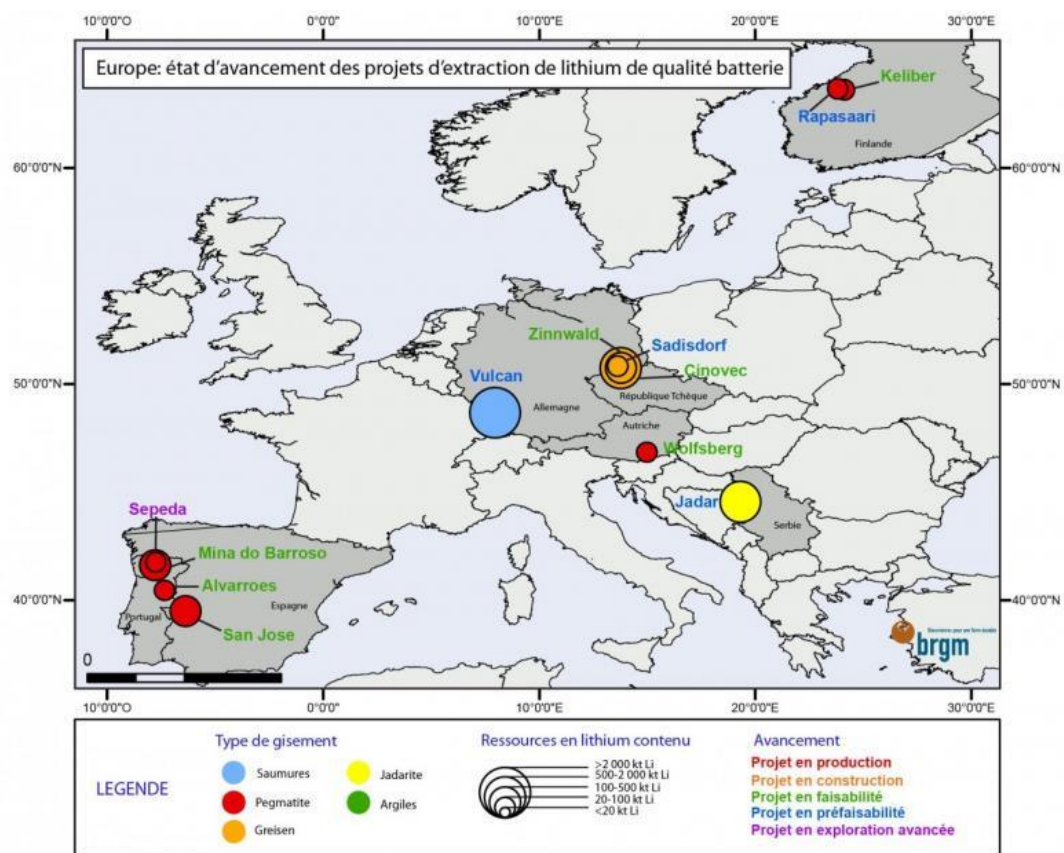


Figure 14 : Carte représentant l'état d'avancement des projets d'extraction de lithium de qualité batterie en Europe. (Source : BRGM, MinerallInfo Le marché du lithium en 2020 : enjeux et paradoxes)

3 Situation des permis de recherches dans le périmètre sollicité

Le PER sollicité (Figure 15) est situé dans le département du Haut-Rhin, dans la région Grand Est et représente une emprise de 480 km², incluant 4 Établissements Publics de Coopération Intercommunale (Figure 16, Tableau 1) et 42 communes (Figure 17, Tableau 2).

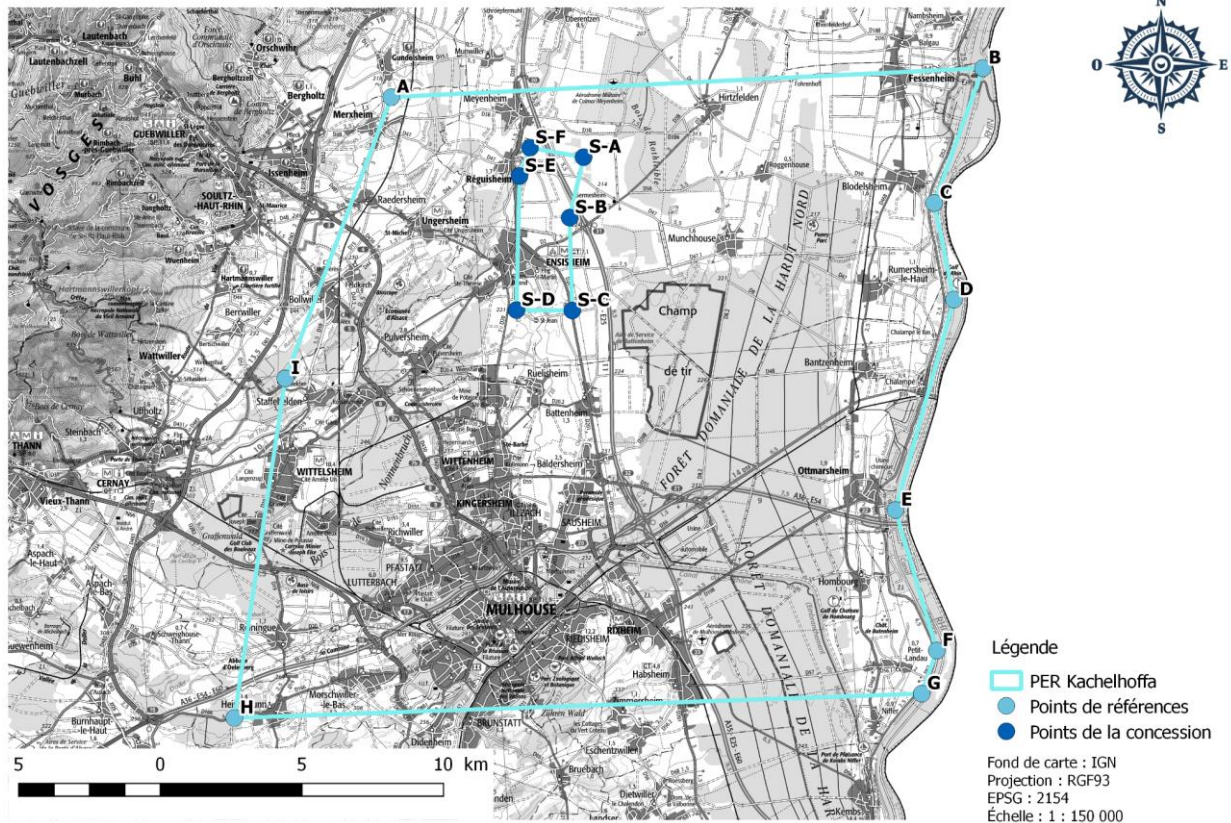


Figure 15 : Carte de la localisation de l'emprise sollicitée dans le cadre de la demande de Permis Exclusif de Recherches de mines de Lithium.

EPCI	Nombre de communes	Population	Président
Communauté d'Agglomération - Mulhouse Alsace Agglomération	39	277 738	Maire de Berrwiller M. Jordan
Communauté de Communes de la Région de Guebwiller	19	38 829	Maire de Soultz-Haut-Rhin M. Rotolo
Communauté de Communes du Centre du Haut-Rhin	9	16 464	Maire d'Ensisheim M. Habig
Communauté de Communes Pays Rhin - Brisach	29	34 249	Maire de Biesheim M. Hug

Tableau 1 : Liste des EPCI concernés par l'emprise sollicitée et populations respectives.

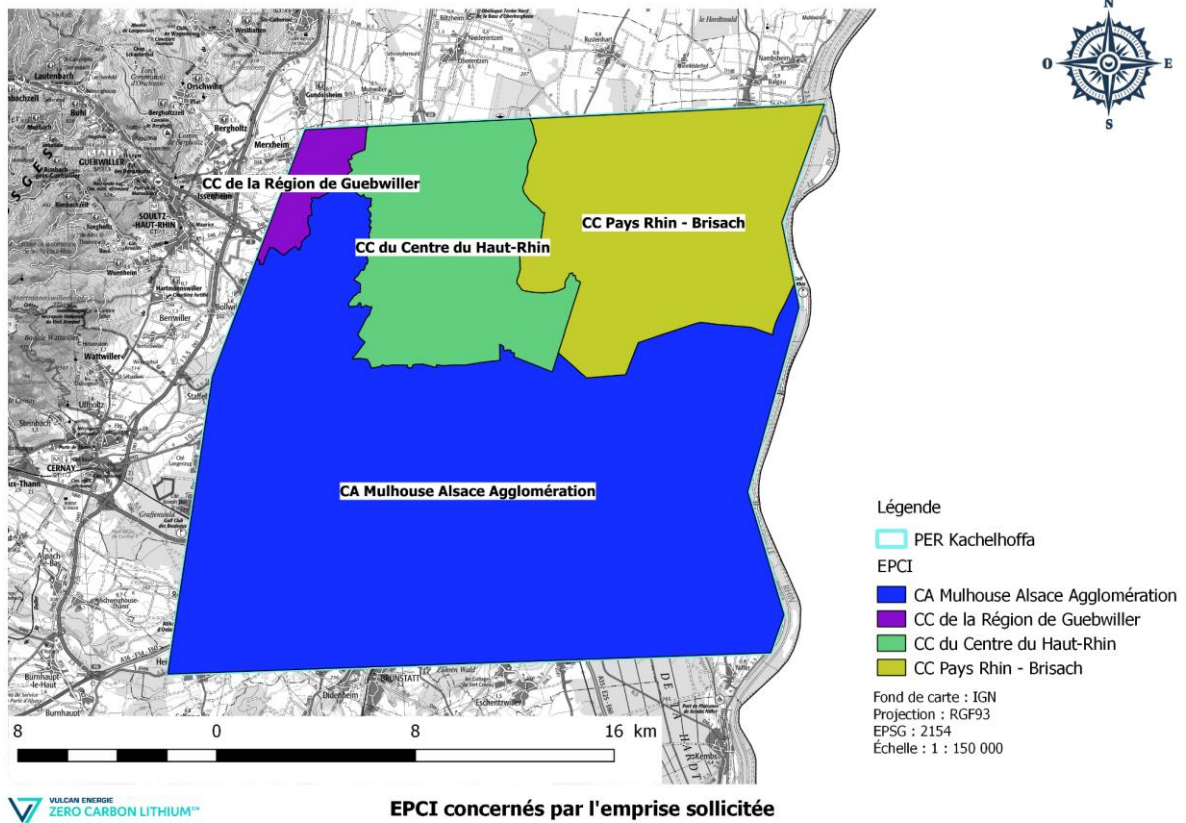


Figure 16 : EPCI concernés par l'emprise du permis Exclusif de Recherches sollicité.

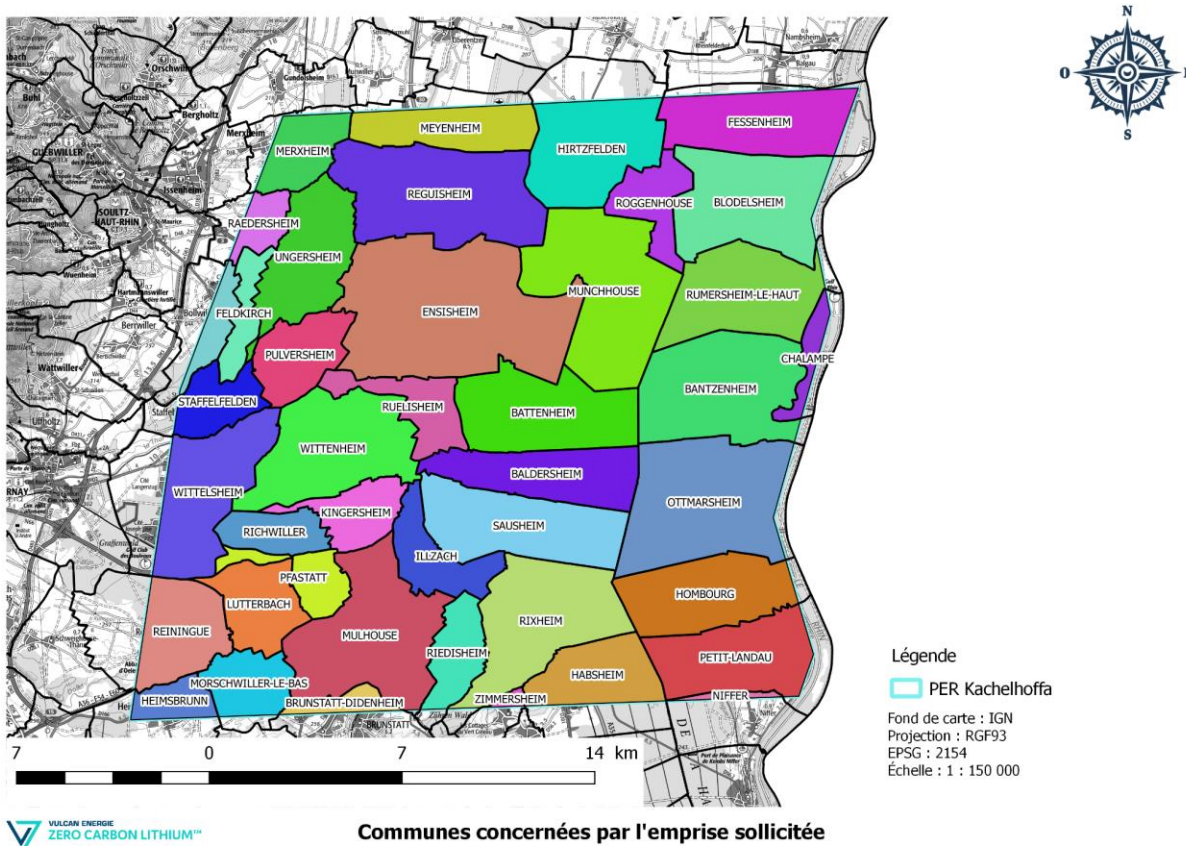


Figure 17 : Communes concernées par l'emprise du permis Exclusif de Recherches sollicité.

Commune	Code INSEE	Habitants (2020)	Emprise du PER sur la commune (ha)	EPCI
Baldersheim	68015	2 667	1 276	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Bantzenheim	68020	1 594	2 122	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Battenheim	68022	1 594	1 690	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Blodelsheim	68041	1 999	1 842,4	CC Pays Rhin - Brisach
Bollwiller	68043	4 122	344,3	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Brunstatt-Didenheim	68056	8 163	242,8	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Chalampé	68064	970	272,4	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Ensisheim	68082	7 512	3 659	CC du Centre du Haut-Rhin
Feldkirch	68088	997	420	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Fessenheim	68091	2 267	1 450,2	CC Pays Rhin - Brisach
Habsheim	68118	4 999	975,7	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Heimsbrunn	681299	1 327	377,6	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Hirtzfelden	68140	1 302	1 576,9	CC Pays Rhin - Brisach
Hombourg	68144	1 346	1 460,9	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Illzach	68154	14 784	745	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Kingersheim	68166	13 263	665,7	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Lutterbach	68195	6 247	854,5	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Merxheim	68203	1 247	650,6	CC de la Région de Guebwiller
Meyenheim	68205	1 830	964,0	CC du Centre du Haut-Rhin
Morschwiller-le-Bas	68218	3 692	662,5	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Mulhouse	68224	108 312	2 218	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Munchouse	68225	1 561	2 406,1	CC Pays Rhin - Brisach
Niffer	68238	945	82,2	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Ottmarsheim	68253	1 973	2 414,1	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Petit-Landau	68254	827	1 417,2	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Pfastatt	68256	9 723	524	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Pulversheim	68258	3 017	856	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Raetersheim	68260	1 113	342,9	CC de la Région de Guebwiller
Réguisheim	68266	1 990	2 377	CC du Centre du Haut-Rhin
Reiningue	68267	1 979	1 025,9	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Richwiller	68270	3 692	555,0	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Riedisheim	68271	12 520	634,3	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Rixheim	68278	14 204	1 897,4	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Roggenhouse	68281	466	660,8	CC Pays Rhin - Brisach
Ruelisheim	68289	2 329	721	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Rumersheim-le-Haut	68291	1 059	1 593,7	CC Pays Rhin - Brisach
Sausheim	68300	5 479	1 691	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Staffelfelden	68321	4 046	605,8	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Ungersheim	68343	2 381	1 357,2	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Wittelsheim	68375	10 362	1 569,4	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Wittenheim	68376	14 776	1 905	CA Mulhouse Alsace Agglomération
Zimmersheim	68386	1 041	61,1	CA Mulhouse Alsace Agglomération

Tableau 2 : Liste des communes concernées par l'emprise sollicitée.

3.1 Permis Exclusif de Recherches de minéraux et métaux

L'emprise sollicitée ne se trouve pas en superposition avec un quelconque Permis Exclusif de Recherches de minéraux et métaux.

3.2 Concession d'exploitation de minéraux et métaux

L'emprise sollicitée ne se trouve pas en superposition avec une quelconque concession d'exploitation de minéraux et métaux.

3.3 Permis Exclusif de Recherches de gîtes géothermiques

L'emprise sollicitée ne se trouve pas en superposition avec un quelconque Permis Exclusif de Recherches de gîtes géothermiques.

3.4 Concessions d'exploitation de géothermie profonde

L'emprise sollicitée ne se trouve pas en superposition avec une quelconque concession d'exploitation de gîtes géothermiques.

3.5 Permis Exclusif de Recherches d'hydrocarbures liquides ou gazeux

L'emprise sollicitée ne se trouve pas en superposition avec un quelconque Permis Exclusif de Recherches d'hydrocarbures liquides ou gazeux.

3.6 Concessions d'exploitation d'hydrocarbures liquides ou gazeux

L'emprise sollicitée ne se trouve pas en superposition avec une quelconque concession d'exploitation d'hydrocarbures liquides ou gazeux.

3.7 Permis Exclusif de Recherches de stockage souterrain

L'emprise sollicitée ne se trouve pas en superposition avec un quelconque Permis Exclusif de Recherches de stockage souterrain.

3.8 Concessions de stockage souterrain

La carte suivante (Figure 18) présente la localisation de l'emprise sollicitée au regard des concessions de stockage souterrain (Tableau 3).

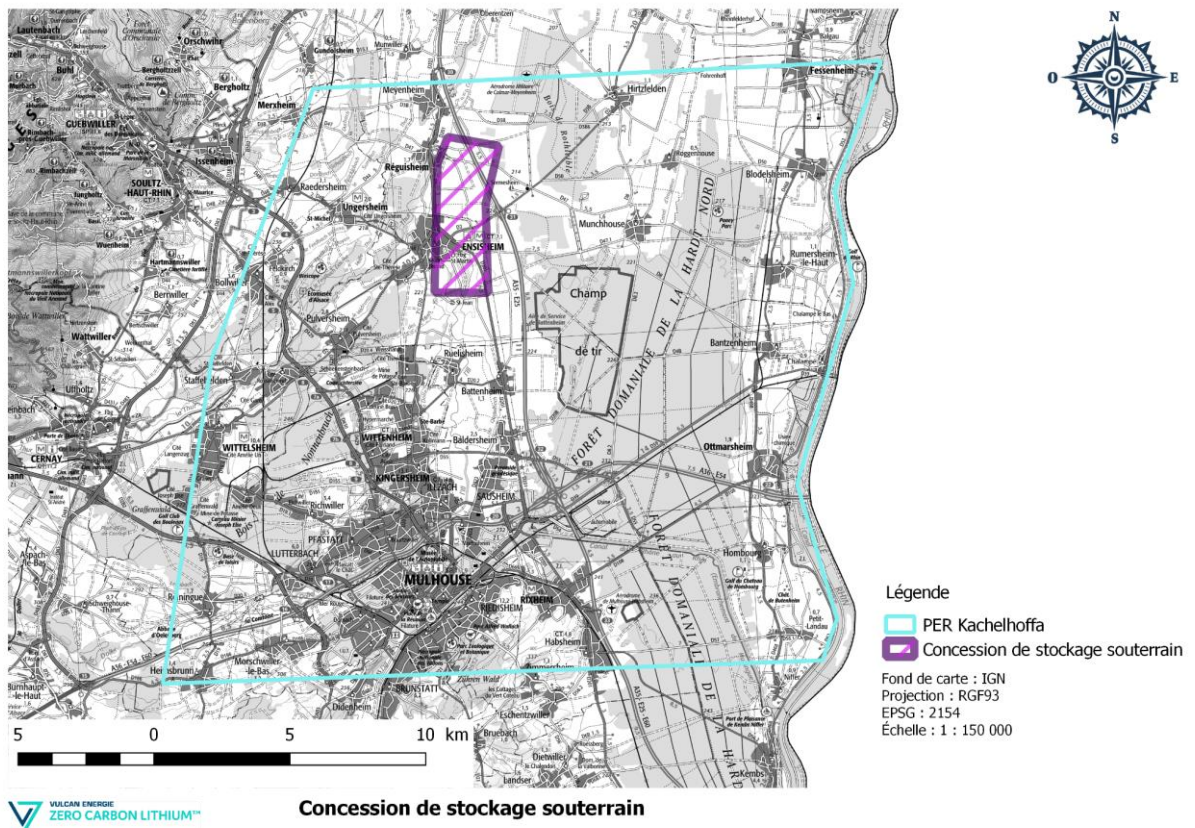


Figure 18 : Cartes des concessions de stockage souterrain.

Nom	Statut	Date d'octroi	Date de fin	Superficie	Titulaire
Alsace Sud	1 ^{ère} période	01/02/2012	01/02/2062	10.8 km ²	Engie

Tableau 3 : Situation administrative des concessions de stockage souterrain.

Afin de ne pas interférer avec cette concession, l'emprise sollicité dans le cadre de cette demande de Permis Exclusif de Recherches de mines de Lithium exclue le périmètre de cette concession de stockage souterrain.

Dans le cadre de la rédaction de ce Mémoire Technique et des autres documents constitutifs de ce dossier de demande de Permis Exclusif de Recherches (à l'exception des données cartographiques 5 et 6), l'emprise de la concession de stockage souterrain n'a pas été reportée sur les figurés qui suivent afin d'alléger les éléments présentés.

4 Le réservoir du Fossé Rhénan Supérieur

4.1 Géologie et structure globale

Le Fossé Rhénan Supérieur est un bassin sédimentaire d'effondrement qui s'étend depuis Bâle au sud jusqu'à Frankfort au nord, sur environ 300 km suivant une direction générale SSO-NNE. Sa largeur varie de 30 à 40 km. Il appartient à un système de rifts qui affecte la plate-forme ouest-européenne depuis la mer Méditerranée jusqu'à la Mer du Nord. De ce fait, il est relayé au sud par les fossés de la Bresse et de la Limagne et au nord par la dépression de Hesse. Ces fossés témoignent des phénomènes d'extension de la croûte terrestre qui se sont mis en place pendant le Tertiaire au front de l'arc alpin.

Au nord, le volcan tertiaire du Vogelsberg forme une barrière topographique avec le Massif schisteux Rhénan (Figure 19, droite). Au sud, le fossé est fermé depuis le Miocène par les contreforts du Jura. Il est bordé à l'ouest par le massif cristallin des Vosges et la Forêt du Palatinat, et à l'est par le massif cristallin de la Forêt Noire, la dépression de Kraichgau et l'Odenwald. Les limites à l'est et à l'ouest du Fossé Rhénan correspondent à des systèmes de failles normales majeures responsables de l'effondrement du fossé et donc de son remplissage sédimentaire. Ces failles séparent le bassin sédimentaire des épaules du rift et elles délimitent également les larges zones faillées appelées « champ de fracture » tel que le champ de fractures de Saverne, de Ribeauvillé ou de Guebwiller (côté français) ou celui de Speyer-Reilingen (côté allemand). Les déplacements verticaux des failles bordières atteignent un kilomètre. Le remplissage sédimentaire tertiaire et quaternaire dépasse les 3 000 m d'épaisseur par endroit mais avec l'effondrement du fossé et compte tenu du relèvement de ses bordures, plus particulièrement dans le sud le dépôt atteint plus de 5 000 m (Sittler 1992) et jusqu'à 4 000 m au nord (dans le bassin de Mayence).

À l'intérieur du fossé, les études géophysiques liées à l'exploitation pétrolière ont montré une très forte compartimentation des couches sédimentaires matérialisée par une succession de horsts et grabens limités principalement par des failles normales. Dans le détail, le Fossé Rhénan montre de très fortes variations d'épaisseurs de sédiments, avec des dépôts globalement plus épais vers le nord que vers le sud. Ces variations reflètent la structure asymétrique du fossé en liaison avec la présence de failles profondes et des différents épisodes de subsidence et de surrection qui ont affectés le fossé jusqu'au Quaternaire (Figure 19, gauche). Ainsi chaque sous-bassin se caractérise par une architecture et une histoire sédimentaire particulière.

Le socle cristallin Varisque du Fossé Rhénan Supérieur est composé, respectivement du nord au sud, de trois unités tectonostratigraphiques que sont le Rhénohercynien, le Saxothuringien et le Moldanubien. L'histoire de la collision au Varisque avec le sur-épaississement crustal et la fusion partielle de la croûte moyenne a permis la mise en place d'une multitude de roches telles que les granites, les gabbros, les schistes, les gneiss, les ophiolites, etc. La couverture sédimentaire complète du fossé reposant sur le socle Paléozoïque (magmatique, métamorphique et/ou sédimentaire (Sittler, 1992)) est constituée de deux grandes unités distinctes. Il y a tout d'abord les formations sédimentaires pré-rift datant du Permien et du Mésozoïque, puis les formations du Cénozoïque et du Quaternaire contemporaines au fonctionnement du rift.

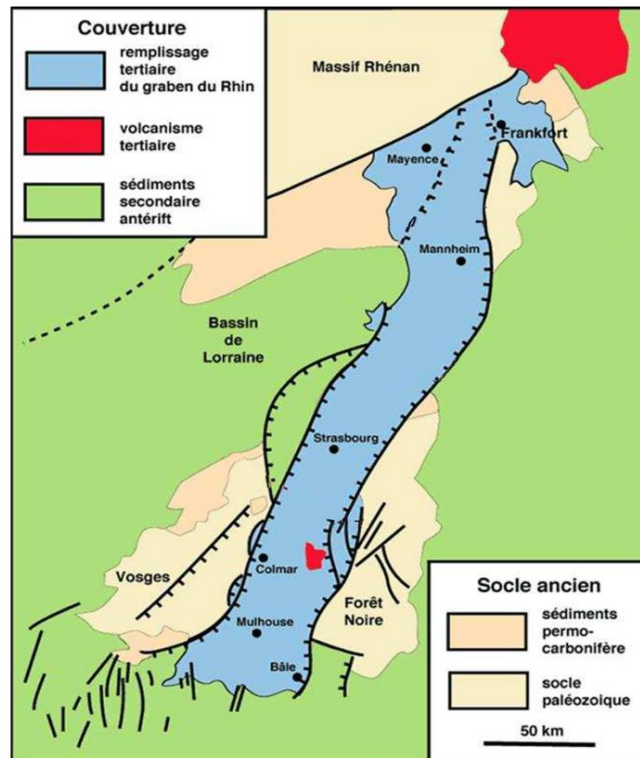
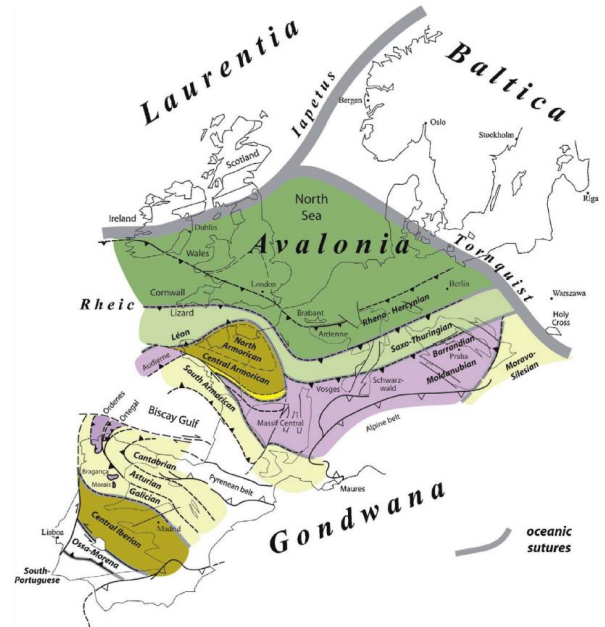
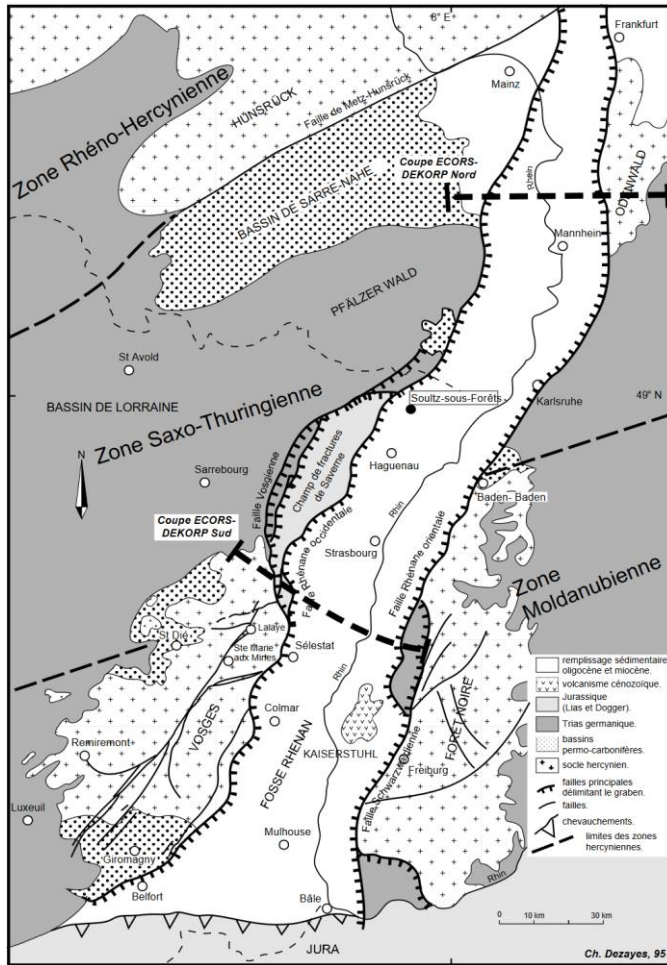


Figure 19 : Structuration géologique du Fossé Rhénan Supérieur (en haut à gauche) (Source : (Dezayes et al. 2007)) avec la carte globale des différentes zones de la chaîne Varisque en Europe (en haut à droite) (Ballèvre et al 2009), et schéma simplifié des structures majeurs du Fossé Rhénan Supérieur (en bas) (Source : E. Olliot, laboratoire Géosciences, université de Montpellier, 2018, « De la roche aux modèles : que peuvent nous apprendre les pierres dans les chaînes de montagnes ? »).

Plus focalisé sur la partie française, le Fossé Rhénan présente dans son axe longitudinal une succession de hauts structuraux ponctués par des bassins sédimentaires profonds (Figure 22). Les projets géothermiques dans le Fossé Rhénan sont caractérisés par des piles sédimentaires de taille variable selon la localisation des puits (Figure 20).

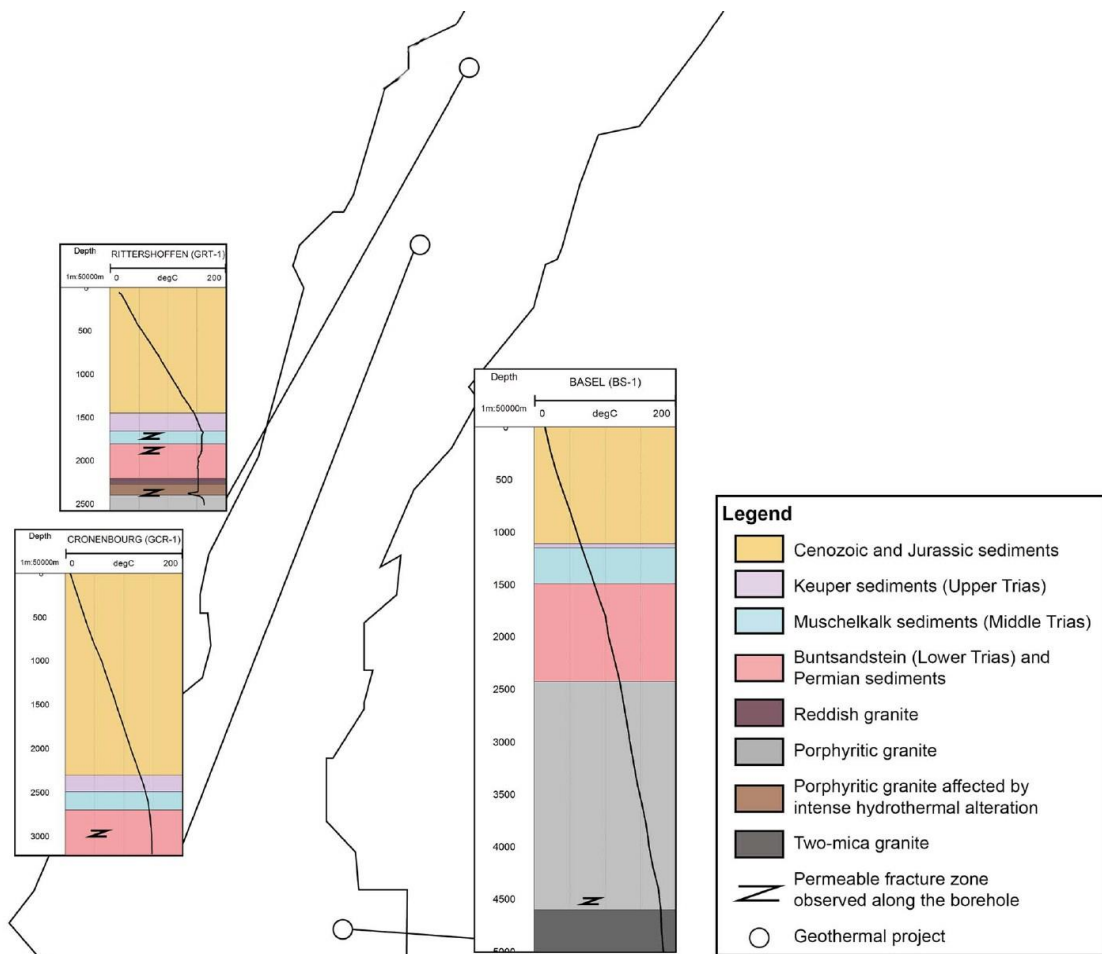
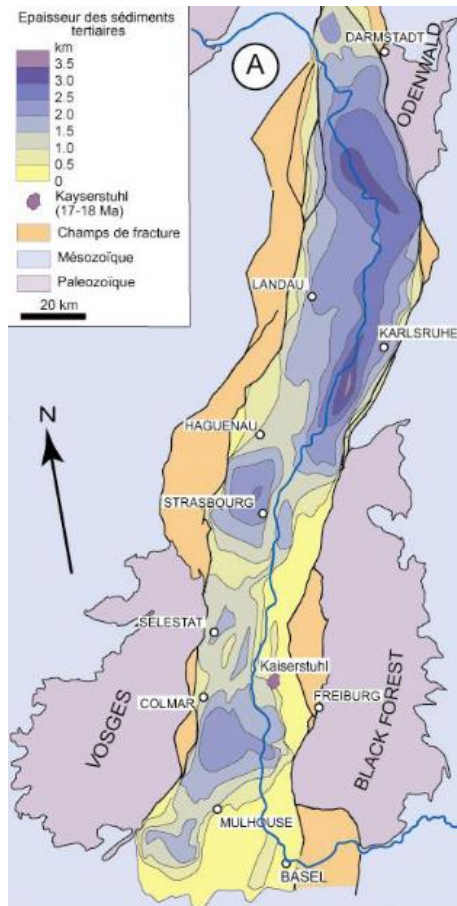


Figure 20 : Extrait de la figure présentant les profils thermiques de Rittershoffen, Cronembourg et Bâle (respectivement du nord au sud) associés à la géologie et aux zones de fractures perméables dans les puits géothermiques du centre et du sud de l'URG (Source : Vidal et Genter, 2018).

Le graben rhénan est asymétrique avec des dépôts plus épais dans le nord que dans le sud et est composé de nombreux sous-bassins qui sont tous différents les uns des autres. En effet, ces sous-bassins reflètent la complexité de l'histoire rhénane sur plus de 45 Ma, chacun d'eux ayant une architecture et une histoire singulière : le Bassin de Pechelbronn au nord, le Bassin Potassique entre Mulhouse et Colmar, le Bassin de Mulhouse au sud, et les bassins marginaux composés de faciès grossiers déposés au pied des reliefs environnants, pour ne nommer que les plus importants.

L'histoire tectonique du Fossé Rhénan Supérieur s'est faite en quatre étapes (Bergerat, 1985) : - une compression N-S à l'Éocène, une extension E-O (N110) à l'Oligocène, une compression NE-SO au Miocène inférieur et une compression NO-SE ainsi qu'une extension NE-SO du Miocène moyen à l'actuel.



Plus focalisé sur la partie française, le Fossé Rhénan présente dans son axe longitudinal une succession de hauts structuraux ponctués par des bassins sédimentaires profonds (Figure 22). Les projets géothermiques de Soultz-sous-Forêts et de Rittershoffen sont caractérisés par une pile sédimentaire bien plus restreinte que celle forée dans l'Eurométropole de Strasbourg (Figure 20 et Figure 21).

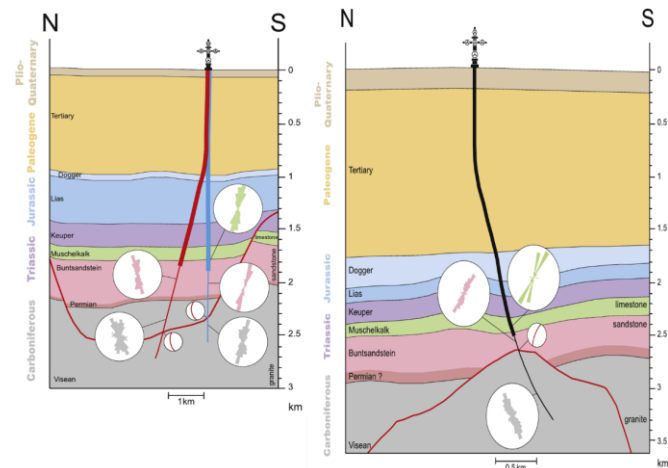


Figure 21 : Coupe schématique comparative entre la pile sédimentaire au droit du projet de Rittershoffen (à gauche) et au droit du projet d'Illkirch-Graffenstaden (à droite). (Source : (Glaas 2021))

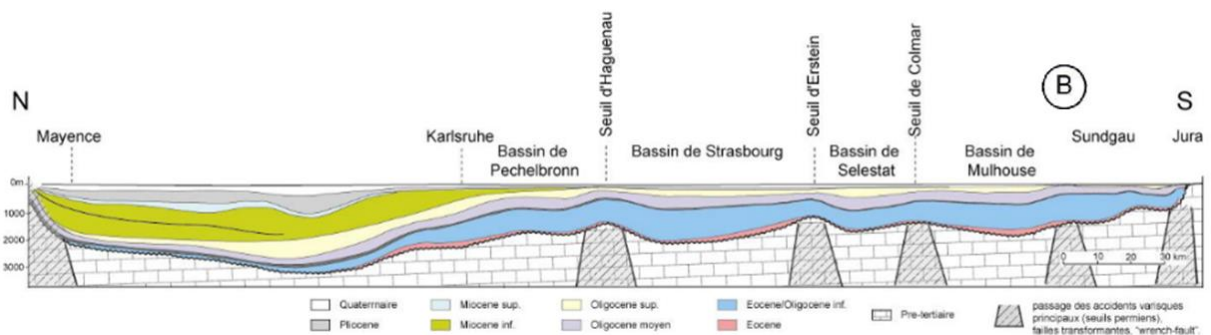


Figure 22 : A (en haut à gauche) - Carte de l'épaisseur totale des sédiments tertiaires dans le Fossé Rhénan Supérieur d'après les données de forages et de sismique ((Doebel 1967) redessiné par J-B. Edel), B (en bas) – coupe Nord – Sud schématique à travers les sédiments cénozoïques du Fossé Rhénan Supérieur par unités stratigraphiques majeures, montrant le profil longitudinal du graben et l'influence des zones de failles varisques sur la disposition et le remplissage différentiel des bassins principaux (par (Roussé 2006) compilé d'après (Sittler 1992); (Sissingh 1998); (Schumacher 2002))

L'analyse de la pile sédimentaire complète et détaillée a été réalisée et publiée dans les articles et les rapports de références suivants :

- Au nord de Strasbourg
- Durringer Ph., Aichholzer C., Orciani S., Genter A. (2019). The complete lithostratigraphic section of the geothermal wells in Rittershoffen (Upper Rhine Graben, eastern France): a key for future geothermal wells, BSGF – Earth Sciences Bulletin 2019, 190, 13

- Aichholzer C., Düringer Ph., Orciani S., Genter A. (2016) New stratigraphic interpretation of the Soultz-sous-Forêts 30-year-old geothermal wells calibrated on the recent one from Rittershoffen (Upper Rhine Graben, France), *Geothermal Energy* (2016) 4:13
- Du nord au sud de Strasbourg
- Aichholzer C. (2019) Le log complet de la stratigraphie de la zone rhénane ainsi que les modalités stratigraphiques, sédimentaires et structurales de la transition « socle-couverture ». Application à la géothermie profonde. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg.

Proche du périmètre sollicité, les puits de Muntzenheim (MUM-1), Mackenheim (MAM-1) et Sainte-Croix-en-Plaine (SCR-101) ont été réinterprétés dans le cadre des travaux d'Aichholzer (2019) et serviront de base dans le cadre des travaux menés sur le PER de Kachelhoffa car ce sont les plus proches du périmètre avec la quasi-intégralité de toutes les couches sédimentaires qu'il est possible de forer dans le secteur (Figure 23).

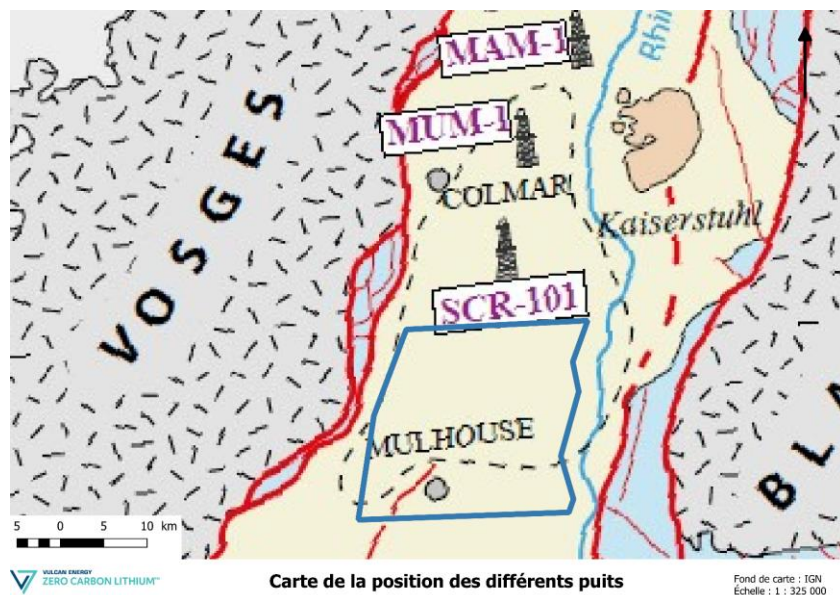


Figure 23 : Position des puits (représenté par une tour de rig) MUM-1, MAM-1 et SCR-101 par rapport au périmètre sollicité (encadré en bleu sur la figure ; source : Aichholzer 2019).

De la base au sommet (dans l'ordre chronologique des dépôts sédimentaires), nous allons détailler ci-dessous la principale succession des formations sédimentaires pouvant être rencontrée dans le périmètre.

Les unités permienes sont principalement fluviatiles à fluvio-torrentielles, avec néanmoins quelques intercalations volcaniques et volcano-sédimentaires à travers le fossé. Ce sont les premières formations sédimentaires à s'être déposées sur le socle cristallin Varisque. Principalement daté du Lopingien, on observe généralement une brèche basale surmontée par des grès siliceux à passées d'argiles, puis des grès silto-argileux à passées d'argiles. Des petites passées de brèches et de conglomérats se trouvent tout le long des formations permienes. Globalement la matrice des grès permienes est plus silto-argileuse que celle du Buntsandstein à tendance silteuse où l'argile y est moins développée. Le Permien peut faire 50 m d'épaisseur, tout comme il peut en faire 500 m, et cela selon le sous-bassin sédimentaire. Par exemple, dans le puits KNO-1 (Knoeringue au sud du périmètre), il y a selon le rapport de fin de sondage 609 m de Permien alors qu'à SOU-1

(également appelé BPR-5, Soultz Haut Rhin, à l'extérieur du périmètre le long de la bordure ouest) le puits n'aurait intersecté que 16 m de Permien. Certaines formations du Permien supérieur (daté du Lopingien inférieur) sont placées dans le « Buntsandstein inférieur triasique » (Durand et al 2013, Durand 2010).

Les séries mésozoïques reposent dans certains secteurs avec une faible discordance angulaire sur le Permien. Le Buntsandstein *sensu gallico* est attribué dans l'est de la France au Permien supérieur (Lopingien) et au Trias inférieur (Ménillet et al 2015). Si son épaisseur est globalement constante dans le Bas-Rhin où il peut avoisiner les 450 m d'épaisseur, du nord au sud du Haut-Rhin l'épaisseur chute graduellement de 430 m à 65 m d'épaisseur. Dans le secteur qui nous intéresse, le Trias inférieur est subdivisé en quatre formations d'environ 10 à 40 m d'épaisseur. De la base au sommet, se sont le Grès Vosgien (Buntsandstein inférieur), le conglomérat principal (équivalent au Poudingue de Sainte-Odile du Buntsandstein moyen) et pour finir les Couches Intermédiaires et le Grès à *Voltzia* (Buntsandstein supérieur) qui se succèdent. Principalement fluviatile avec quelques épisodes éoliens, le Buntsandstein inférieur et moyen est composé principalement de grès rouges à roses à grains fins à grossiers avec quelques niveaux conglomératiques. Seul le Grès à *Voltzia* du Buntsandstein supérieur montre des influences marines progressives qui sont bien développées dans la partie supérieure de la formation avec des faciès deltaïques contenant les premiers indices de faune marine littorale. Les grès se distinguent très bien du Buntsandstein sous-jacent. En effet ce sont des grès argileux à grain fin de couleur grise à rose clair, intercalés par des argiles silteuses lenticulaires rouges à vertes. Il est à noter que la subdivision allemande du Grès Vosgien en Couches de Trifels, Couches de Rehberg et Couches de Karlstal n'existe pas de la région de Strasbourg à Mulhouse contrairement à toute la partie nord (française et allemande) du Fossé Rhénan.

Le Muschelkalk (Figure 24) est le premier épisode marin de la colonne sédimentaire et il est attribué au Trias moyen. Subdivision du système triasique à faciès germanique, son nom allemand signifie calcaire coquillier. En effet, le groupe du Muschelkalk est caractérisé par des couches riches en calcaires coquilliers à faune marine. On trouve par exemple des fragments d'entroques microscopiques dans toutes les formations du Muschelkalk. Sur environ 150 m d'épaisseur, on y trouve des calcaires argileux, des alternances marno-calcaires, des marnes dolomitiques et des dolomies. On y trouve également quelques grès et anhydrites liées aux passées évaporitiques du Muschelkalk moyen. De bas en haut le Muschelkalk inférieur est divisé en sept unités : le Grès Coquillier, les Couches à *Myacites*, les Couches à Térébratules, le Wellenmergel, le Wellenkalk, le Schaumkalk et les Couches à *Orbicularis*. Certaines limites étant objectivement difficiles à donner, les Couches de *Myacites*, les Couches à Térébratules et le Wellenmergel sont regroupés dans la Zone inférieure Argileuse. Le Wellenkalk, Schaumkalk et les Couches à *Myophoria Orbicularis* forment la Zone supérieure Dolomitique. Le Muschelkalk moyen est composé quant à lui par les Marnes Bariolées et de la Dolomie à Lingules. Le Muschelkalk supérieur est composé du Calcaire à Entroques, des Couches à Cératites et du Calcaire à Térébratules, ayant été nommé à partir de leurs fossiles caractéristiques : crinoïdes (entroques), *Ceratites* et *Terebratula*.

Le Keuper (Figure 24) est attribué au Trias supérieur et son épaisseur est proche de 150 à 200 m. L'environnement et le faciès du Keuper va évoluer dans le temps. Le Keuper moyen se caractérise par des milieux fluviatiles, tandis que le Keuper supérieur est interprété comme marin peu profond dominé par les marées. Le reste du Keuper est majoritairement évaporitique. Le Keuper est composé de grès, d'argile, de marne, de dolomie et d'anhydrite et montre une large gamme de couleur allant du rouge au bleu, au violet, blanc, vert, noir et gris. De la base au sommet du Keuper c'est déposé la Lettenkohle, les Marnes Irisées inférieures, les Marnes Irisées moyennes, les Marnes Irisées supérieures, les Grès Rhétiens et les Argiles de Levallois. La Lettenkohle étant elle-même composée par le Dolomie Inférieure, les Argiles de la Lettenkohle et la Dolomie Limite. Les Marnes Irisées

moyennes sont composées de bas en haut par les Grès à Roseaux, les Argiles Bariolées Intermédiaires et la Dolomie de Beaumont. Pour finir, les Argiles de Chanville et les Argiles Bariolées Dolomitiques forment les Marnes Irisées supérieures.

KEUPER	Upper	Rhaetian	Argiles de Levallois (2 à 9 m)		
			Grès Rhétiens (4 à 10 m)		
	Middle	Norian	Marnes Irisées supérieures	Argiles Bariolées Dolomitiques (30 à 50 m)	
				Argiles de Chanville (5 à 15 m)	
		Carnian	Marnes Irisées moyennes	Dolomie de Beaumont (1 à 5 m)	
				Argiles Bariolées Intermédiaires (1 à 2 m)	
				Grès à Roseaux (2 à 20 m)	
			Marnes Irisées inférieures (80 à 100 m)		
	Lower	Ladinian	Lettenkohle	Dolomie Limite (1 à 3 m)	
				Argiles de la Lettenkohle (15 à 20 m)	
Dolomie Inférieure (10 à 20 m)					
MUSCHELKALK	Upper	Ladinian	Calcaire à Térébratules (2 à 4 m)		
			Couches à Cératites (35 à 47 m)		
			Calcaire à Entroques (4 à 12m)		
	Middle			Dolomie à Lingules (9 à 16 m)	
				Marnes Bariolées (35 à 55 m)	
	Lower	Anisian	Zone supérieure Dolomitique	Couches à <i>Myophoria Orbicularis</i> - Schaumkalk - Wellenkalk (14 à 20 m)	
			Zone inférieure Argileuse	Wellenmergel - Couches à Térébratules (12 à 16 m)	
				Couches à <i>Myacites</i> (5 à 8 m)	
		Grès Coquillier (6 à 9 m)			

Figure 24 : Tableau stratigraphique du Keuper au Muschelkalk (Trias) avec les épaisseurs observées entre le nord (Rittershoffen) et le sud (Sainte-Croix-en-plaine) du Fossé Rhénan Supérieur (Source : Düringer et al 2019).

Le Jurassique est entièrement marin, chaud et profond. Il est composé principalement d'argiles et de marnes monotones noires à grises. Quelques formations sableuses sont observées au Jurassique et quelques masses calcaires se détachent comme la Grande Oolithe, les Calcaires d'Ettendorf et de Mietesheim, le Calcaire de Kirrwiller et le Calcaire de Zinswiller. Avec plus d'une vingtaine de formations sédimentaires, nous n'allons pas énumérer ces dernières ici. Elles sont données dans

l'ordre chronologique dans la figure suivante (Figure 25). Il y manque quelques formations que l'on peut rencontrer dans le Haut-Rhin car le Jurassique y est plus épais que dans le reste du Fossé Rhénan : l'Oxfordien moyen et supérieur (pouvant atteindre une centaine de mètres d'épaisseur ; *cf.* Figure 26). Le Kimméridgien et le Tithonien (Malm supérieur) n'ont pas été identifiés dans le secteur.



Stratigraphie du Jurassique		
	<i>Parkinsonia ferruginea</i>	
	<i>Rhynchonella</i>	
MALM	Oxfordien inférieur	Zone à <i>Quenstedtoceras praelamberti</i>
	Callovien supérieur	Zone à <i>Peltoceras athleta</i> et <i>Kosmoceras ornatum, spinosum, duncani</i>
	Callovien moyen	Zone à <i>Kosmoceras jason</i> et <i>Reineckeia anceps</i>
	Callovien inférieur	Zone à <i>Macrocephalites macrocephalus</i> (8 à 20 m)
	Bathonien supérieur	Marnes à <i>Belemnopsis canaliculatus</i> (5 à 10 m)
	Bathonien moyen	Marnes et Calcaires à <i>Rhynchonella alemanica (R. varians)</i> (3 à 10 m)
	Bathonien inférieur	Marnes et Calcaires à <i>Parkinsonia ferruginea</i> (14 à 20 m)
	Bajocien supérieur	Grande Oolithe (55 à 60 m)
	Bajocien moyen	Couches à <i>Ostrea acuminata</i> (3 à 10 m)
	Bajocien inférieur	Marnes et Calcaires de Griesbach (Couches à <i>T. Blagdeni</i>) (5 à 15 m)
		Marnes de Grassendorf (Couches à <i>Megateuthis giganteus</i>) (5 à 15 m)
		Calcaires d'Ettendorf et de Mietesheim (Couches à <i>C. humphresianum</i>) (5 à 20 m)
		Marnes et Calcaires d'Ettendorf (Couches à <i>S. sowerbyi</i> et <i>E. sausei</i>) (20 à 30 m)
	Aalénien	Argiles Sableuses (Couches à <i>Ludwigia concava</i>) (3 à 5 m)
Formation de Schalkendorf (Couches à <i>L. purchisonae</i>) (35 à 45 m)		
Formation de Gundershoffen (Couches à <i>T. navis</i> et <i>L. Opalinum</i>) (40 à 60 m)		
DOGGER	Toarcien	Formation de Printzheim (Couches à <i>Astarte voltzi</i>) (30 à 40 m)
		Marnes de Schillersdorf (couches à <i>Lytoceras jurensis</i>) (3 à 15 m)
		Couches à <i>Dactyloceras commune</i> (1 à 3 m)
		Marnes à <i>Posidonomya bronni</i> (5 à 12 m)
	Pliensbachien	Calcaire de Kirrwiller (1 à 5 m)
		Marnes à <i>Septaria</i> Marnes à Ovoides Marnes Feuilletées } Formation de Mutzenhouse (35 à 60 m)
		Calcaire de Zinswiller (5 à 8 m)
		Formation de Bossendorf (2 à 5 m)
	Sinemurien	Calcaire de Gundershoffen (1 à 3 m)
		Formation d'Obermodern (18 à 25 m)
		Calcaires et Marnes à Gryphées (22 à 32 m)
LIAS		

Figure 25 : Tableau stratigraphique du Jurassique supérieur à inférieur avec les épaisseurs observées entre le nord (Rittershoffen) et le sud (Sainte-Croix-en-plaine) du Fossé Rhénan Supérieur (Source : Aichholzer 2019).

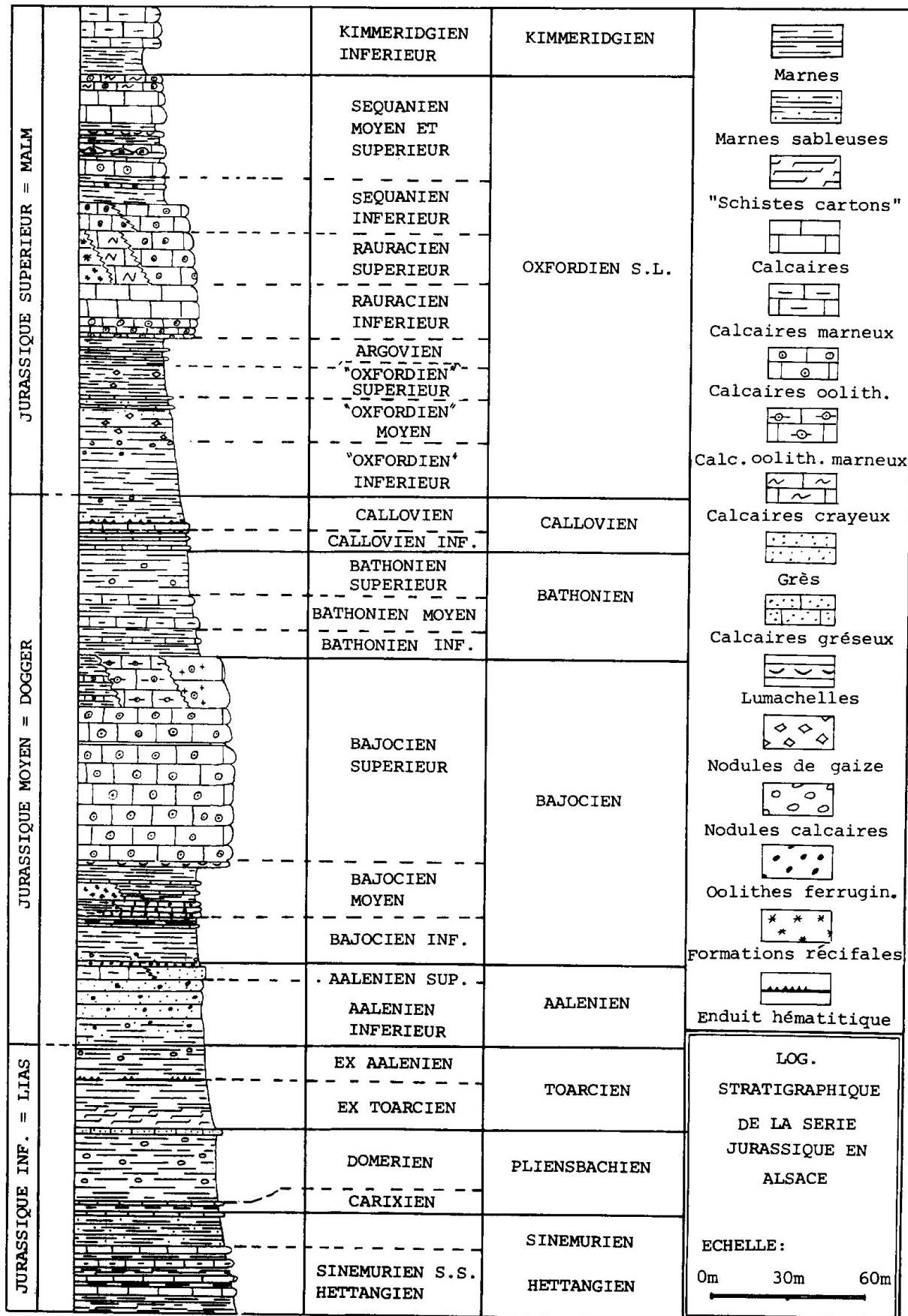


Figure 26 : La série Jurassique d'Alsace (Rauscher et Schmitt, 1990).

Dans le Fossé Rhénan Supérieur, il y a une lacune de sédimentation du Crétacé d'environ 125 millions d'années en raison de la surrection du fossé dès le Jurassique supérieur. Dans les premiers dépôts tertiaires sont observés des éléments remaniés du Jurassique, sous forme de clastes, il s'agit de la Zone de Transition. Dans de nombreuses données de puits à travers le fossé on lui a souvent accordé une 20^{aine} de mètres d'épaisseur. En effet, les faciès ne pouvant clairement être attribué à l'Éocène ou au Jurassique ont été considéré d'office comme Zone de Transition (Figure 27). En réalité la formation fait entre 0 et 5 m d'épaisseur. De nombreuses oxydations sont également visibles à l'interface entre le Jurassique et l'Éocène.

L'Éocène est un environnement lacustre à évaporitique selon la position dans le rift et les périodes de dépôts. Près des bordures Est (Forêt Noire) et Ouest (Vosges), le faciès est globalement conglomératique (fan delta de bordure) (Figure 28). Ces conglomérats ne pénètrent que peu dans le fossé mais sont surtout développés au pied des reliefs. Ce sont donc des faciès qui pourront être observés le long de la bordure du périmètre sollicité du PER dit "Kachelhoffa minéral". Dans le fossé, le secteur sollicité est situé dans le Bassin Potassique (Figure 27). Le faciès principalement argileux se charge en sel gemme dès le sud de Strasbourg pour atteindre son maximum vers Mulhouse (le Bassin Potassique). De bas en haut de la colonne tertiaire, se trouve possiblement quelques mètres de Zone de Transition et de Calcaire de Bouxwiller également appelé Calcaire à Planorbes. Concernant cette dernière formation, la présence de cette unité est très variable à travers le bassin. S'en suit un faciès marneux de couleur brun-rouge à violette avec des taches verdâtres chargés de bancs calcaires, de grès et de pisolithes (Marnes Vertes à Lymnées I), un faciès d'eau douce. Avec environ 150 m d'épaisseur, le faciès calcaire prédomine localement largement sur le faciès sidérolithique. Ensuite on trouve la formation Sel I aussi appelé grand banc de sel gemme. À sa base le banc de sel peut atteindre 200 m dans le bassin de Mulhouse. Au-dessus on observe une alternance de marnes et de sel gemme avec une épaisseur maximale de 190 m. Cette formation s'estompe vers le haut pour passer aux Marnes Vertes à Lymnées II et comme précédemment avec la formation à Lymnées I on retrouve des bancs de calcaires et de grès présents dans les faciès marneux sans sel. Le Faisceau Salin est formé par une alternance de couches de marnes et de sel gemme d'environ 150 m d'épaisseur. Les marnes ont toujours le même aspect, la couleur verte est cependant moins franche et les teintes beiges et grises sont fréquentes.

L'Oligocène est caractérisé par des dépôts lacustres à évaporitiques dans la partie inférieure et par des dépôts marins dans la partie supérieure. On observe également qu'à cet âge les premières manifestations volcaniques tertiaires sont principalement fissurales et de très faibles importances dans le fossé. Sur la bordure française cette activité volcanique est de type dyke (près de Riquewihr, Reichshoffen, ...). Concernant les dépôts sédimentaires, la Zone Fossilifère est très homogène du nord au sud du Fossé Rhénan Supérieur. La formation présente des faciès marneux voire carbonatés avec de rares bancs gréseux et peu d'anhydrite qui sont très similaires partout dans le fossé, sauf le long des bordures détritiques où le faciès est intercalé par des conglomérats. Après l'épisode lacustre de la Zone Fossilifère, on observe une importante régression lacustre qui conduit au dépôt d'une considérable masse de sel et sylvinite. La base de la Zone Salifère supérieur est caractérisée par un banc épais d'une dizaine de mètres composé d'anhydrites, de marne et de dolomie. À la base de la Zone Salifère moyenne on trouve des alternances d'anhydrites massive salifère avec des marnes gris foncé contenant des couches de sel gemme massif. À son sommet on trouve des marnes multicolores à gypse et anhydrite avec une puissance de 430 à 580 m d'épaisseur. Concernant la Série Grise, il s'agit d'une unité marine qui comprends quatre formations : les Marnes à Foraminifères, les Schistes à Poissons, les Couches à Mélettes et les Marnes à Cyrènes. La Série Grise est une formation argilo-calcaire et marneuse de couleur gris-bleu, avec quelques bancs gréseux à sableux dans la partie supérieure. Cette Série Grise n'affleure que sur les rives du Rhin dans le secteur de Mulhouse (Carte géologique de Mulhouse-Mullheim). Par endroit, l'intercalation d'un niveau

marneux à *Ostrea cyathula* (Couches à *Ostrea cyathula*) permet de distinguer une série inférieure à dominance marneuse (Série Grise) d'une série à dominance sableuse et gréseuse représentant la Molasse Alsacienne. Au-dessus de la Série Grise s'est déposé la Série Bariolée composée par la Molasse Alsacienne puis les Marnes Bariolées. Respectivement, la première est composée par des marnes sableuses, sables et grès calcaires en bancs ou miches de teinte gris-bleu, grise et jaunâtre tandis que la seconde est composée de marnes bigarrées, gréseuses, friables et grès calcaires micacés de teinte grise, brune, jaune, verte ou rose (on trouve également quelques bancs calcaires dans la formation et qui n'est pas sans rappeler son équivalent : les Couches de Niederrœdern déposées de Strasbourg vers le nord du fossé). À partir du dépôt de la Molasse Alsacienne, les faciès marins se retirent vers le Nord et les zones de sédimentation se déplacent aussi dans le même sens.

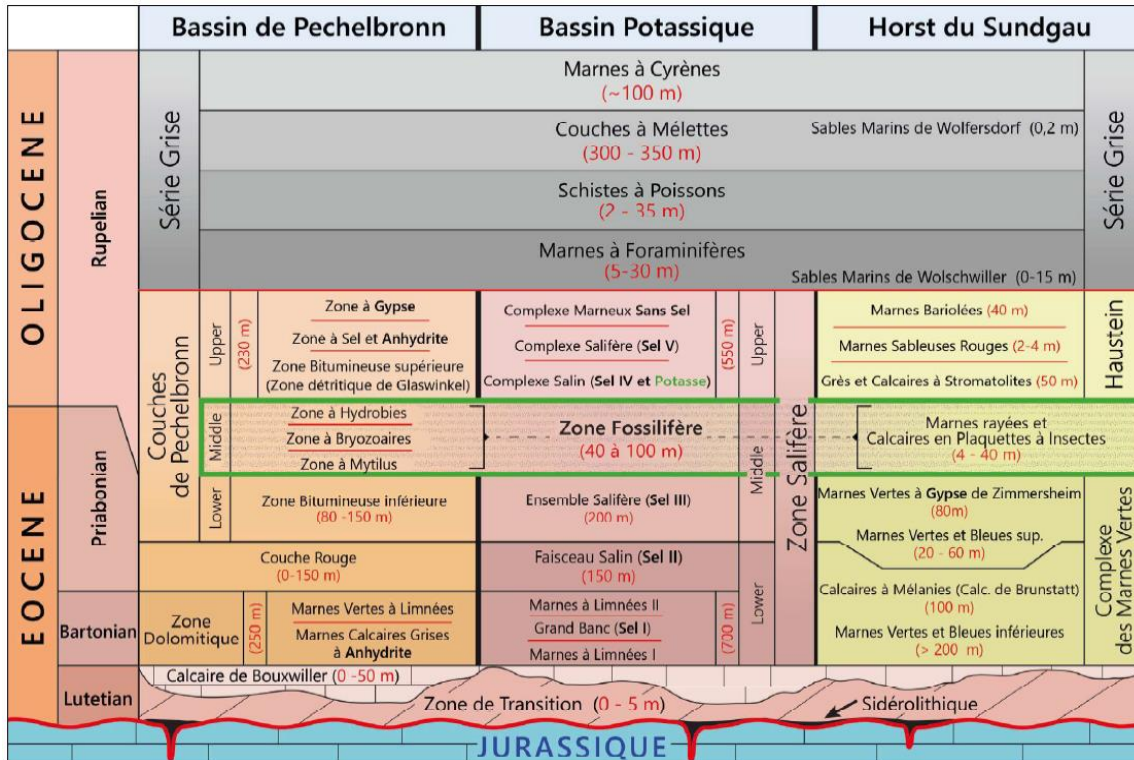


Figure 27 : Tableau stratigraphique du remplissage sédimentaire paléogène du Fossé Rhénan Supérieur du nord au sud du fossé (Source : Aichholzer et al 2021).

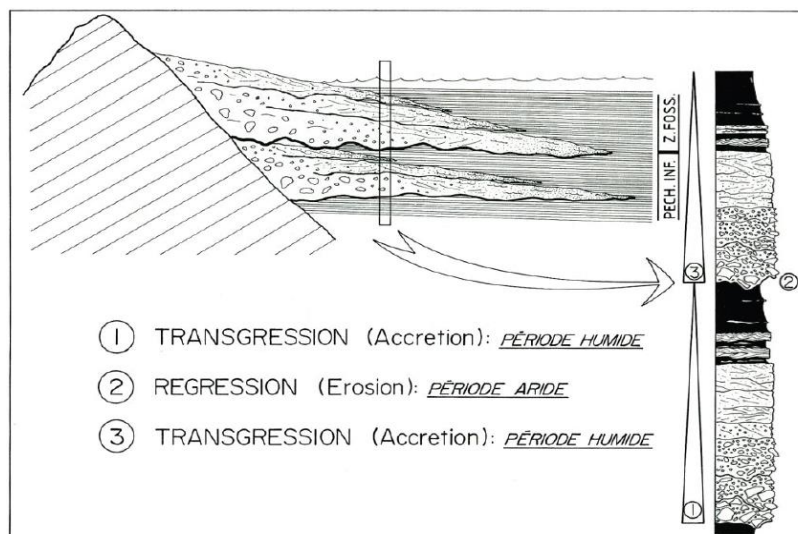


Figure 28 : Conglomérat de bordure du Fossé Rhénan, processus de progradation érosive et de rétrogradation des cônes de déjection provoqués par l'alternance de phases climatiques arides et humides (Source : Düringer 1988).

Le Miocène est absent dans la partie sud du fossé puisque cette partie du graben est soulevée et soumise à l'érosion. Le régime de contrainte prévalant à la fin du Miocène est toujours d'actualité de nos jours. Il s'agit d'un régime de compression avec une orientation NO/SE, identique à l'ensemble de l'Europe centrale. C'est à cette période que les phases majeures du volcanisme syn-rift se développe avec les éruptions importantes conduisant à la mise en place du massif de Vogelberg (Allemagne). Au sud le complexe volcanique du Kaiserstuhl a commencé son activité en même temps que le Vogelberg mais au contraire de ce dernier sa durée de vie est nettement plus courte (~2 Ma *versus* ~9 Ma). Dans toute la partie centrale et méridionale du fossé il manque les dépôts du Miocène qui sont néanmoins largement présent dans le nord, dans le Bassin de Mayence par exemple.

Le Pliocène est caractérisé par des dépôts fluviatiles, marécageux et lacustres tandis que le Quaternaire est caractérisé principalement par des graviers et des loëss. La grande masse des Graviers Rhénans (ou Complexe Argilo-Sableux) est composée principalement de graviers et de galets avec des passées sableuses et argilo-sableuses. Avec une épaisseur moyenne de 80 m, la formation peut faire plus de 200 m dans les zones les plus subsidentes du fossé. Le Complexe Lœssique contient quelques sables et un peu d'argile en plus des loëss. La formation peut mesurer jusqu'à 50 m d'épaisseur selon Ménillet et al (2015). Le Pliocène est plus souvent sableux mais il renferme également des lentilles argileuses. En résumé, le Plio-Quaternaire est composé de cailloutis et sables à inclusions d'argile et de silt, de marnes alluvionnaires, de loëss, de tourbe et d'éboulis de blocs grossiers en bordure de fossé. Dans la partie nord du fossé, l'épaisseur atteint plus de 800 m pour diminuer d'une manière générale en direction du sud. Il repose en discordance sur la Série Bariolée dans le Fossé Rhénan côté français.

4.2 Caractéristique de réservoir géothermique

Pionnière dans l'exploitation du pétrole par forages (1813, profondeur 32m, Figure 29) et berceau de l'exploration géophysique (méthodes électriques des frères Schlumberger à Dieffenbach en 1927, Figure 29), l'Alsace du Nord avec ses kilomètres d'exploration géophysique et ses plus de 5 000 forages exploite encore ce gisement d'hydrocarbures.



Figure 29 : Pancarte à l'emplacement du premier forage mécanique effectué sur le champ pétrolifère dit de « Pechelbronn » (à gauche), Conrad Schlumberger et son frère réalisant les premiers essais d'acquisition de données géophysique par méthodes électriques (à droite) (Source : Musée du Pétrole de Merwiller-Pechelbronn).

Cette exploration a permis de mettre en exergue une anomalie de température dans le Fossé Rhénan Supérieur (Figure 30) qui a participé au processus de maturation du carbone dans cette région.

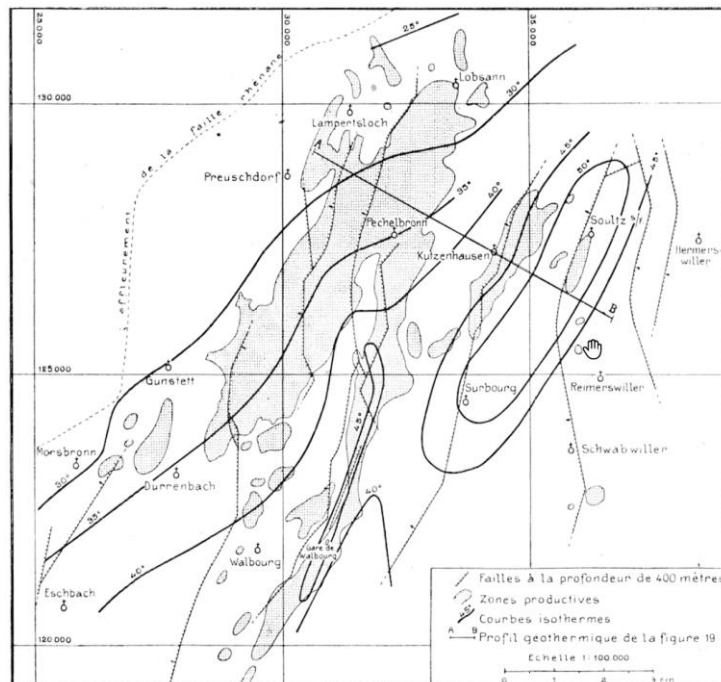


Figure 30 : Carte des isothermes à la profondeur de 400 m, dans la région N du champ de Pechelbronn (Source : (Haas & Hoffmann 1929) ; révisée en 1938).

Grâce à ces connaissances sur l'anomalie de température, fut lancé en 1987 le projet géothermique de Soultz-Sous-Forêts avec pour objectif de forer 2 puits profonds atteignant le socle granite et une température supérieure à 200°C, avant de connecter ces deux ouvrages en créant un échangeur thermique artificiel (réseau de fractures) par fracturation hydraulique. Il s'agissait du concept dit Hot Dry Rock (HDR, Figure 31).

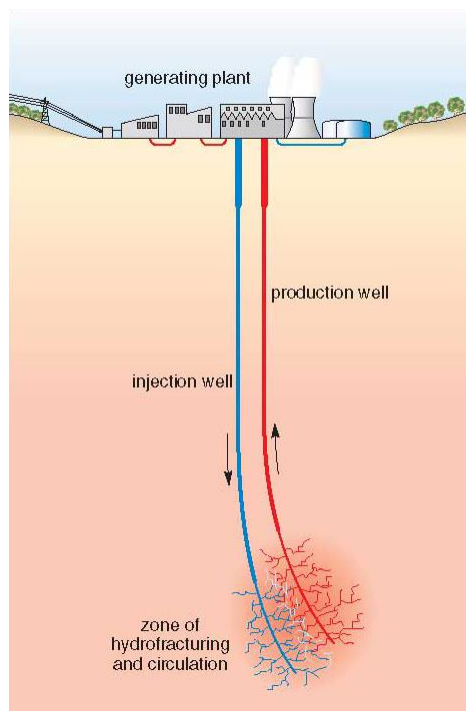


Figure 31 : Principe du modèle de géothermie profonde dit Hot Dry Rock (HDR) (Source : The Open University).

Les nombreux forages exploratoires réalisés pour le projet de Soultz-Sous-Forêts ont permis d'identifier pour la première fois la présence de failles atteignant et s'ancrant dans le socle granitique cristallin. Ces failles renfermaient une saumure chaude et fortement minéralisée. Cette découverte fut à la source de la modification de stratégie afin de pouvoir exploiter cette ressource sans recourir à la technique de fracturation hydraulique synonyme d'une forte sismicité induite (Charléty et al. 2006) et Charléty et al. 2007)) et de s'orienter vers une production en boucle fermée de cette saumure, naturellement en place dans le sous-sol, via des forages intersectant les zones de failles (Figure 32, Figure 33). On parle alors de géothermie EGS pour Enhanced Geothermal System. ECOGI, sur le ban communal de Rittershoffen, étant l'un des projets représentant cette technique d'exploitation.

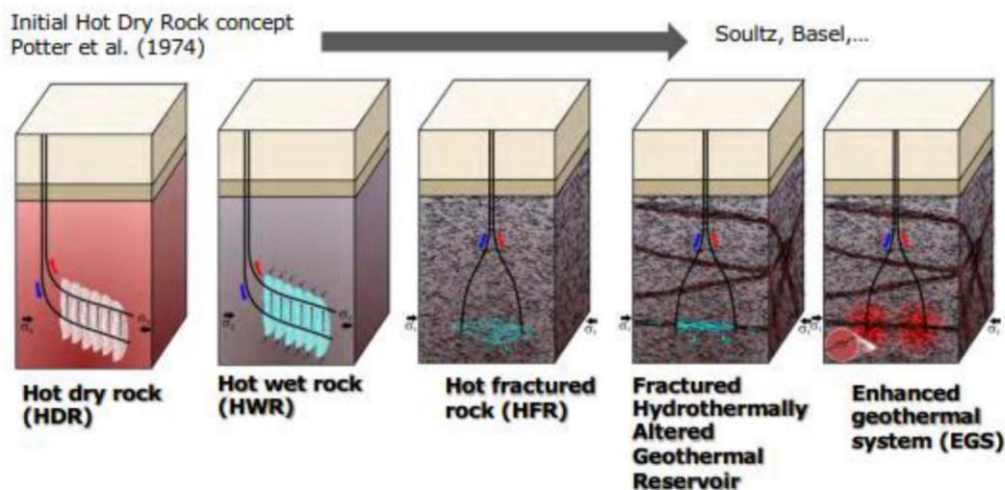


Figure 32 : Évolution des modèles d'exploitation des gisements hydrothermaux de l'HDR à l'EGS (Source : Genter 2021, d'après S. Wiemer, 2018).

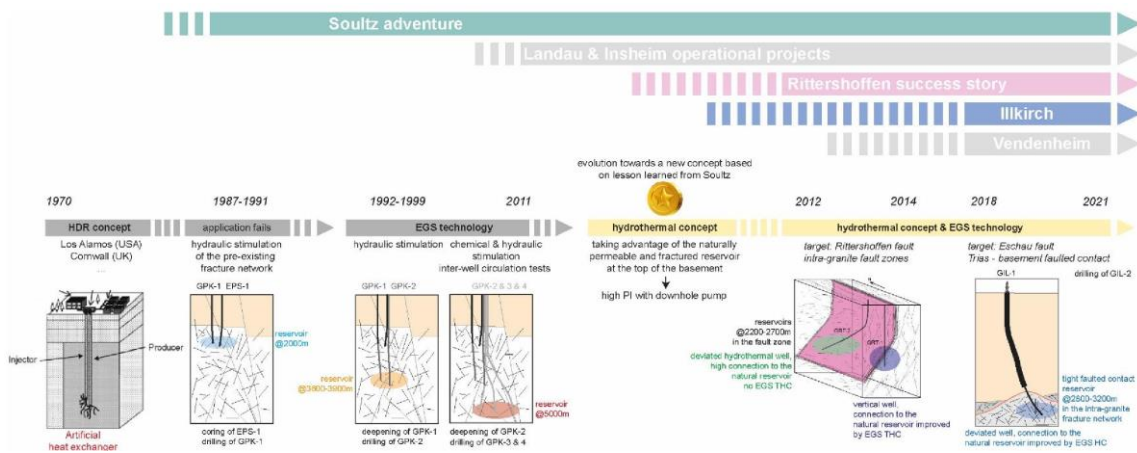


Figure 33 : Correspondance entre le développement des projets géothermiques du Fossé Rhénan et l'évolution du concept d'exploitation de la ressource géothermique (Source : Glaas 2021).

Confirmant les premières analyses géochimiques réalisées sur les saumures de Soultz-sous-Forêts, les saumures de Rittershoffen présentaient une forte similarité et en particulier une teneur importante en lithium. Par ailleurs, un test d'interférence mené entre les sites de Rittershoffen et Soultz-sous-Forêts confirme la connexion des puits (Source : (Maurer 2019), chapitre 3.3.3.5) et permet donc de considérer, a minima, l'Alsace du Nord comme un gisement géothermique et de lithium d'environ 1 000 km² de surface. Cette extension spatiale peut même être étendue au

territoire de l'Eurométropole de Strasbourg par le biais de l'ancien forage de Cronembourg, dont les mesures géochimiques attestent d'une concentration en lithium de 212 mg/l (à 3 200 m de profondeur TVD), et plus récemment par les puits réalisés à Vendenheim et à Illkirch-Graffenstaden atteignant respectivement des concentrations de 200 mg/l (à 4 600m de profondeur TVD) et 168 mg/l (à 2 580 m de profondeur TVD).

Ainsi, l'étude exhaustive des forages ayant des analyses géochimiques permettent d'inférer une certaine homogénéité géochimique de la saumure géothermale du centre du fossé d'effondrement (Figure 34).

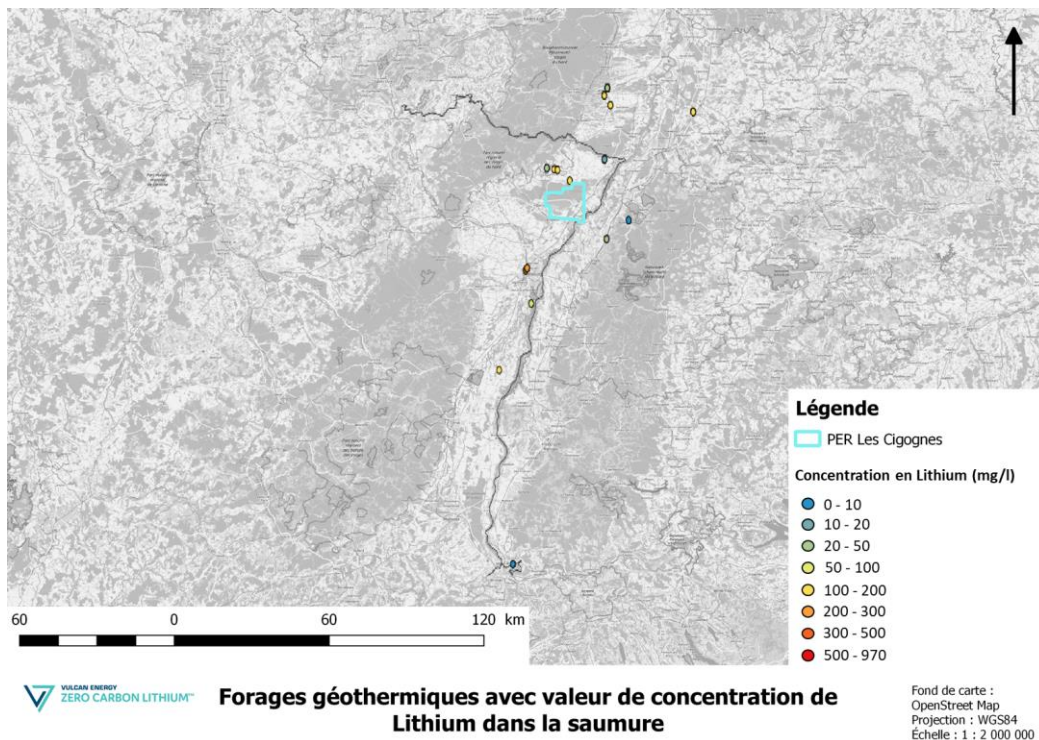


Figure 34 : Localisation des puits géothermiques pour lesquels une mesure de la concentration en lithium a été effectuée. (Source : Banque du Sous-Sol, (Sanjuan et al. 2016), (Pauwels et al. 1993), (Aquilina et al. 1997), (Bosia et al. 2021), (Dezayes et al. 2013), (Mundhenk et al. 2013))

A noter que ces analyses géochimiques ont été généralisées côté allemand afin de qualifier le potentiel de production de lithium sur tout leur territoire national. On observe, là encore, des concentrations similaires dans la continuité côté germanique du Fossé Rhénan (Figure 35).

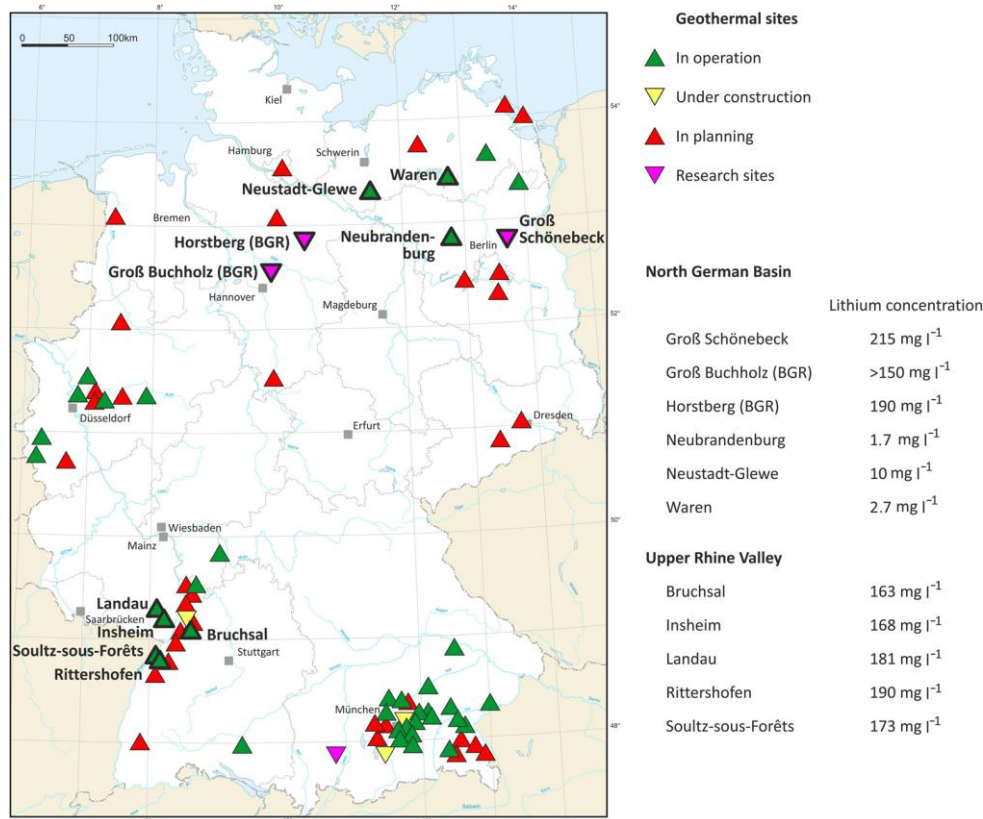


Figure 35 : Mesure de concentration en lithium sur les sites géothermiques allemand (Source : (Watzel 2022), Geothermal Information System GeotIS, (Agemar et al. 2014), (Sanjuan et al. 2016))

Par ailleurs, le suivi géochimique pluriannuel réalisé sur les puits géothermiques de Soultz-sous-Forêts et de Rittershoffen permettent également de garantir l'existence de ce gisement de lithium car aucune variation notable de la concentration en lithium n'a été observée (Figure 36) et ceux malgré une production annuelle de saumure atteignant jusqu'à 2 millions m³.

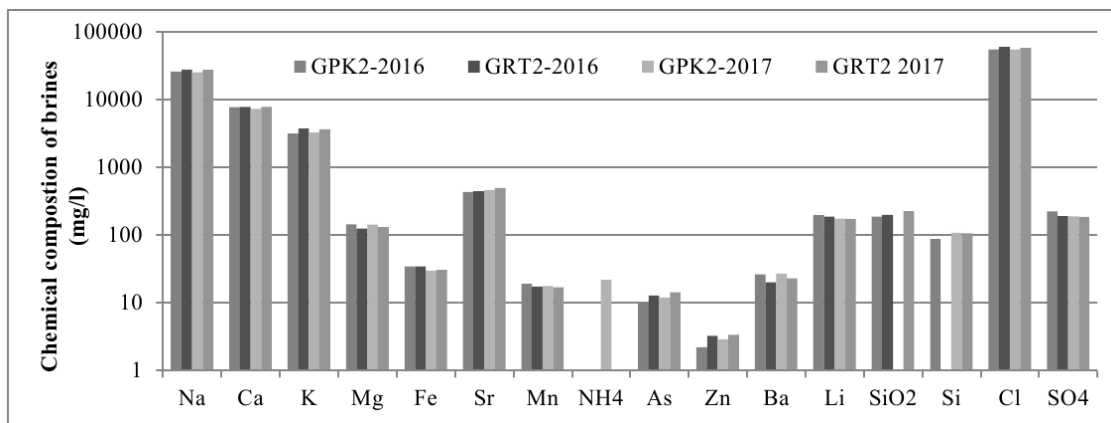


Figure 36 : Suivi géochimique des saumures géothermales des projets de Soultz-sous-Forêts et de Rittershoffen. (Source : (Mouchot et al. 2018))

A l'instar des hydrocarbures, les modèles géochimiques montrent que des températures élevées, de l'ordre de 225°C (Source : (Sanjuan et al. 2016)) favorisent les processus d'altérations hydrothermales et probablement la libération du lithium dans les saumures géothermales. Par ailleurs, les modèles hydrogéologiques de circulation des saumures au sein du fossé proposent

qu'elle s'effectuerait des bordures avec une alimentation en eaux météoriques vers le centre du bassin en se chargeant en profondeur en minéraux avant de remonter vers les couches triasiques par le biais de réseaux de failles majeurs non-colmatées (Figure 37, Figure 39). Les formations du Keuper et du Lias (Jurassique) faisant office de cap rock, ces couches étant imperméables de par leurs faciès argileux.

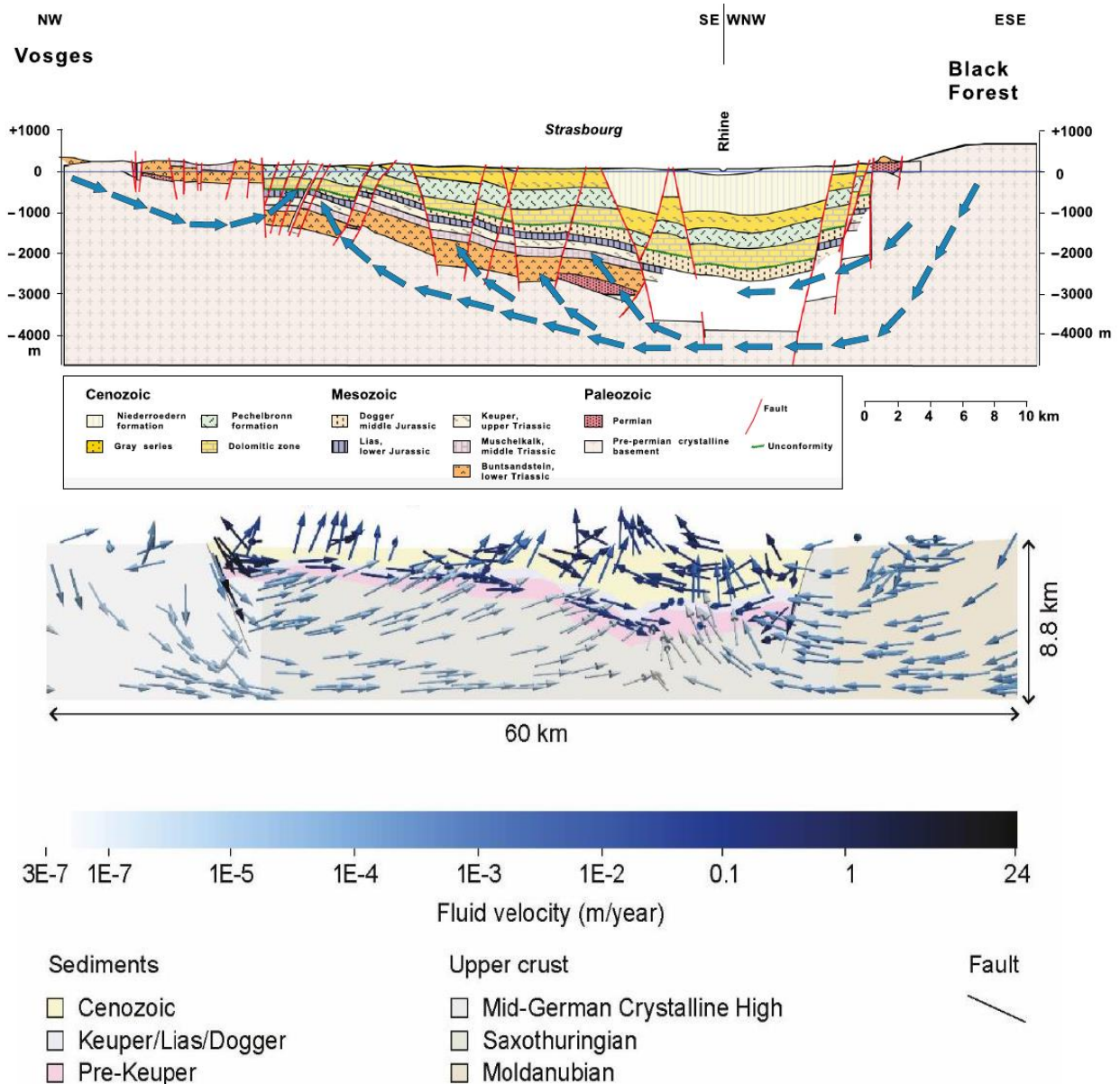


Figure 37: Modèle descriptif (en haut) et modélisé (en bas) de circulation hydrogéologique des saumures à l'échelle du Fossé Rhénan (Source : (Stober & Bucher 2015) et (Freymark et al. 2019)).

Grâce aux projets de Soultz-Sous-Forêts, de Rittershoffen et d'Illkirch-Graffenstaden et aux nombreuses diagraphies réalisées (Figure 38) ce modèle hydrogéologique a pu être détaillé au droit de ces sites.

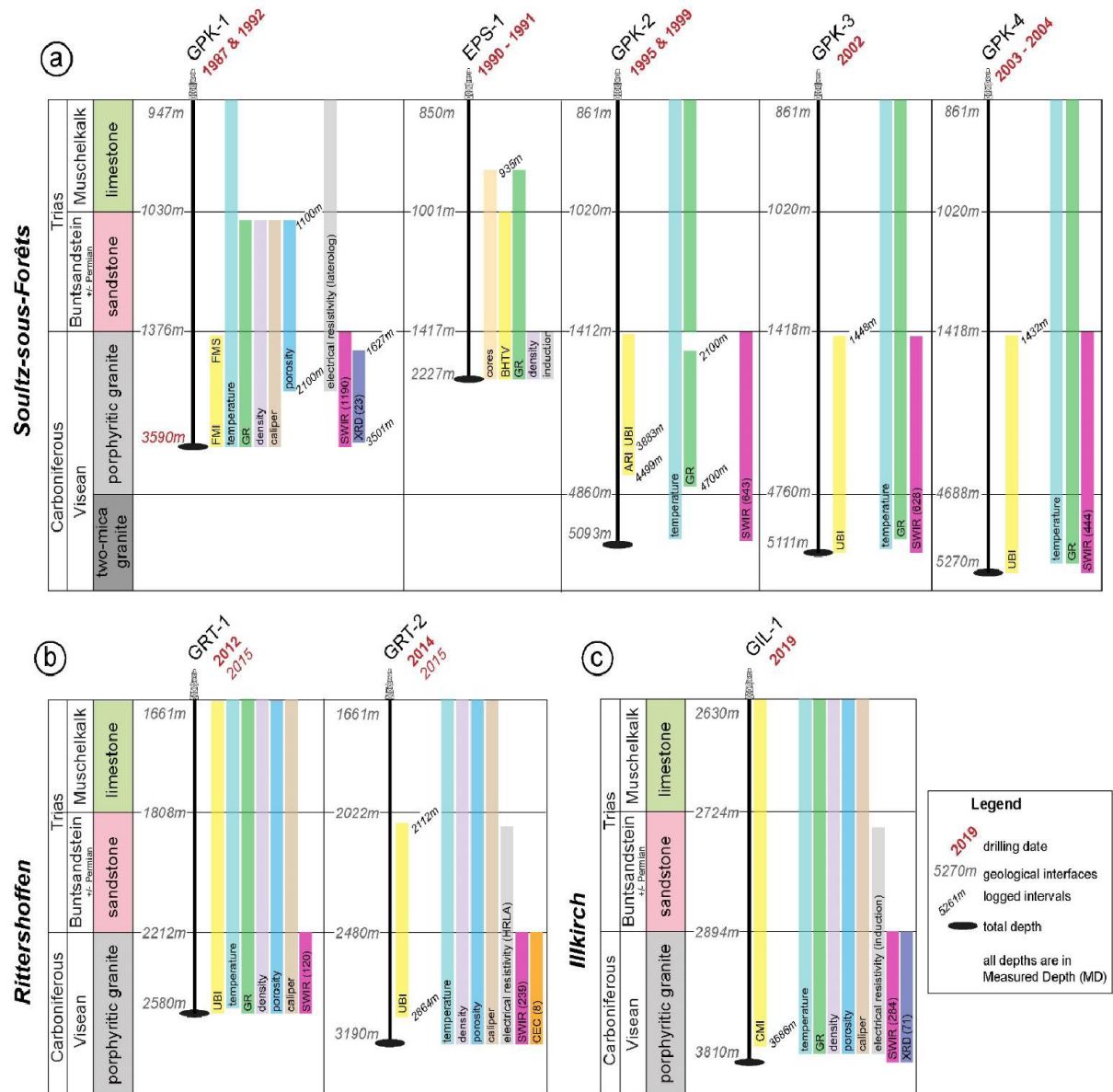


Figure 38 : Types et répartitions spatiales au sein des puits des diagraphies réalisées sur les projets géothermiques profonds d'Électricité de Strasbourg (Source :(Glaas 2021)).

En particulier, l'analyse de la fracturation et des failles productives a pu mettre en évidence trois potentiels réservoirs profonds au sein du Fossé Rhénan Supérieur que sont le Muschelkalk, le Buntsandstein et le socle granitique faillé. On retrouve dans le territoire d'Alsace du Nord des exemples de sites en opérations pour chacun de ces réservoirs. En effet, le Muschelkalk est l'horizon producteur dans le cadre des thermes de Morsbronn-les-Bains alors que le Buntsandstein et le socle granitique sont les zones productrices des projets géothermiques de Soultz-sous-Forêts et de Rittershoffen. Ainsi, des orientations préférentielles de failles ainsi que des portions contributives particulières du Muschelkalk et du Buntsandstein ont été identifiées permettant d'établir un modèle conceptuel plus élaboré de la circulation profonde des saumures géothermales (Figure 39).

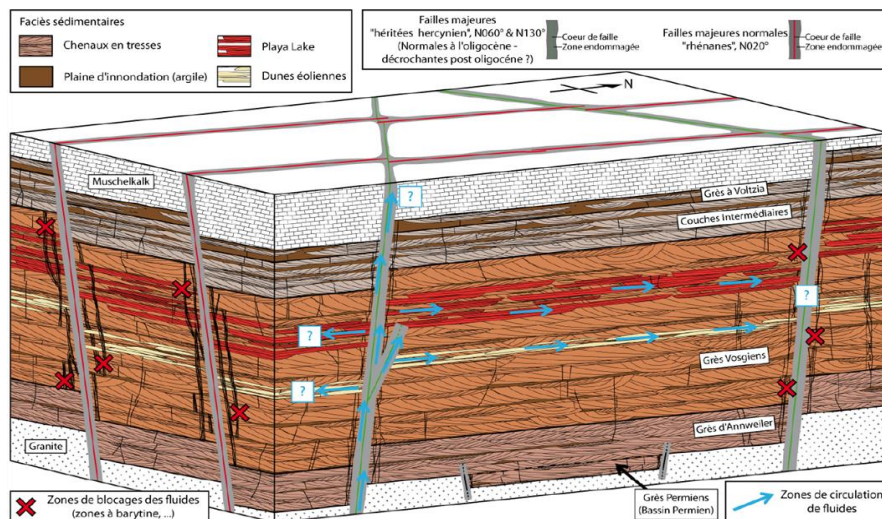


Figure 39 : Schéma illustratif de la circulation hydrothermale profonde des saumures au sein des failles et des couches triasiques (Source :Haffen 2012).

Comme détaillé dans le chapitre 5.2, la géologie de la zone d'intérêt s'inscrit dans un contexte structural plus complexe que de récents articles tendent à appréhender en termes de circulation hydrogéologique. En effet, l'interaction et la circulation entre différentes failles synthétiques et/ou antithétiques et les couches perméables triasiques rendent les modèles conceptuels nettement plus complexe (Figure 40).

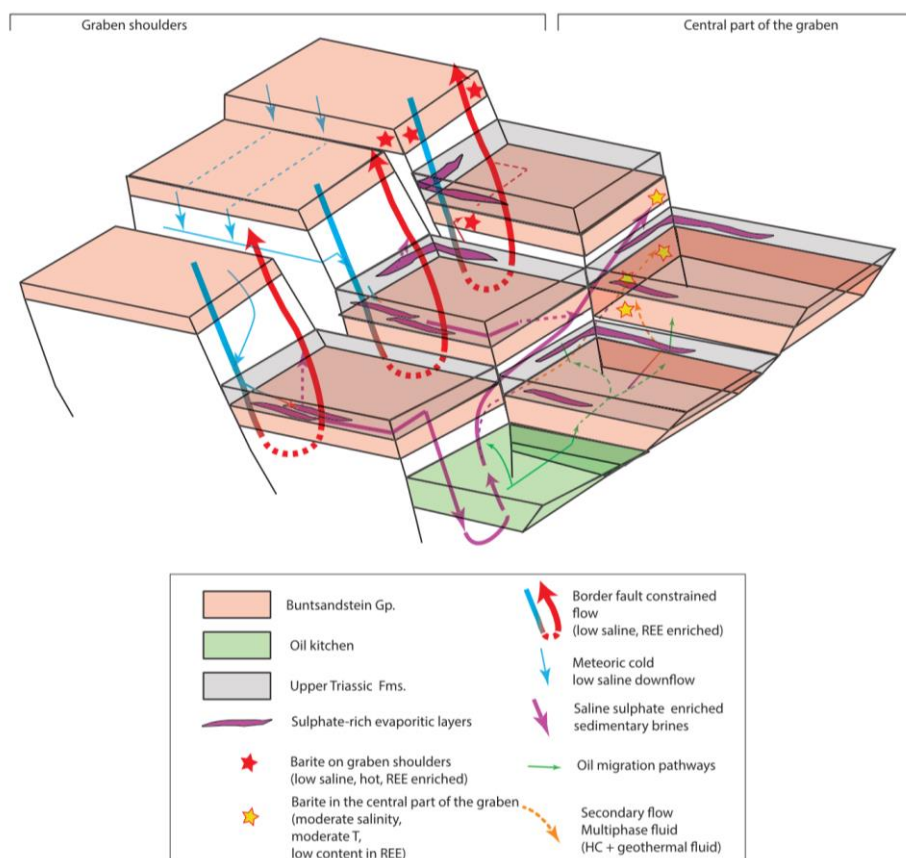


Figure 40 : Schéma conceptuel de la circulation des saumures géothermales dans un contexte de blocs synthétiques résultant de l'accommodation de la flexure du graben (Source : (Bossennec et al. 2021)).

Par ailleurs, des modélisations numériques intégrant le couplage entre les processus physiques, mécaniques, thermiques et hydrauliques (THM) ont tenté de reproduire les profils de températures des sites de Soultz-Sous-Forêts et de Rittershoffen afin d'affiner la compréhension des processus engendrant les particularités thermiques observées. Il a ainsi été établi que sous certaines conditions aux limites appliquées au modèle, apparaissait des boucles naturelles de convections ayant potentiellement une extension de l'ordre de 1 300 m (Figure 41).

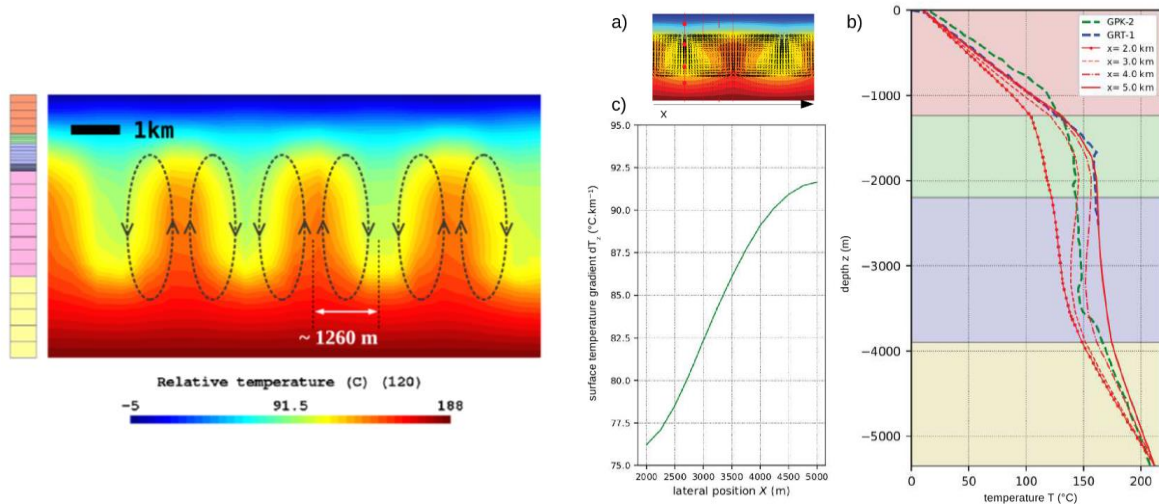


Figure 41 : (à gauche) Calcul du champ de température relative dans un maillage de 10 x 5 km faisant apparaître des boucles de convection dans un modèle à couches géologiques homogènes (Source : (Magnet et al. 2014)), (à droite) et correspondance entre des profils thermiques provenant des modélisations THM et les profils de températures observées dans les puits profonds de Soultz-Sous-Forêts et Rittershoffen dans (Vallier et al. 2020)).

Ces modèles numériques ont la particularité de ne pas intégrer la présence de failles pourtant nombreuses dans le Fossé Rhénan Supérieur et identifiées par les méthodes géophysiques de sismique réflexion. Une récente tentative de modèle THM incluant une faille majeure simulant le contexte structural observé au droit du projet de Rittershoffen semble conclure sur la faible contribution des failles dans le cadre de la perturbation du champ de température des boucles naturelles de convection thermique (Figure 42).

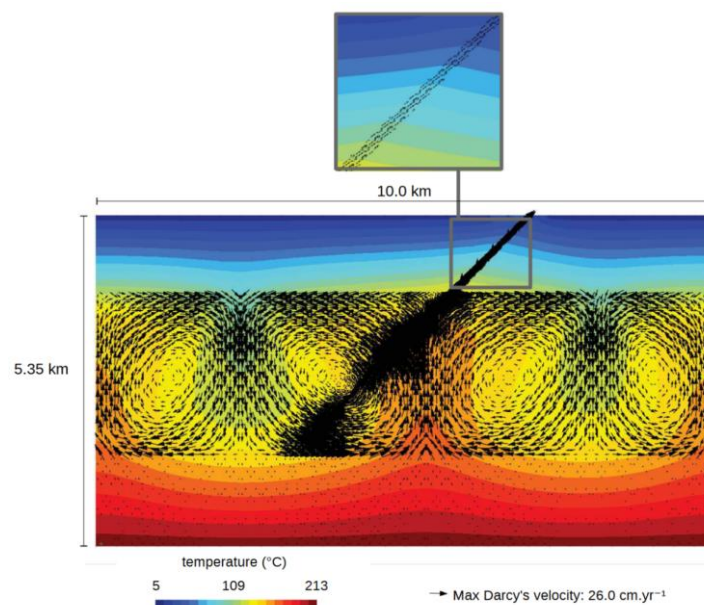


Figure 42 : Prise en compte d'une faille majeure de pendage 45° dans les modélisations numériques du champ de température au droit du projet de Rittershoffen (Source : (Vallier et al. 2020)).

Ces résultats théoriques sont à mettre en regard des observations terrains. En particulier, une étude des profils de températures (Maurer et al 2018) des puits situés de Sultz-Sous-Forêts a permis de mettre en exergue une forte variabilité du gradient thermique pouvant atteindre plus de 10% sur une distance linéaire de moins de 2 km (cas des forages 4601 et 4550, Figure 43 et Figure 44).

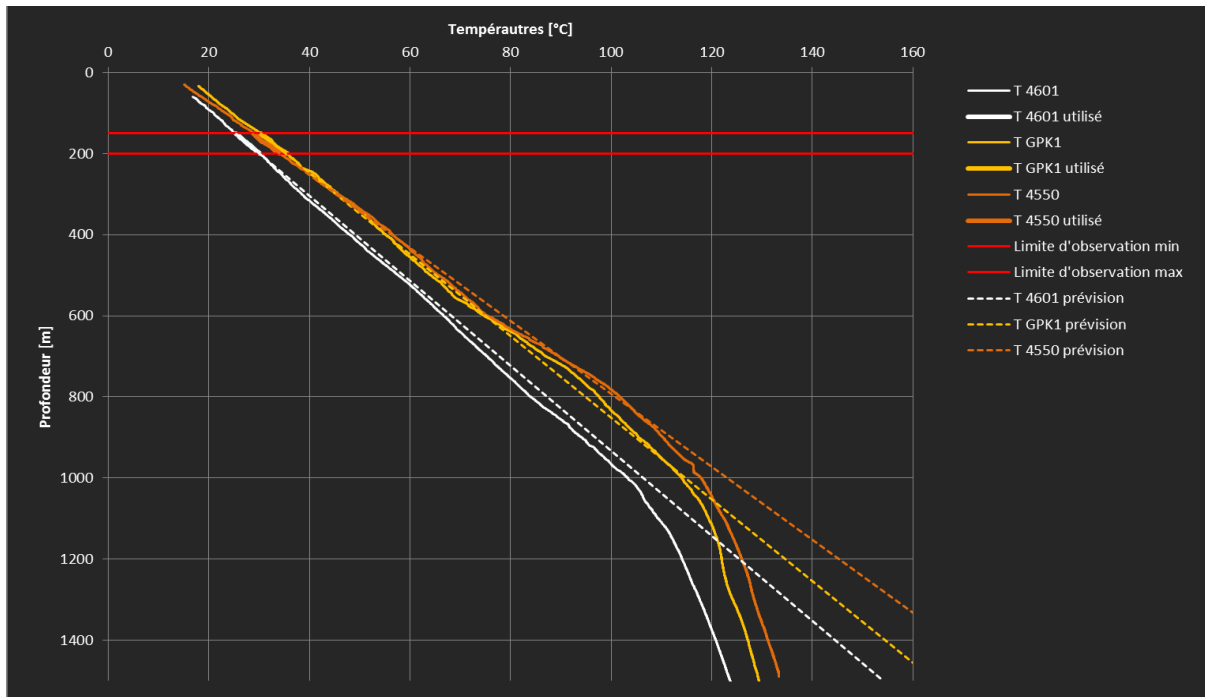


Figure 43 : Profils de températures pour 6 puits de Sultz-Sous-Forêts (Source : Maurer et al. 2018).

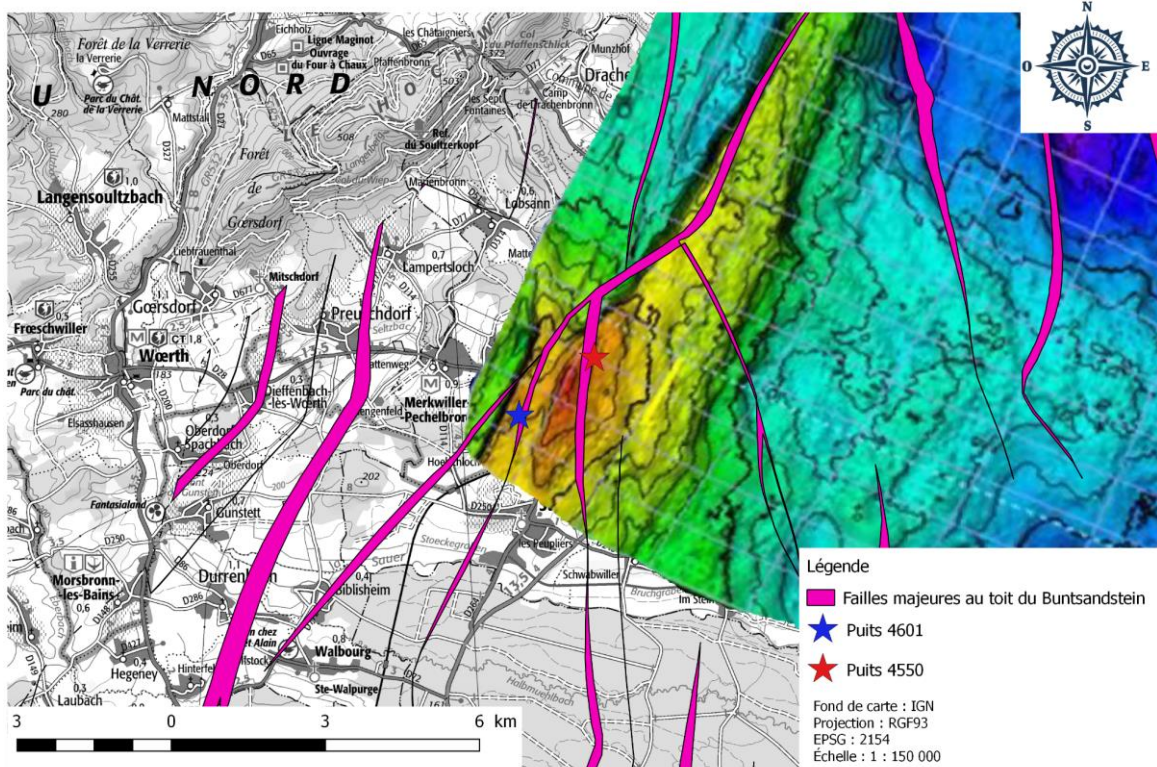


Figure 44 : Carte présentant la position de 2 puits de Sultz-Sous-Forêts présentant une variabilité de plus de 10% du gradient thermique et mise en correspondance avec les données structurales de la zone (Source : GeORG, (Richard et al. 2019), (Maurer et al. 2018)).

Cette variabilité peut d'ailleurs être observée à la seule considération des 200 premiers mètres du profil de température (Figure 43) de sorte qu'une campagne exploratoire s'est proposée de réaliser 7 forages de 200 m de profondeur (Figure 45) afin de cartographier la variabilité des profils thermiques par rapport aux structures géologiques connues. L'analyse comparative de ces 7 forages montre une forte variabilité du gradient géothermique allant de 6.3°C/100m à 7.6°C/100m mais n'apparaît pas nécessairement corrélée aux structures géologiques reconnues par la sismique vintage 2D et en particulier les failles majeures (e.g. le forage de gradient n°5, Figure 46). Ainsi, ces résultats ouvrent une perspective importante quant à l'exploitation du gisement géothermique et lithiné en permettant de ne plus uniquement considérer les accidents géologiques majeurs mais également les structures s'inscrivant dans des corridors de failles.

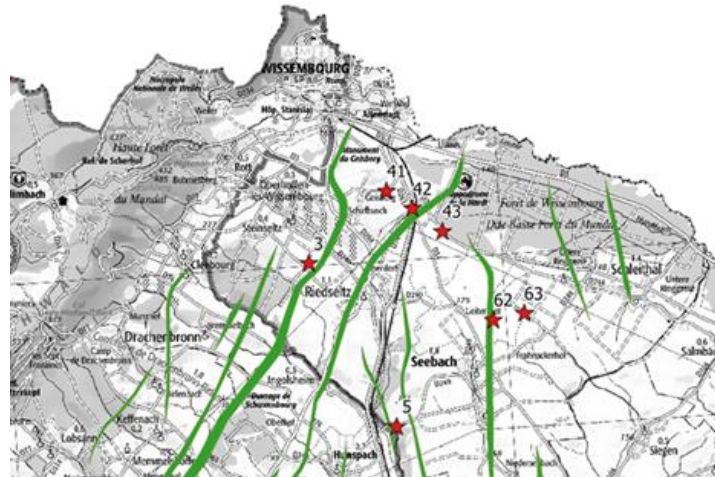


Figure 45 : Localisation des 7 forages de gradient réalisés par Électricité de Strasbourg en Alsace du Nord (Source : (Maurer et al. 2018)).

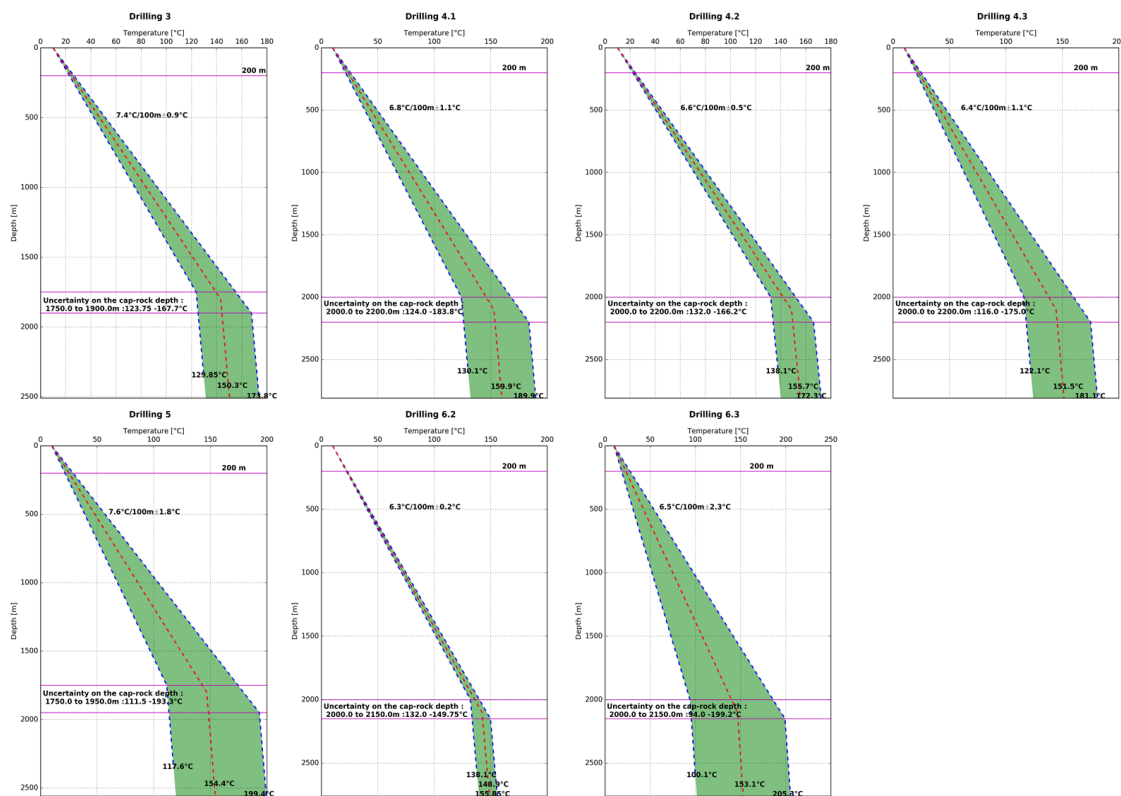


Figure 46 : Profils de températures de 7 forages de gradient sur les 200 premiers mètres et leurs extrapolations jusqu'à la cible géothermique (Source : (Maurer et al. 2018)).

4.1 Roche mère du lithium géothermal

Si leur pertinence en termes de production de chaleur n'est plus à démontrer (Muschelkalk à Morsbronn-les-Bains, Buntsandstein et socle granitique fracturé à Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen), il convient cependant de se questionner plus spécifiquement quant au potentiel en termes de production de lithium de ces trois aquifères.

Un premier constat peut être établi au regard de l'homogénéité de la concentration en lithium géothermal ne serait-ce que dans la partie centrale du Fossé Rhénan Supérieur avec des lithologies et des zones productrices pouvant sensiblement varier d'un projet à l'autre (Figure 47).

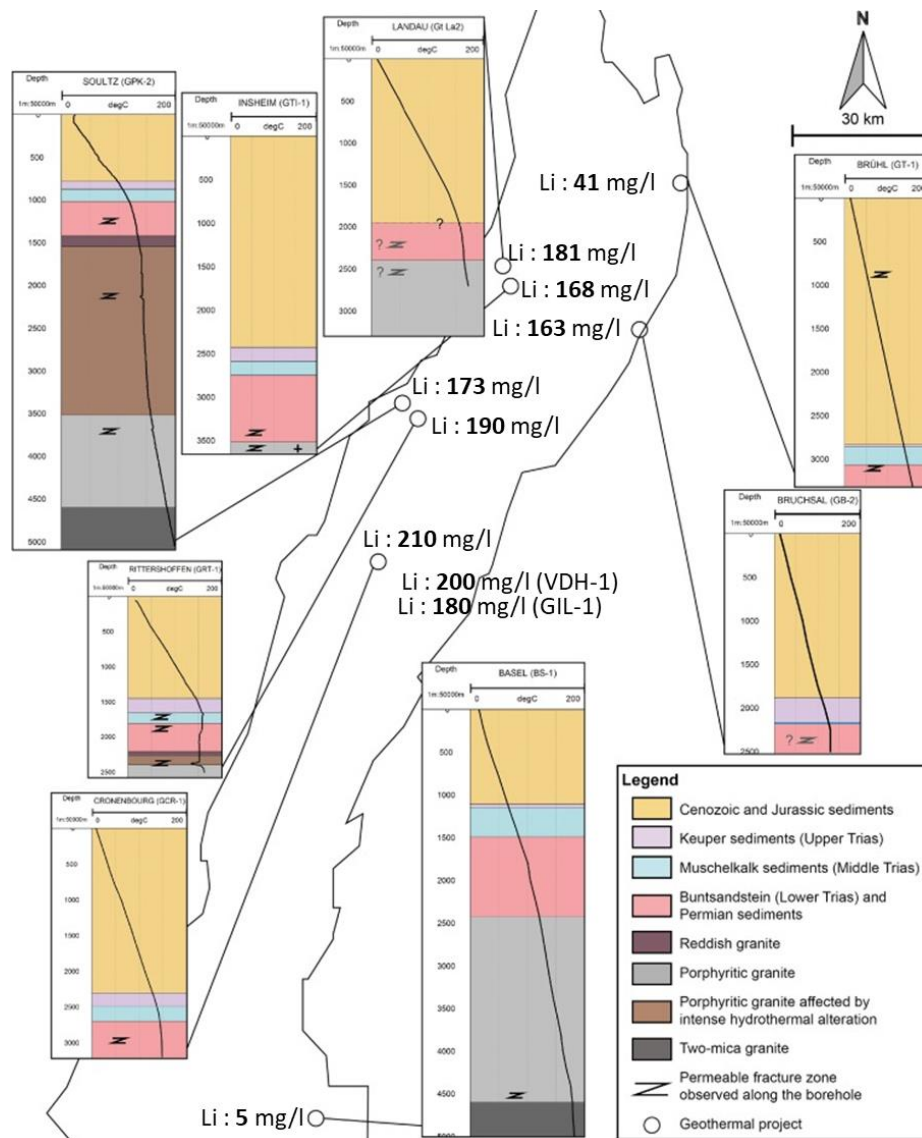


Figure 47 : Carte de la localisation des projets géothermiques du Fossé Rhénan Supérieur comprenant : coupe géologique, profil de température, zones perméables et concentration en lithium. (Source : modifié d'après (Vidal & Genter 2018))

Les projets ayant des forages atteignant profondément le granite (e.g. Soultz-sous-Forêts et Vendenheim) ne présentent pas des concentrations (respectivement 173 mg/l et 200 mg/l) notablement différentes des projets s'étant restreint à l'interface socle-sédiments (e.g. Rittershoffen, Landau, respectivement 190 mg/l et 181 mg/l). Ainsi, certains autres projets se sont même limités aux couches triasiques (e.g. Cronenbourg, Bruchsal) avec, là encore, une variabilité de

la concentration en lithium peu marquée (respectivement 210 mg/l et 163 mg/l). A noter que pour l'intégralité de ces projets, l'horizon géologique du Muschelkalk n'a jamais été testé ni même considéré comme aquifère car présentant des températures trop faibles dans le cadre de production d'électricité ou de hautes calories.

De nombreuses études se sont attelées à identifier, au sein de ces formations géologiques, la possible source minéralogique et le principal mécanisme physico-chimique conduisant à une forte concentration en lithium. Il apparait de l'analyse systématique des données minéralogiques, isotopiques et géothermométriques du Fossé Rhéna Supérieur que la principale source du lithium serait les micas blancs ainsi que la dissolution de la biotite. Le processus de formation serait principalement contrôlé par la forte température au sein du réservoir profond du fossé. Le Buntsandstein, et dans une moindre mesure le socle granitique, serait le lieu préférentiel pour ce processus ((Sanjuan et al. 2022)). La part contributive des 2 roches mères, Buntsandstein et socle granitique, reste encore sujet à discussion ((Drüppel et al. 2020)).

4.1.1 Source granitique

Concernant le socle granitique, plusieurs études attestent la présence de ces minéraux dans des sections ouvertes des puits de Soultz-sous-Forêts (GPK-3 et GPK-4) au niveau d'un monzogranite entre 2 100 et 3 500m de profondeur puis dans un granite profond entre 4 500 et 5 230m, où l'on retrouve des microgranites à 2 micas ((Vidal & Genter 2018)).

Ainsi, il apparait que le type de granite composant le socle revêt une importance particulière quant au fait qu'il puisse contribuer à l'enrichissement de la saumure en lithium. Or, les variétés de granites sont nombreuses dans le Fossé Rhéna Supérieur ((Dubois & Dubois 1955)) et doivent en partie leur origine aux roches mères qui ont été en contact avec le magma granitique. « D'une manière générale, on reconnaît dans les Vosges centrales l'existence d'un vaste massif de granites à grands cristaux et de composition chimique peu variée, indiquant une digestion parfaite et profonde des roches encaissantes par le magma granitique, et une cristallisation tranquille, le granité des crêtes à grands cristaux de feldspath orthose en est le type dominant. Les diverses autres variétés de granites à structure plus finement grenue sont en général périphériquement disposées au Sud, et plus encore au Nord, de la masse de granites centraux. Il en est de même des granites à minéraux particuliers, notamment des granites à amphibole dus à la digestion par le magma granitique des marnes, calcaires et dolomies, ou de roches volcaniques préexistantes, elles-mêmes riches en éléments calco-magnésiens. De tels granites passent à des granodiorites, et surtout à des diorites quartzifères ; celles-ci ne constituent que des massifs peu étendus, parfois des filons laccolithiques. Les granulites ou granites à mica muscovite et les filons de pegmatite qui leur sont liés paraissent être tardifs en général. Ces granulites sont fréquentes parmi les gneiss de la zone axiale schisto-cristalline, résultant peut être ici de la magmatisme des roches micacitiques à mica blanc anté-hercyniennes (gneiss et micaschistes) » ((Dubois & Dubois 1955))

Des expériences en laboratoire ont permis d'observer les réactions de dissolution des granites / monzonites avec des fluides riches en NaCl à des températures entre 70°C et 200°C révélant des processus d'échanges chimiques lors de la dissolution des feldspaths (Si, Al, K, Ca, Na, Ba, Sc, Pb, Sr, Rb, and Eu) et des biotites (K, Cl, Fe, Mn, Mg, Cu, Zn, Cr, **Li**, Sc, and V) ((Drüppel et al. 2020), Figure 48).

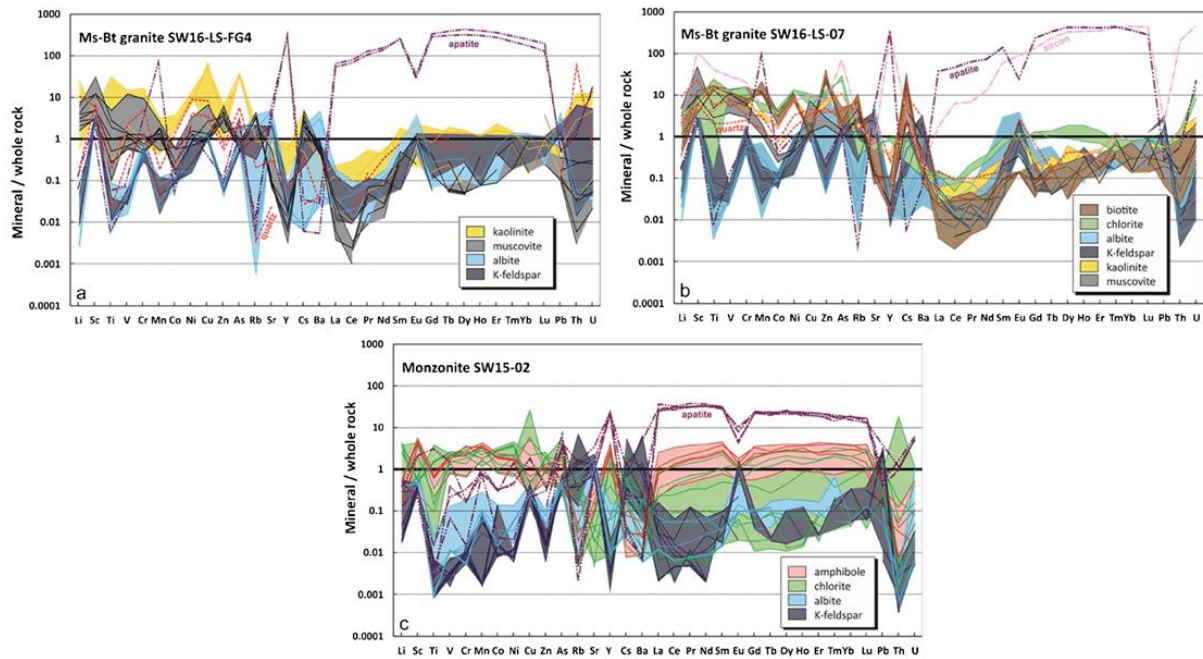


Figure 48 : Éléments traces au sein de granites muscovite-biotite (a et b) et de monzonite (c). (Source : Drüppel et al., 2020)

Dès lors, le lithium libéré par dissolution des minéraux granitiques est à nouveau partiellement immobilisé par précipitation des phases d'altération (smectite/chlorite et illite). Les auteurs concluent dès lors que les corrélations de Li, Mg et K observées dans les fluides indiquent que la biotite est la principale source de lithium dans les eaux cristallines profondes du sous-sol ((Drüppel et al. 2020)) à la différence d'un processus ayant principalement lieu au sein des couches triasiques du Buntsandstein ((Sanjuan et al. 2022)). Pour ce faire, ils comparent le profil des courbes de concentrations des éléments présents dans de la saumure géothermale et celles issues des expériences de dissolution en laboratoire qui ne concerne que des granites sans interaction avec des couches gréseuses (Figure 49).

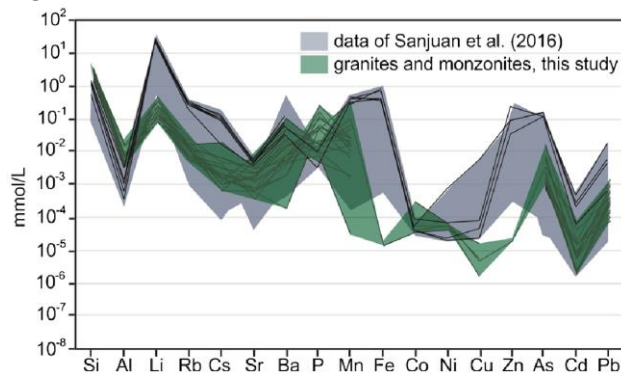


Figure 49 : Comparaison des concentrations des éléments de dissolution entre des saumures géothermales et des eaux de laboratoires provenant uniquement de processus de dissolution à forte température. (Source : (Drüppel et al. 2020))

4.1.2 Source triasique

En considérant biotite et muscovite/illite comme possible sources initiales du lithium géothermal, il apparaît effectivement que le grès triasique soit une source probante pour expliquer la présence de lithium dans les saumures géothermales. Ainsi, dès les années 1990, un recensement des puits atteignant le Trias ainsi que les concentrations en Na, Li, SiO₂ et Ca a été mené (Figure 50).

	Temp. °C	Na mg/l	Li mg/l	SiO ₂ mg/l	Ca mg/l
KEUPER DU BASSIN DE PARIS					
ACHERE 1	78,6	29657	35,5	30	6832
ACHERE 2	78	30117	35,0	47	6376
CERGY	77	28048	28,0		7060
MELLERAY	73,9	11035	10,6	37	1236
CHEMERY	54	13334	2,4	25	59
ROMORANTIN	64	1149	1,4	29	35,8
CHAUNOY	105	32646	44,5		7200
VERT LE GRA		20231	33,3		
MONTARGIS 1	105	31036	50,0	39	5280
MONTARGIS 2	95	25519	34,0	42	2638
MONTARGIS 3	80	17242	17,0	42	1340
RHETIEN DU BASSIN DE PARIS					
COURDEMANGE	80	48279	11,1	31,9	3200
GRANDVILLE E	92	48279	13,2	36,3	2600
GRANDVILLE	92	64831	16,5	42,5	3100
ST JUS SAUV.	80	80464	23,5	46,9	3600
SOUDRON	87	66900	18,9	34,4	2900
TRIAS ALSACIEN					
46-46 al 1	123	28048	141,6	110	6920
CRONENBOURG al 2	160	32186	220,0	235	4600
LES HELIONS		5200	29,6	37,4	1508

Figure 50 : Composition chimique des fluides géothermaux du Trias français. (Source : (H. Pauwels 1991))

On pourra en particulier considérer la formation triasique du grès à Voltzia dont la fraction fine est dans bien des cas constitués d'illite pure. Les échantillonnages de cette formation ne montrent pas de variation en termes de sa composition chimique. Cependant les teneurs en B, Li, Rb, Cr et Sr semblent dépendre du faciès qu'il soit gréseux, dolomitiques ou argileux (Figure 51 et Figure 52).

	Tranches granulométriques (μ)						
	250–315	200–250	160–200	125–160	100–125	80–100	63–80
Muscovites (%)	93	84	69	56	40	57	53
Biotites (%)	7	16	31	44	60	43	47

Figure 51 : Composition de la phase micacée en fonction de la granulométrie d'une psammite. (Source : Mosser et al., 1972)

	Valeurs données en %											Valeurs données en p.p.m.											I	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Mn ₂ O ₄	TiO ₂	Fe ₂ O	K ₂ O	Perte à 1000°C	Sr	Ba	V	KI	Co	Cr	B	Zn	Ga	Cu	Pb	Li	Rb		Fe ₂ O ₃ total: extérieur + intérieur au réseau
Bancs gréseux	Nombre d'éch. analysés	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	35	35	37
	Moyennes	54,8	23,8	2,6	0,5	0,044	0,93	0,14	8,46	4,95	166	357	175	73	5	82	172	< 5	36	58	14	89	198	10,1
	Ecart types	1,4	1,1	0,2	0,2	0,022	0,32	0,06	0,47	0,43	43	130	38	33	4	56	29	5	5	47	17	13	18	4,6
	Maxima	59,5	26,0	3,1	1,1	0,15	1,92	0,45	9,1	6,1	290	740	265	175	15	230	235	28	47	235	65	105	235	21,5
	Médianes	54,8	23,7	2,6	0,5	0,035	0,85	0,15	8,55	4,9	160	300	165	65	5	75	165	< 5	37	45	5	88	195	7,5
Minima	52,0	21,0	2,1	< 0,2	0,025	0,65	< 0,10	6,9	3,9	90	180	105	35	< 2	< 5	135	< 5	27	15	< 2	67	175	4,5	
Bancs de grès dolomitiques	Nombre d'éch. analysés	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	-	7	7	7	5	5	7	
	Moyennes	53,2	23,2	2,8	0,8	0,568	0,52	0,14	7,34	7,57	235	923	164	63	38	181	257	-	37	259	53	75	214	13,4
	Ecart types	3,1	2,7	0,6	1,0	0,539	0,11	0,12	0,41	0,98	59	566	27	23	16	37	79	-	9	207	34	10	27	3,8
	Maxima	54,9	25,9	3,5	3,0	1,58	0,72	0,38	7,95	9,36	355	2129	201	95	72	246	337	-	53	665	113	84	249	17,5
	Médianes	52,0	23,1	2,6	0,6	0,250	0,48	0,14	7,19	7,12	210	704	164	54	31	181	272	-	35	185	44	75	223	14,5
Minima	50,0	17,9	1,7	< 0,2	0,062	0,38	< 0,10	7,02	6,64	172	430	121	40	24	135	145	-	27	70	23	58	186	6,5	
Lentilles argileuses	Nombre d'éch. analysés	56	56	56	56	56	56	56	56	46	48	56	56	56	49	55	33	53	55	48	41	28	56	
	Moyennes	51,8	26,3	2,9	0,4	0,065	0,51	0,18	8,10	6,23	212	505	183	73	14	154	298	9	42	78	58	99	255	6,3
	Ecart types	0,8	0,7	0,3	0,3	0,110	0,14	0,10	0,36	0,55	49	139	29	41	13	77	10	9	6	76	42	17	37	2,2
	Maxima	54,8	27,5	4,2	2,3	0,65	0,75	0,33	9,6	9,6	290	1100	255	215	49	290	375	35	61	350	337	175	365	13,5
	Médianes	52,0	26,4	2,9	0,4	0,035	0,50	0,15	8,35	6,1	210	500	185	55	11	130	295	6	41	75	35	98	255	5,5
Minima	48,2	23,6	2,5	< 0,2	0,025	0,25	< 0,10	6,9	5,6	110	260	125	25	< 2	50	255	< 5	27	15	< 2	75	175	4,5	

Figure 52 : Concentration en éléments chimiques présents dans les illites en fonction du faciès gréseux, dolomitique ou argileux. (Source : (Mosser et al. 1972))

Enfin, on retrouve également une composition minéralogique comprenant des muscovites/illites au sein du Muschelkalk mais dans une moindre mesure au regard du Buntsandstein (Figure 53).

Lithostratigraphic unit	Formation	True vertical depth (m)	Box number	Anhydrite	Dolomite	Siderite	Calcite	Quartz	K-feldspar	Muscovite/ illite	Pyrite
Middle Muschelkalk	Marnes Bariolées	938.5	6	-	86	-	3	7	1	3	-
Middle Muschelkalk	Marnes Bariolées	957	22	88	11	-	-	1	-	-	-
Lower Muschelkalk	Couches à Orbicularis and Schaumkalk complex	967	32	-	74	-	-	4	-	18	1
Lower Muschelkalk	Calcaires Ondulés	975	45	-	85	-	-	5	1	10	-
Lower Muschelkalk	Wellenmergel and Couches à Térébratules	988	59	-	26	3	-	45	10	16	-
Lower Muschelkalk	Wellenmergel and Couches à Térébratules	990	61	-	68	1	-	8	3	20	-
Buntsandstein	Grès à Voltzia	1001	76	-	1	9	-	58	3	29	-
Buntsandstein	Grès à Voltzia	1005.5	81	-	4	2	-	66	10	18	-
Buntsandstein	Grès à Voltzia	1006.5	82	-	11	4	-	46	4	35	-

Values in wt%

Figure 53 : Composition minéralogique du Muschelkalk et du Buntsandstein au droit du projet de Soultz-sous-Forêts (puits EPS1). (Source : (Heap et al. 2019))

Cette analyse de compositions minéralogiques, certes encore incomplète, permet de justifier elle aussi la pertinence de cibler en priorité des failles impactant toute la pile sédimentaire et s'ancrant dans le socle granite afin de maximiser la possible zone d'apport en lithium.

5 Justification de l'emprise sollicitée

5.1 Connaissances géologiques et structurales

5.1.1 Géologie du permis sollicité

Le permis sollicité se situe dans la partie sud du Fossé Rhénan Supérieur, côté français. Sur la figure ci-dessous (Figure 54) on observe que la géologie de surface est globalement très homogène sur l'ensemble du périmètre sollicité. Y affleure principalement les formations du Quaternaire : Holocène (q3 en bleu clair). En termes de formations sédimentaires, il s'agit principalement de formation fluviatile de type alluvionnaire (« alluvions actuelles et récentes rhénanes et des rivières du Ried ») de l'Holocène, avec également des cailloutis et des limons. En termes de lithologie on y trouve des sables, des graviers, des galets et de l'argile. Dans la partie sud on observe un peu de formation Oligocène (g en jaune clair). Ce sont principalement des terrains marneux avec quelques conglomérats et grès, comme nous l'avons analysé dans la section §4.1.

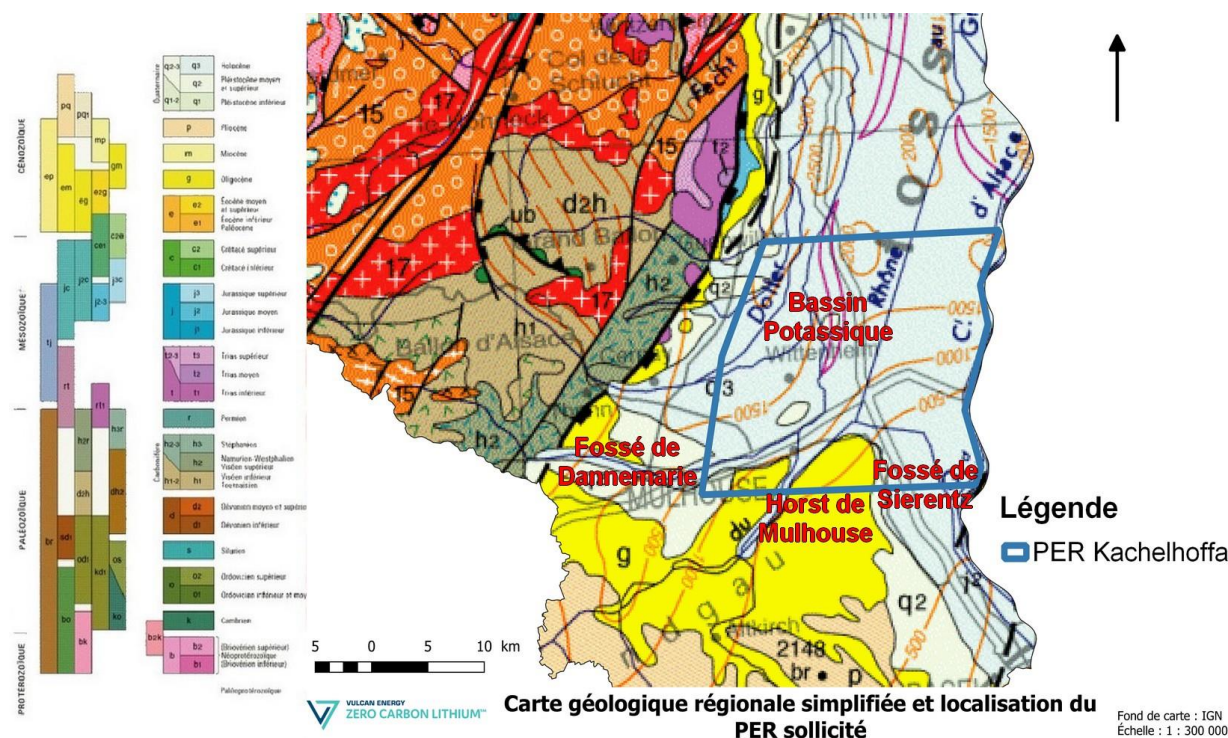
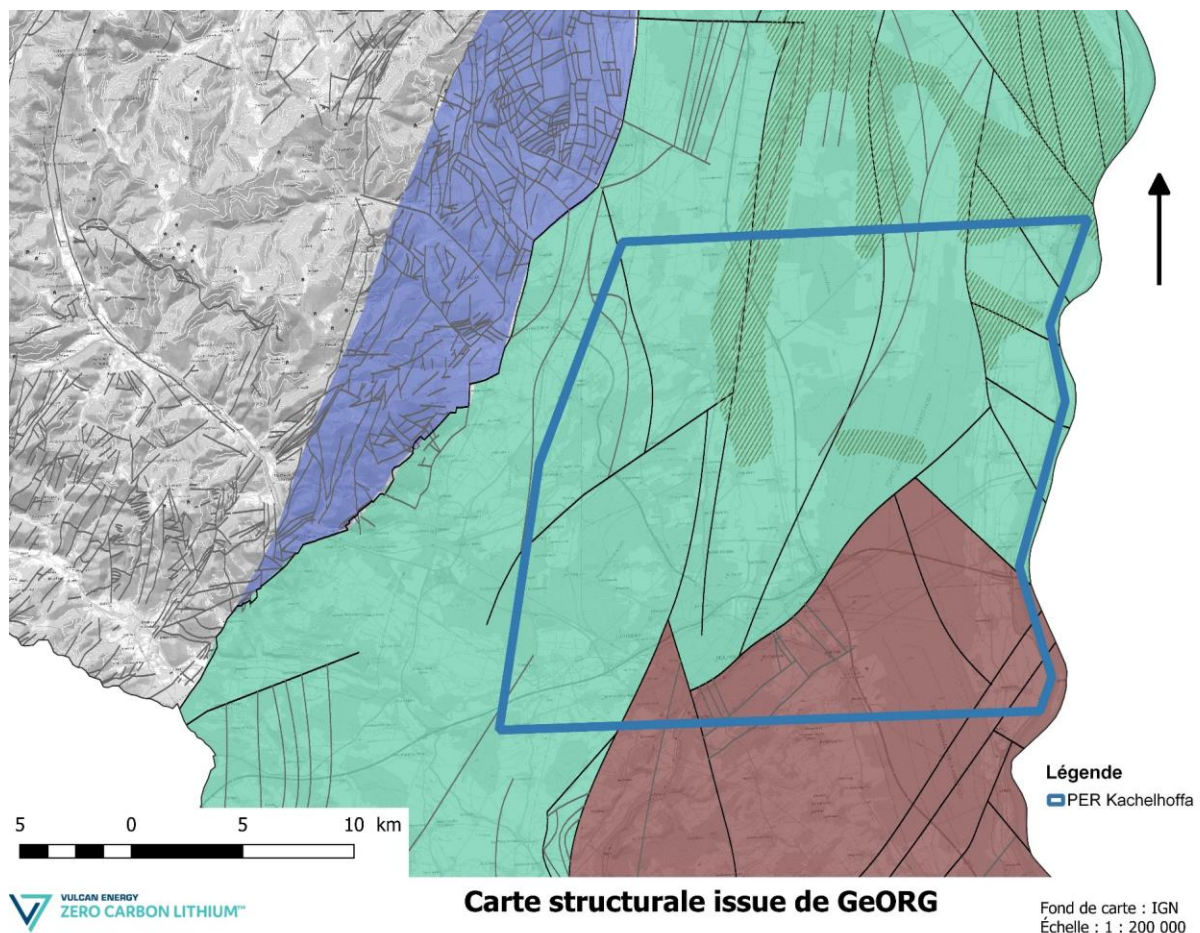


Figure 54 : Carte géologique simplifiée et situation du PER dit "Kachelhoffa minéral" (Source : BRGM).

Entre Ensisheim et Mulhouse se trouve le Bassin Potassique (Figure 54). Plus au sud de ce dernier, d'ouest en est on passe graduellement du Fossé de Dannemarjie au Horst de Mulhouse jusqu'au Fossé de Sierentz. Le périmètre sollicité est majoritairement constitué du Bassin Potassique.

En termes de structurale on observe dans le périmètre sollicité 3 grands secteurs : en violet le champ de fractures méridionaux, en vert la zone de failles d'Illfurth-Bruchsal et en brun le horst de Mulhouse (Figure 55). Dans le champ de fractures méridionaux de nombreuses failles orientés N-S, NE-SO, NO-SE, NNE-SSO et NNO-SSE se superposent et interfèrent entre elles dans un champ de fracture tectonique complexe (Source : GeORG). Les failles transversales orientées NE-SO et NO-SE descendent jusque dans le socle, tandis que les failles des structures de grabens et de horst, orientées NNE-SSO, prennent racine dans les couches salifères et d'anhydrites du Muschelkalk

moyen. La zone de cisaillement d'Illfurth-Bruchsal traverse et relie les parties centrales et méridionales du Fossé Rhénan Supérieur. Il s'agit d'une zone constituée d'un complexe de failles reliées entre elles par leur géométrie et par leur cinématique. En effet cette zone se compose de plusieurs failles parallèles ou reliées entre elles par des failles transversales nord-sud. En profondeur les failles occidentales plongent majoritairement vers l'est alors que les failles orientales s'inclinent vers l'ouest. Elles semblent toutes s'enraciner dans le socle. Vers le sud, cette zone, comparée au reste du fossé, est surmontée d'une couverture tertiaire très réduite et émerge par endroit sous forme de moyenne montagne constituée de roches mésozoïques.



L'ensemble des formations sédimentaires rencontrées par les puits présents au sein du secteur ont été décrites dans la section précédente §4.1. Dans la suite de ce rapport, nous allons simplement nous intéresser aux niveaux géologiques présentant des variations en termes d'épaisseur et/ou de faciès que nous pourrions trouver dans les puits sur le périmètre sollicité. Il s'agit des formations du Tertiaire, du Jurassique, du Trias inférieur, du Permien ainsi que le socle hercynien. Le Trias moyen et supérieur est globalement homogène.

- Les variations d'épaisseur des formations tertiaires (par subsidence et érosion)

Dans le secteur qui nous intéresse, il y a une variation très importante des formations tertiaires, comme c'est globalement le cas dans tout le Fossé Rhénan Supérieur. L'épaisseur de l'ensemble allant du Quaternaire à l'Éocène (jaune clair à orange foncé sur les logs ci-dessous issus de GeORG : Quaternaire, Pliocène, Oligocène, Éocène) ne mesure que 110 m dans le puits ILF-1 (à Illenheim) alors qu'il est épais de 1 763 m à BLO-1 (à Blodelsheim ; cf. Figure 56).

Dans le puits de Sainte-Croix-en-Plaine (SCR-101) et de Blodelsheim (BLO-1) on observe la présence de diapirs de sel, avec respectivement 800 m pour le premier et 1 100 m pour le second. Sur les 5 puits (Figure 56) ce sont les seuls à avoir intersecté les diapirs de sel. En effet, si on analyse la Figure 57 on observe bien la position de ces deux seuls puits sur les zones diapiriques.

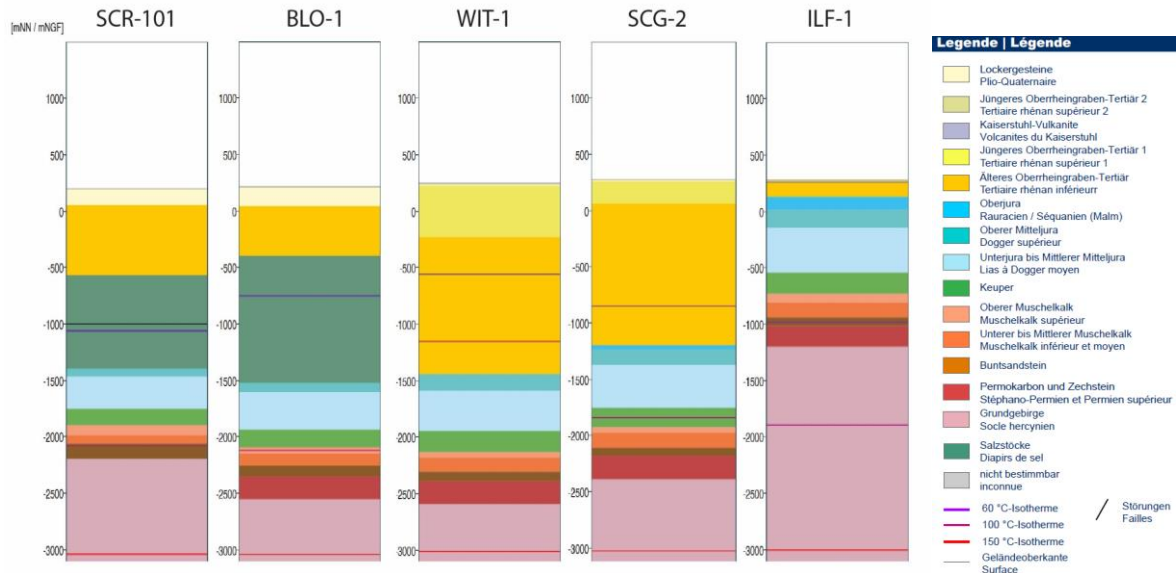


Figure 56 : Puits extrait de GeORG démontrant la variabilité importante des formations du tertiaire (Source : GeORG).

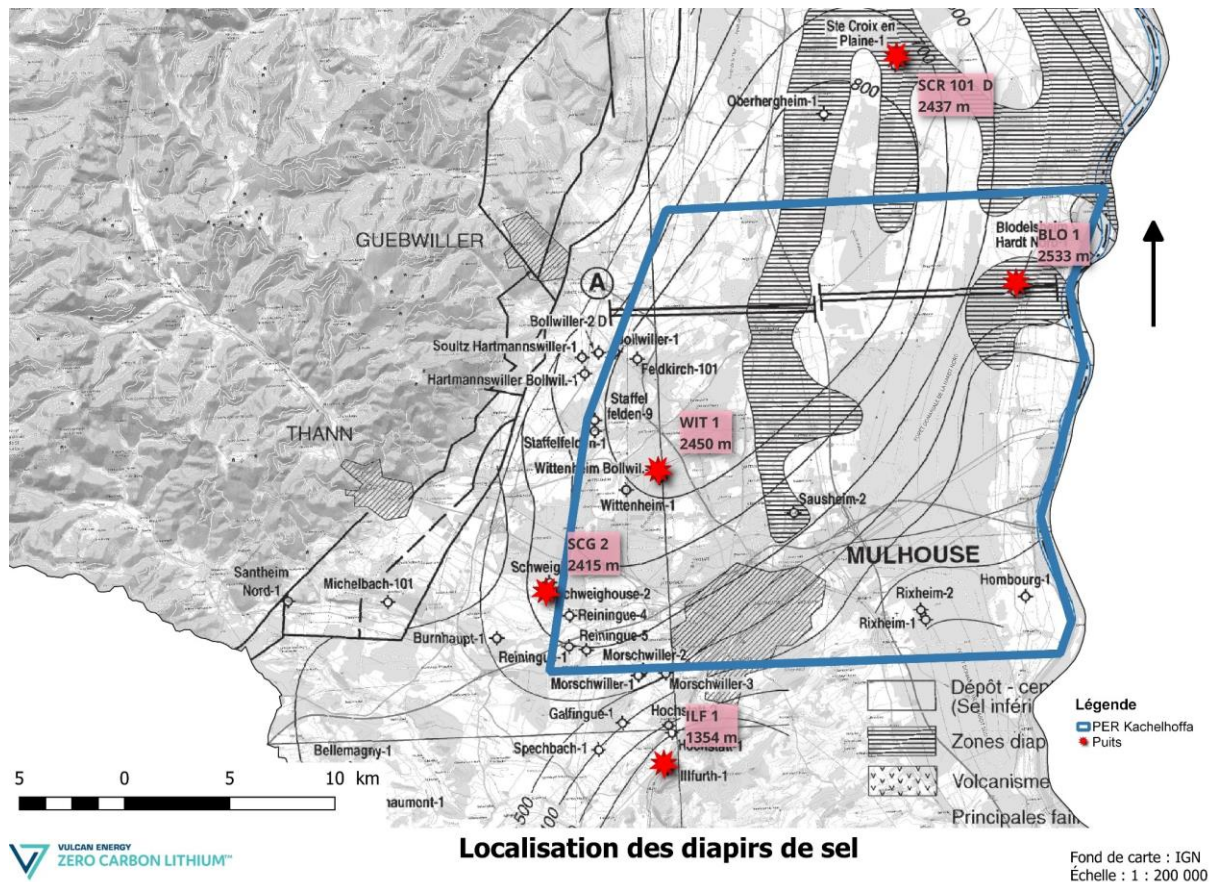


Figure 57 : Localisation du PER sollicité, des puits étudiés dans ce paragraphe : SCR-101, BLO-1, WIT-1, SCG-2 et ILF-1 ainsi que la position des diapirs de sel (Source : Wanesson, 1998).

L'édifice tectonique salifère, tel qu'il se présente aujourd'hui (Figure 58 et Figure 59) s'est construit dans la période post-chattienne et les failles sont post-sédimentaires.

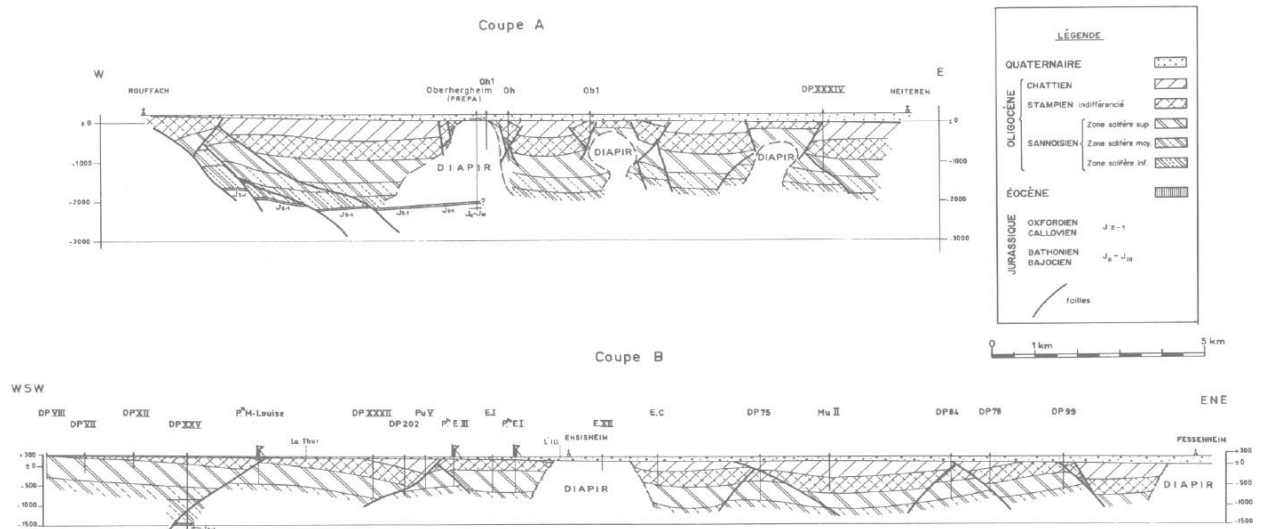


Figure 58 : Coupes transversales dans le bassin potassique de Mulhouse (Source : Courtot et al 1972).

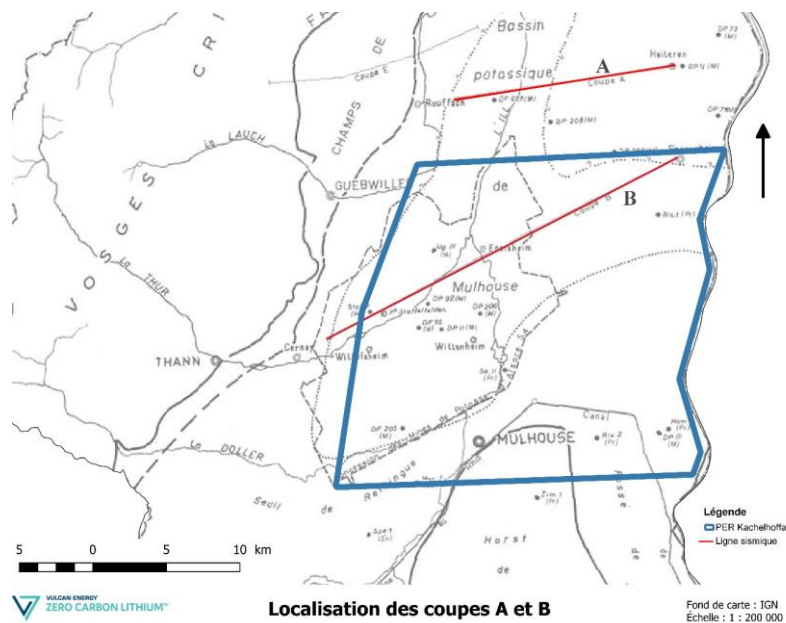


Figure 59 : Localisation des coupes transversales A et B (figure 39) par rapport au périmètre sollicité (Source : Courtot et al 1972).

Une attention particulière doit être portée concernant la position des diapirs de sel qui ne sont pas définis avec exactitude. En effet, sur l'analyse gravimétrique de Lutz (Lutz, 1999), 3 segments de diapirs ont été modélisés (en orange la carte de gravimétrie allant du jaune au bleu, cf. Figure 60). La partie nord étant la partie principale du diapir qui se divise vers le sud en deux branches. Si l'on compare avec l'analyse de Wanesson, 1998, la partie principale est la même mais la branche ne se divise pas au même endroit.

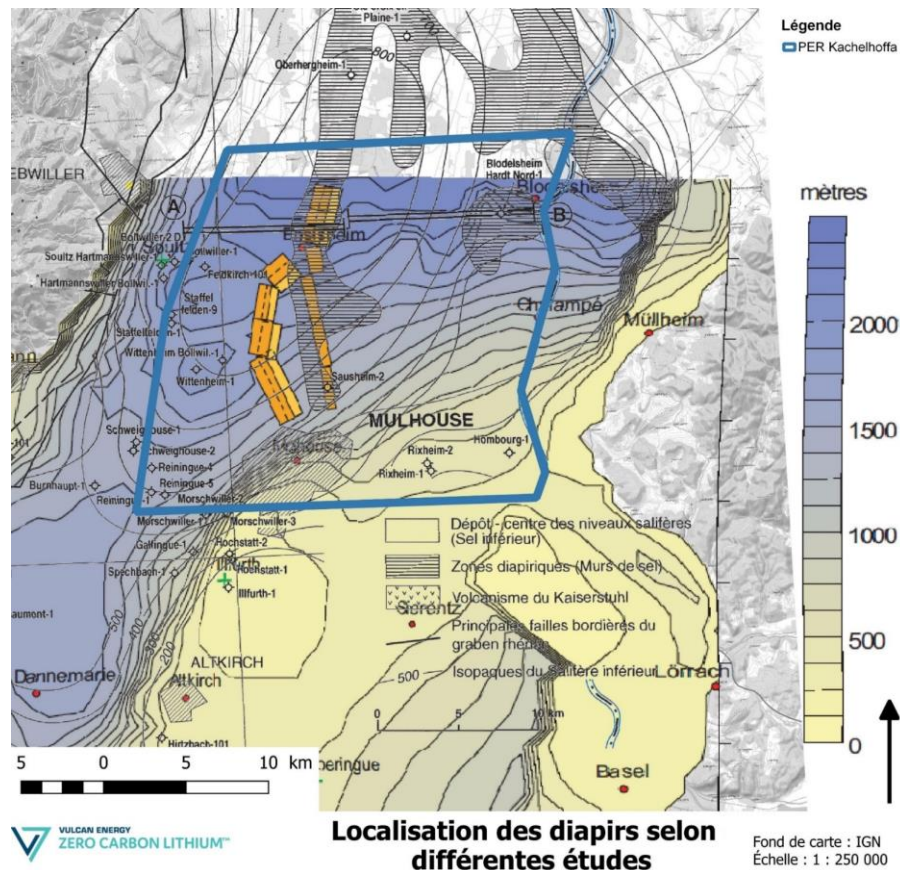


Figure 60 : Localisation des diapirs de sel selon les différentes études (Source : Wanesson, 1998 et Lutz 1999).

L'origine des diapirs est quant à elle connue et liée à l'histoire tectonique du Fossé Rhénan Supérieur. Dès l'Oligocène le sel gemme déposé dans le fossé commence à fluer et remonte le long des zones de failles. Les mouvements de diapirs ont perduré à différentes vitesses jusque dans le Quaternaire (GeORG). Les intrusions diapiriques ont été découvertes dans les années 30 car une grande variation du toit du sel a été observé dans la région. Plusieurs sondages ont démontré que la profondeur du toit du sel était extrêmement variable, même entre des points très rapprochés, et que les sédiments présentaient souvent une allure tourmentée, avec des pendages fort importants allant jusqu'à la verticale (Jung et al., 1936). Jung explique d'ailleurs que : « lorsque le toit du sel présente un certain pendage, par exemple vers l'est, une faille inclinée, à rejet direct et à regard ouest, construit un premier élément d'anticlinal salin sous forme de dièdre saillant. L'isostasie peut alors jouer pour rompre l'équilibre instable dû à la présence d'un minéral léger sous une couverture plus dense. Si la pression est suffisante et si le sel est assez épais, sa plasticité intervient. Il s'élève en s'infiltrant le long de la faille, après s'être écoulé d'abord horizontalement dans son propre gisement. ». Courtot et al (1972) décrit d'ailleurs très bien l'histoire tectonique du Haut-Rhin comme suit : « flexures de direction rhénane préfigurant les failles limites du fossé, suivit par une alternance de subsidences tantôt différentielle tantôt uniforme provoquant ainsi surrection d'une part et déplacement latéral d'autre part de chaque point des failles bordières. Dans certains endroits du fossé, les conséquences de la surrection du soubassement ont été différents en le nord et le sud du Haut-Rhin. Tout au sud la surrection s'est trouvée dans un état très proche de l'équilibre alors qu'au nord les contraintes ne sont pas libérées et l'énergie emmagasinée se libère peu à peu par le diapirisme, provoquant le déplacement ascensionnel des couches profondes de sel, soulevant les terrains sus-jacents moins comprimés et enlevés au fur et à mesure par l'érosion. La 'perte de matière' ainsi provoquée est compensée par une élévation du soubassement jurassique, se libérant peu à peu des contraintes. Cette libération a duré très longtemps et se poursuit sans doute encore de nos jours. »

Malgré la présence des diapirs de sel (en vert foncé) dans tous les puits sur les logs ci-dessus (Figure 56), la plupart d'entre eux, excepté ILF-1, présente des niveaux de sel massif et des alternances de marnes avec des bancs de sel ou des alternances de marnes avec des anhydrites. Comme nous pouvons le voir sur les figures ci-dessous (Figure 61, Figure 62, Figure 63) présentant respectivement les niveaux de sel : Sel inférieur (aussi appelé Zone Salifère Inférieure), Sel moyen (ou Zone Salifère Moyenne) et Sel supérieur (ou Zone Salifère Supérieure), le secteur de sel est géographiquement important. En effet, comme nous l'avons vu précédemment les diapirs sont des zones concentrées de sel qui a flué mais les niveaux salifères sont très étendus géographiquement. Dans le cas d'ILF-1, il n'y a pas de sel gemme mais l'Éocène et l'Oligocène est composé de marnes avec du gypse (principalement fibreux) et des calcaires (Figure 64).

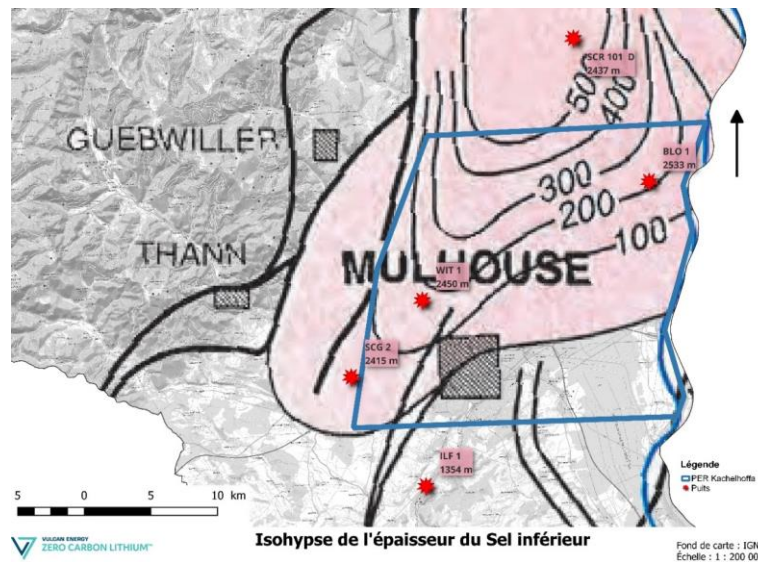


Figure 61 : Localisation des puits ainsi que la superficie et l'épaisseur du niveau appelé Sel inférieur (Source : Wanesson, 1998).

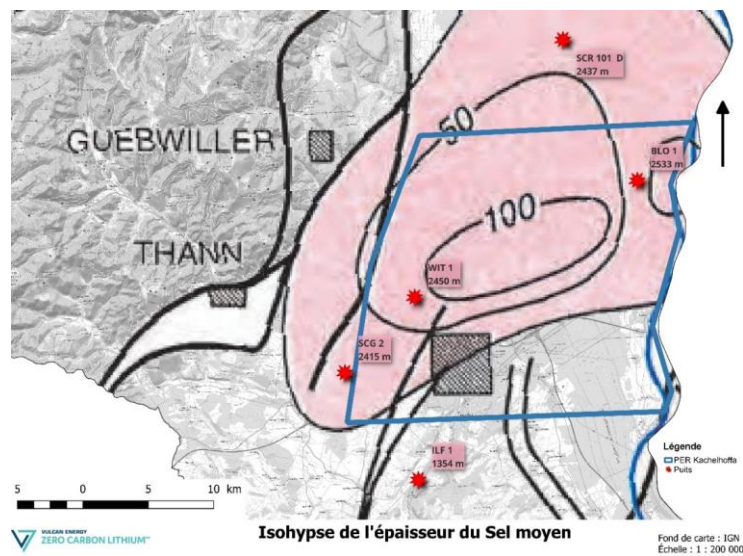


Figure 62 : Localisation des puits ainsi que la superficie et l'épaisseur du niveau appelé Sel moyen (Source : Wanesson, 1998).

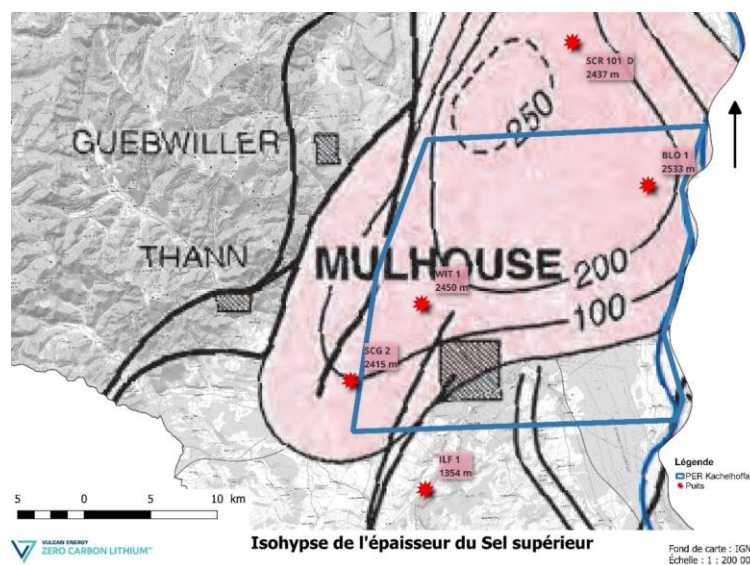


Figure 63 : Localisation des puits ainsi que la superficie et l'épaisseur du niveau appelé Sel supérieur (Source : Wanesson, 1998).

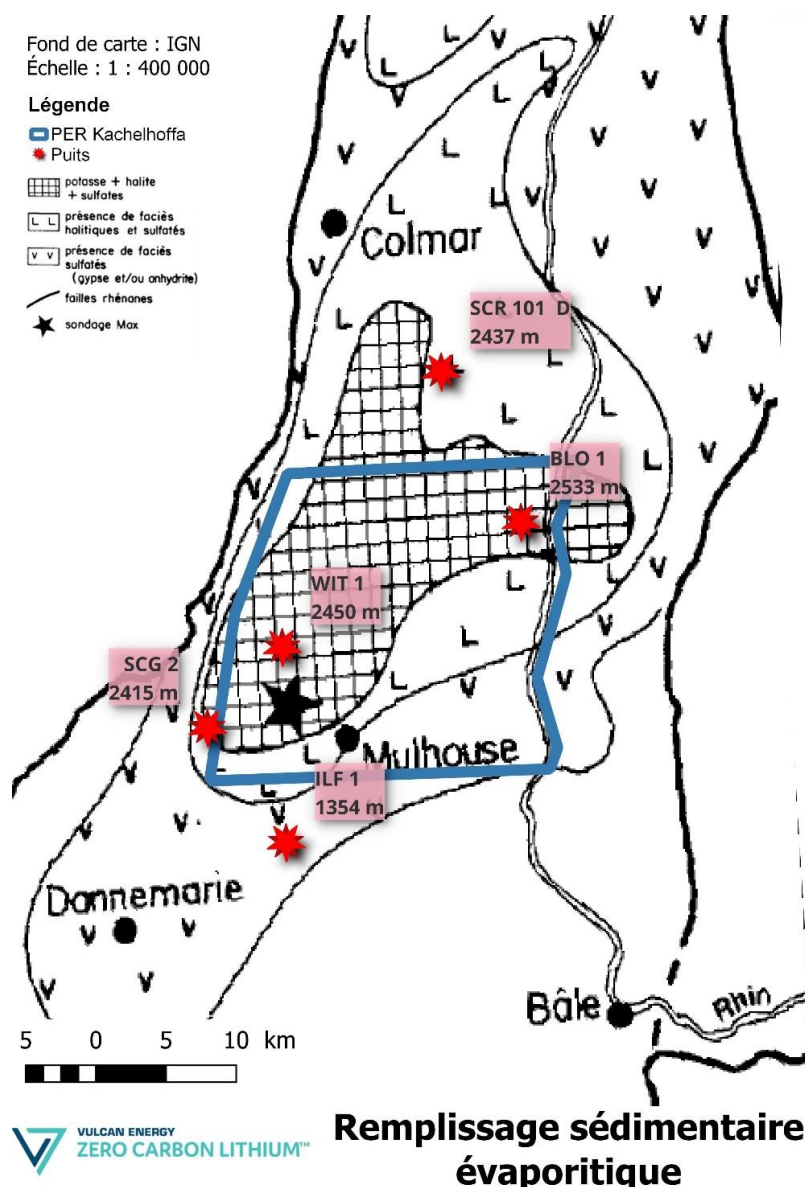


Figure 64 : Remplissage sédimentaire évaporitique du Bassin de Mulhouse et dans le Fossé de Dannemarie (Source : Blanc-Valleron et al., 1991).

Dans le périmètre du PER Kachelhoffa, les sédiments tertiaires sont principalement composés de sel gemme massif (Figure 64), avec une seule toute petite partie (au sud-est) qui sera proche du faciès du puits ILF-1 avec du gypse sans niveau salifère.

En analysant les rapports et logs de forages des différents puits on peut également observer que :

- dans SCR-101 et BLO-1 le Plio-Quaternaire fait entre 150 et 170 m d'épaisseur alors que dans les autres puits l'épaisseur est de 40 m dans Wittenheim (WIT-1) et d'environ 10-15 m dans SCG-2 et ILF-1 ;
- les puits SCR-101, WIT-1 et SCG-2 sont les seuls à intersecter la Série Bariolée ; les autres puits passent du Plio-Quaternaire directement dans la Zone Salifère ;
- les formations de l'Éocène basal varie entre 8 et 110 m d'épaisseur.

Les formations datées du Tertiaire et du Quaternaire sont donc variées à la fois en termes de faciès et d'épaisseur, mais grâce aux données de puits et de sismique réflexion il est tout à fait possible d'estimer avec exactitude les formations sédimentaires attendus dans les secteurs cibles aux projets de géothermie.

En termes de capacité de forage, dans le rapport de fin de forage du puits SCR-101 (Figure 56), il a été mentionné qu'entre 1 200 et 1 664 m de profondeur les « contrôles de trou sont difficiles, tractions et nombreux reforages, bouchons nécessaires, ... ». Après analyse des profondeurs associées aux-dit contraintes de forage, le forage a été compliqué dès l'entrée des sels massifs. Pourtant dans les autres puits forés (dans les années cinquante : BLO-1, WIT-1, SCG-2 et ILF-1 ; Figure 56) aucun problème n'a été rencontré dans ces horizons. Il est donc essentiel d'établir la position des sels afin d'ajuster la méthode de forage aux zones salifères car c'est une capacité tout à fait acquise, d'autant plus ces dernières décennies où de nombreux travaux ont été réalisés sur la composition des boues de forage pour répondre à chaque type de formation traversée.

- Les variations d'épaisseur des formations jurassique (par jeu de failles et érosion)

Du nord au sud, les puits SCR-101, BLO-1, WIT-1, SCG-2 et ILF-1 présente respectivement une épaisseur croissante de formations sédimentaires jurassiques (Figure 56). Issus des logs de GeORG le tableau ci-dessous a été extrait avec la profondeur total du Jurassique ainsi que des différents niveaux : Lias au Dogger moyen (bleu claire), du Dogger supérieur (turquoise) et du Malm (bleu foncé). Un contrôle a été effectué grâce aux données de puits pour confirmer les épaisseurs obtenues (LFO : log fondamental).

Puits	Épaisseur total GeORG (m)	Épaisseur total LFO (m)	Épaisseur Lias au Dogger moyen (m)*	Épaisseur Dogger supérieur (m)*	Épaisseur Malm (m)*	Épaisseur GO LFO (m)
SCR-101	360	362	290	70	0	0
BLO-1	420	443	340	80	0	22,5
WIT-1	500	520	360	140	0	120
SCG-2	560	568	380	140	40	120,4
ILF-1	670	677	400	170	100	136

Tableau 4 : Épaisseur du Jurassique dans les puits SCR-101, BLO-1, WIT-1, SCG-2 et ILF-1.

*Données de GeORG

Le calcaire massif que l'on observe au milieu de la formation du Dogger, appelé la Grande Oolithe, sera détaillé plus loin car représentant un potentiel réservoir. Néanmoins on observe dans le tableau ci-dessus, que dans la quasi-totalité des puits la Grande Oolithe (GO) a été observé avec également une épaisseur croissante du nord au sud. Seul SCR-101 n'a pas rencontré la Grande Oolithe alors que l'un des objectifs du puits était la reconnaissance de cette formation.

Il y a donc une variation globale de l'épaisseur du Jurassique avec une augmentation graduelle de son épaisseur vers le sud. Cette caractéristique s'explique par une augmentation du nombre de formations sédimentaires déposées (avec une série complète allant jusqu'au Malm) alors que vers le nord, par surrection du bassin rhénan, une partie moins significative du Jurassique supérieur s'est déposé. Par jeu de failles l'épaisseur peut également être réduite localement comme c'est le cas dans le puits de SCR-101 qui n'a pas rencontré la Grande Oolithe. Selon le rapport de fin de sondage dudit puits, dans le trou principal ainsi que dans le side-track la Grande Oolithe n'a pas été observé car il y aurait à cet endroit-là « une zone très remaniée avec un point haut régional, mais avec un toit du Mésozoïque plus bas que prévu ». Cette explication n'est pas satisfaisante puisqu'il est difficilement explicable d'avoir une profondeur plus grande que prévue pour une limite géologique et ceci sur un haut structural. Si l'on regarde la description des cuttings à l'endroit attendu de la Grande Oolithe se trouve « une dolomie massive microcristalline dure et compacte » d'environ une dizaine de mètres. Il pourrait vraisemblablement s'agir de la Grande Oolithe simplement moins épaisse que prévu.

Ainsi, dans le secteur sollicité, concernant la géologie jurassique on estime une épaisseur du Jurassique comprise entre 400 et 650 m environ, sans jeu de failles locales.

Les variations d'épaisseur du Permien (remplissage de sous-bassins)

Il y a peu de données concernant cette unité au milieu du Fossé Rhénan Supérieur car peu de forages ont atteint le socle, ou ne serait-ce que le Buntsandstein. En effet les cibles des pétroliers étant beaucoup moins profondes. Les seules informations proviennent des données des quelques puits profonds forés.

Dans les environs du périmètre sollicité nous disposons de quelques données concernant le Permien grâce au puits : SOU-1, ILF-1 et KNO-1. Dans le premier puits, 14,5 m de Permien ont été estimés dans le puits, selon le log de fin de forage. Dans le puits ILF-1, 73,8 m de Permien ont été estimés et dans KNO-1 près de 609 m. Une première constatation peut être faite concernant ces valeurs, elles peuvent en effet être réinterprétées différemment à l'heure actuelle. En particulier, dans le puits SOU-1, il y a 11 m de grès blanc à ciment kaolinitique et 3 m de rhyolite. Le grès blanc est un faciès typique de grès délavé par circulation hydrothermale, d'autant plus que la présence de kaolinite qui est un des minéraux principaux d'altération hydrothermale tant à modifier l'interprétation qu'on en fait. Il pourrait tout à fait s'agir des grès du Buntsandstein altéré par la présence d'une ou plusieurs failles. Concernant la rhyolite, il s'agit vraisemblablement du socle volcano-sédimentaire du Dinantien. Ainsi il y aurait la possibilité qu'il n'y ait pas de Permien dans le puits SOU-1. Concernant ILF-1, au vu de la description des cuttings (débris de forage) dans le rapport de fin de forage, il semblerait que le puits passe directement du Muschelkalk au Permien sans intersecter les grès du Buntsandstein. En effet, directement sous le Muschelkalk se trouve des argiles de couleur rouge foncé à violacée qui sont typiques du Permien. Ainsi le puits aurait intersecté 150,8 m de formations permiennes. Et dans le cas de KNO-1, ce sont 609 m de formations permiennes qui ont été intersectées. Le faciès principal est argileux avec intercalation de quelques niveaux conglomératiques, gréseux, dolomitiques à calcaro-dolomitiques. À l'inverse de ILF-1 qui ne montre principalement que des intercalations gréseuses. Il y a donc bien une variation tant sur le faciès que sur l'épaisseur qu'il est possible d'avoir dans les formations permiennes.

Toutes ces différences d'épaisseur liées au Permien s'expliquent par l'histoire complexe post-Varisque du Fossé Rhénan Supérieur. À cet époque-là, le rééquilibrage crustal a provoqué la subsidence d'environ 70 sous-bassins avec des configurations qui sont propres à chacun. Les bassins permo-carbonifères résultent en effet de l'inversion tectonique des chevauchements N45°E (direction dite « Varisque ») lors de l'effondrement gravitaire de l'orogène (Eisbacher et al 1989, Burg et al 1994). La présence d'anciens chevauchements dans la croûte est soulignée par ces bassins. Ce qui permet d'expliquer qu'en l'espace de quelques kilomètres il peut y avoir 0 m de Permien tout comme plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.

- Le socle

Il y a une grande variabilité concernant la nature du socle sur le périmètre sollicité. Sur la figure ci-dessous (Figure 65), la carte hypogéologique sommaire du socle Paléozoïque, on observe : de couleur rose les granites (roches de densités faibles), en orange foncé les gneiss (roches de densités intermédiaires), en brun clair ou orange clair des roches indifférenciées de densités intermédiaires (type : granodiorites, gneiss, Dinantien, Permien), en brun foncé des roches volcano-sédimentaire du Dévono-Dinantien, en hachuré rouge des roches magnétiques de types gabbros, diorites, granodiorites, basaltes et andésites (Edel et al 2002). Le puits SOU-1 confirme d'ailleurs l'hypothèse d'Edel et son équipe puisqu'il a atteint le socle de nature rhyolitique pouvant appartenir au Viséen,

ou au Dinantien. Le puits KNO-1 a atteint un socle granitique. Sur la carte le secteur autour du puits aurait dû être en rose, mais avec l'interprétation de granodiorite ce n'est pas tout à fait faux. En effet, la granodiorite est une roche magmatique plutonique grenue proche du granite. De plus, la présence de sédiments permien reconnus dans le sondage de KNO-1 peuvent être source d'interprétation quant à la nature du socle anté-permien. À 2 km de profondeur les densités des grès permien sont généralement de 2,65 à 2,7, voisines de celles des sédiments dinantiens et des gneiss. Ainsi, autour du sondage de Knoeringue où l'anomalie de Bouguer est intermédiaire, le socle a été cartographié en formations indifférenciées et en sédiments permien et/ou carbonifères (Edel et al., 2002).

La carte est donc une bonne base pour estimer la nature du socle sur le périmètre du PER sollicité. Se trouve principalement des granites sous la couverture sédimentaire du périmètre sollicité ainsi que des roches volcano-sédimentaires indifférenciées du Dévono-Dinantien.

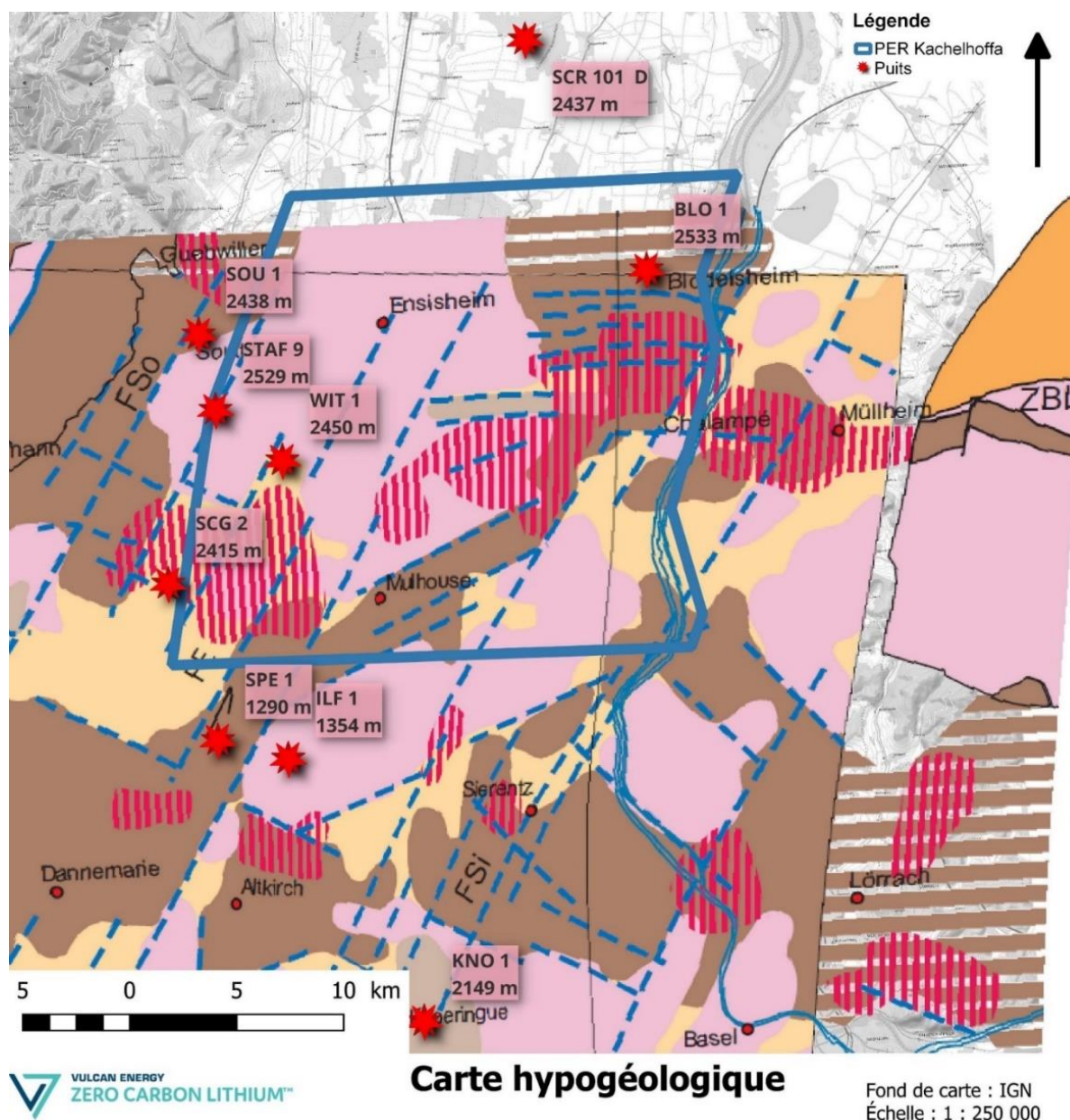


Figure 65 : Localisation du PER dit « Kachelhoffa minéral » superposée à la carte hypogéologique (Source : Edel et al 2018).

Toutes les informations que nous avons présentées auparavant démontre que sur un même périmètre donné la couverture sédimentaire ainsi que la nature du socle peuvent être très variable

d'un endroit à un autre en fonction des horsts et des grabens le composant. Les données de puits étant disparates dans le secteur désiré, il n'est pas possible d'estimer l'épaisseur et le faciès à l'aide seul des données de puits. En effet des analyses supplémentaires, comme par exemple une campagne sismique, sont requises pour augmenter la connaissance du périmètre du PER.

5.1.2 Les horizons géologiques ciblés

Communément, 3 couches géologiques potentiellement aquifères sont considérées dans le cadre de la mise en production de la saumure géothermale en Alsace. Il s'agit des couches triasiques du Muschelkalk et du Buntsandstein ainsi que le socle cristallin Varisque. Il apparaît que dans la partie méridionale et centrale du Fossé Rhénan Supérieur qui nous concerne, deux aquifères supplémentaires sont à prendre considération : la Grande Oolithe du Jurassique et le Permien (Figure 66), que nous décrirons également dans les paragraphes suivants. Du côté allemand, certains forages ont d'ailleurs ciblé le Rotliegend (Permien) comme réservoir de production pour la géothermie (Regenspurg et al. 2016).

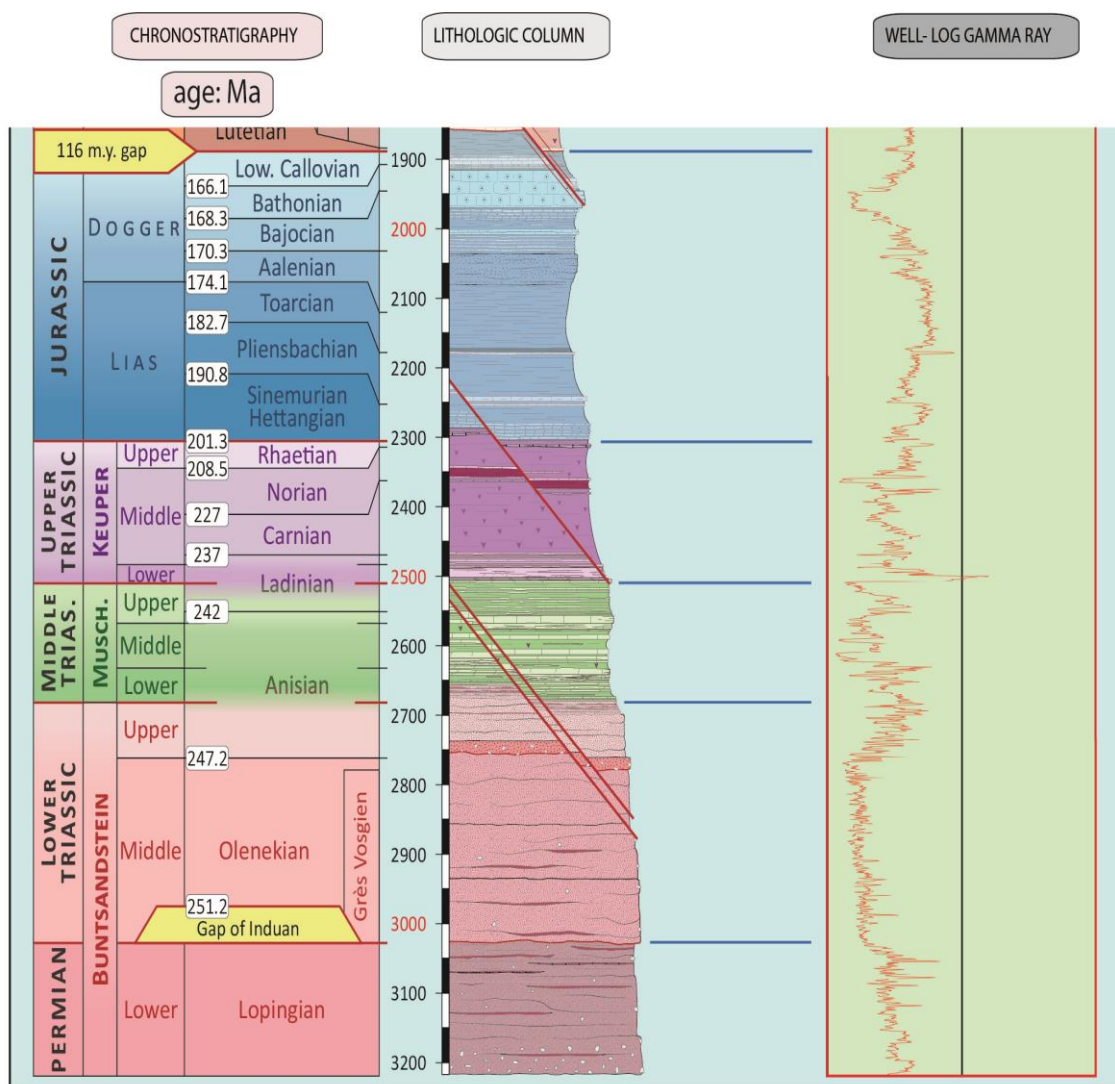


Figure 66 : Focus sur la stratigraphie du Jurassique au Permien au droit du forage GCR-1 afin de visualiser les formations sédimentaires cibles aux projets de géothermie profonde (projet géothermique de Cronenbourg) – Jurassique, Trias supérieur (Keuper), Trias moyen (Muschelkalk), Trias inférieur (Buntsandstein), Permien (Source : Aichholzer 2019).

Dans les paragraphes suivants, nous détaillerons les différents niveaux potentiels dans l'ordre chronologique (du plus récent aux plus anciens), ce qui correspond également à l'ordre des formations rencontrées lors des phases de forage (du haut vers le bas).

Description de la Grande Oolithe :

Le Jurassique est un épisode entièrement marin (chaud et profond) de grande envergure. Dans le Fossé Rhénan Supérieur, les formations jurassiques font plusieurs centaines de mètres d'épaisseur, avec de nombreux bancs calcaires intercalés dans des niveaux argileux et marneux. Le calcaire de la Grande Oolithe, identifié avec près de 40 à 150 mètres d'épaisseur dans le secteur de Mulhouse, est un calcaire massif daté du Bajocien supérieur (Dogger). Il est composé de gros bancs de calcaire oolithique (packstone) sans intercalation évidente de marnes, mais avec quelques bioclastes irrégulièrement répartis (Ménillet et al 2015, Figure 67). Les oolithes sont de taille moyenne à petite avec des variations latérales de faciès, avec par exemple un faciès plutôt dolomitique comme c'est le cas au sud de Colmar.

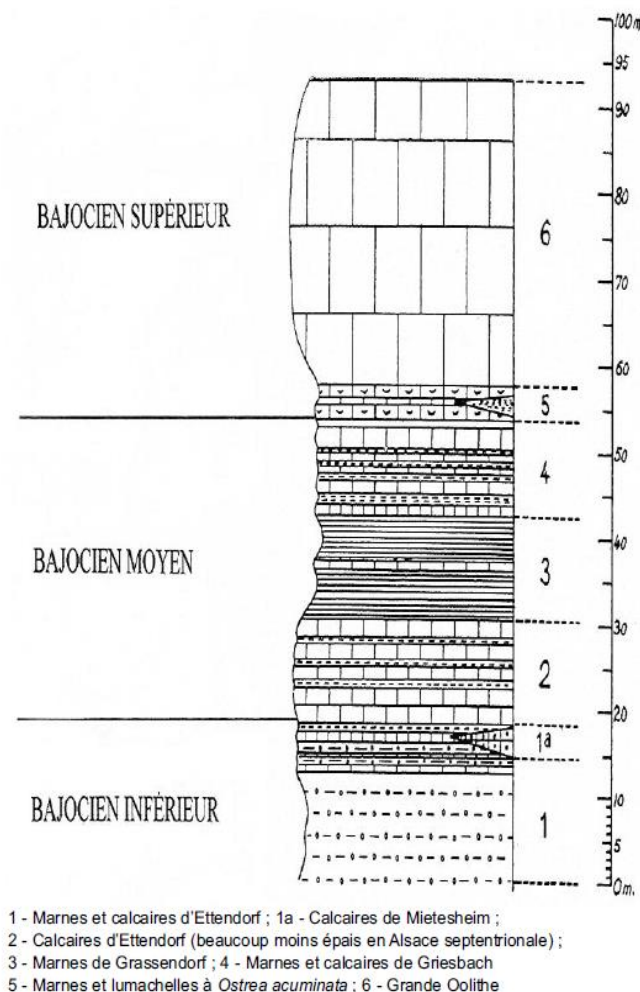


Figure 67 : Formations sédimentaires du Bajocien dans le Fossé Rhénan Supérieur (Source : Ménillet et al 2019).

De Colmar à Knœringue l'épaisseur de la formation passe de 50 m à plus de 200 m d'épaisseur. Ainsi dans le périmètre sollicité le toit de la Grande Oolithe varie d'environ 350 m à 2 700 m de profondeur (Figure 68). Son épaisseur (Figure 69) varie de ~ 80 m au nord du périmètre à 135 m vers le sud.

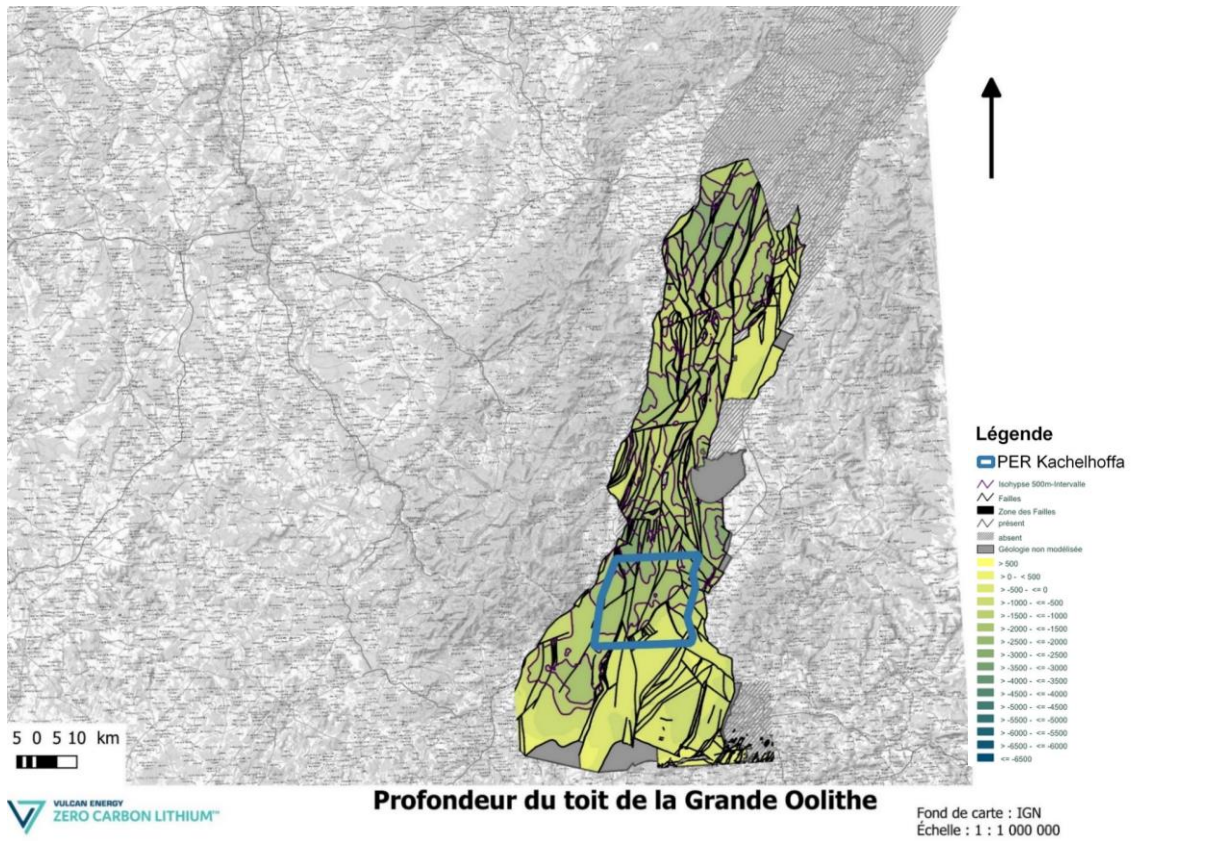


Figure 68 : Carte présentant la profondeur du toit de la Grande Oolithe (Source : GeORG).

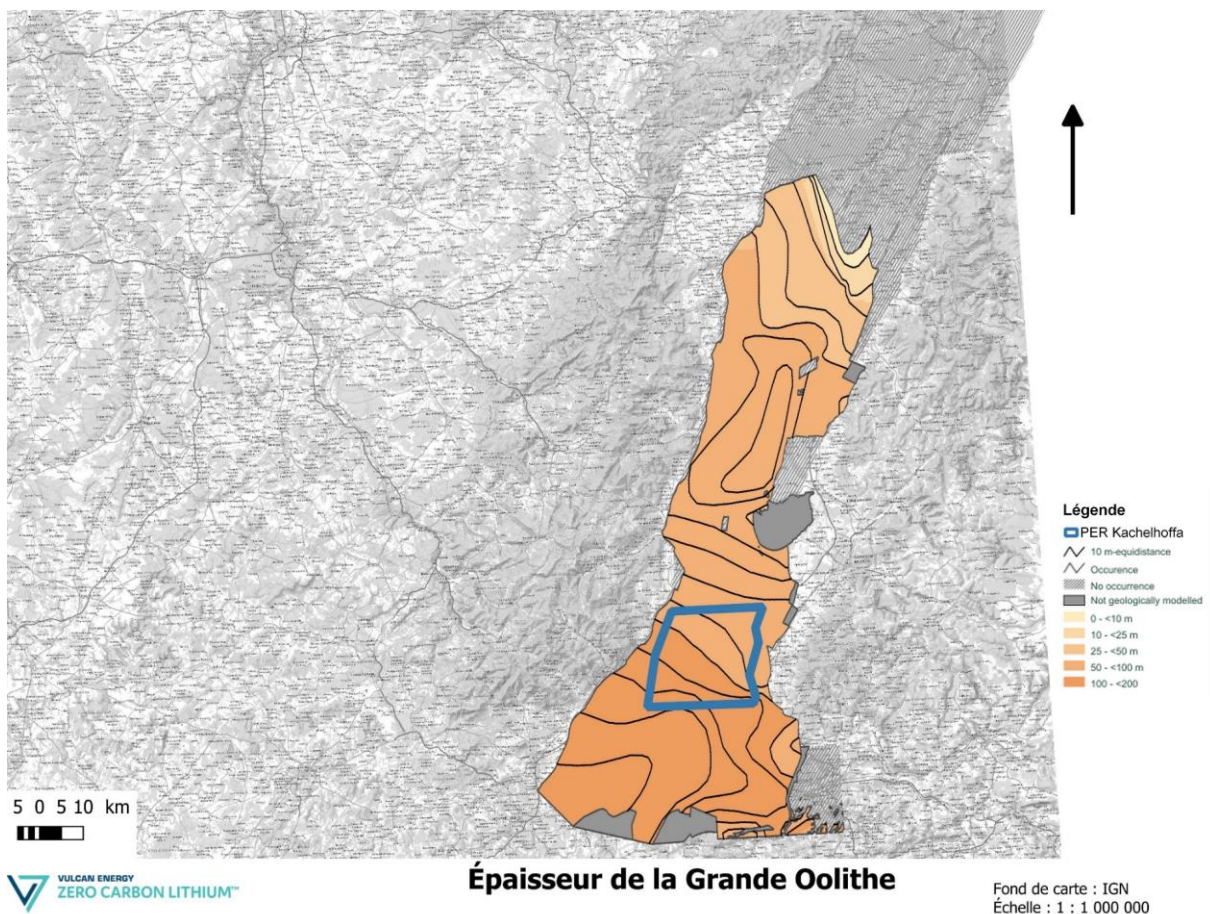


Figure 69 : Carte de l'épaisseur de la Grande Oolithe (Source : GeORG).

Si localement la Grande Oolithe peut être karstique, le degré de karstification ne pouvant être prédit, la présence de systèmes de failles est nécessaire pour avoir une productivité suffisante. En effet dans les zones karstiques et faillées, des écoulements en eaux thermales et minérales modérés à moyens ont été observés. Au niveau de Freiburg et Müllheim, la Grande Oolithe est utilisée pour la production d'eau minérale ou thermique (eau thermique de Bad Bellingen, Freiburg, riche en chlorure de sodium et de calcium et en fluor). C'est donc un réservoir à prendre en considération, d'autant que la médiane des porosités est élevée pour des roches consolidées avec 11,2% (Figure 70). En effet, dans l'horizon géothermique de la Grande Oolithe, 606 mesures ont été effectuées à travers le fossé. Les porosités varient nettement entre 0,02 et 25,5%. Dans le Haut-Rhin la porosité moyenne se trouve autour de 10% (Munck et al 1979).

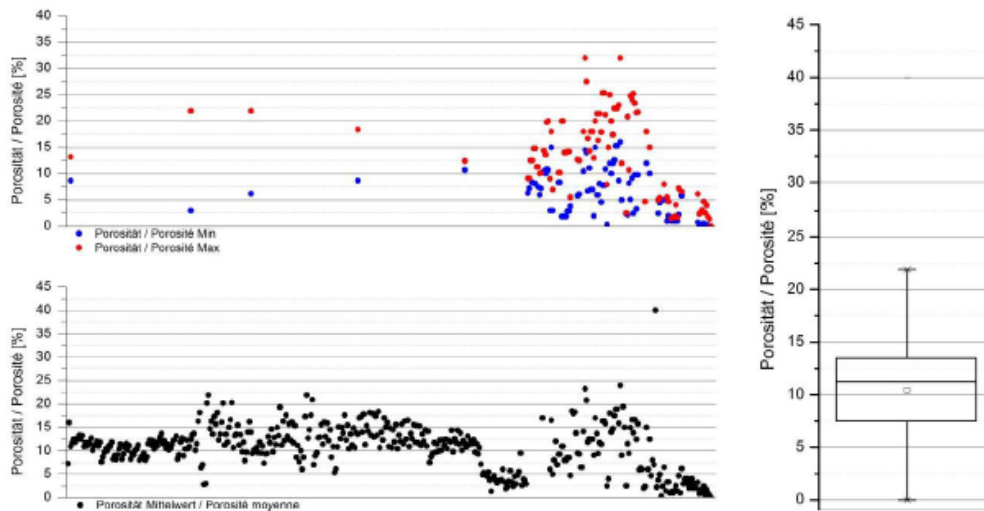


Figure 70 : Porosité minimales et maximales (en haut à gauche) et moyennes (en bas à gauche) de la Grande Oolithe, ainsi que son diagramme en boîtes à moustache (Source : GeORG).

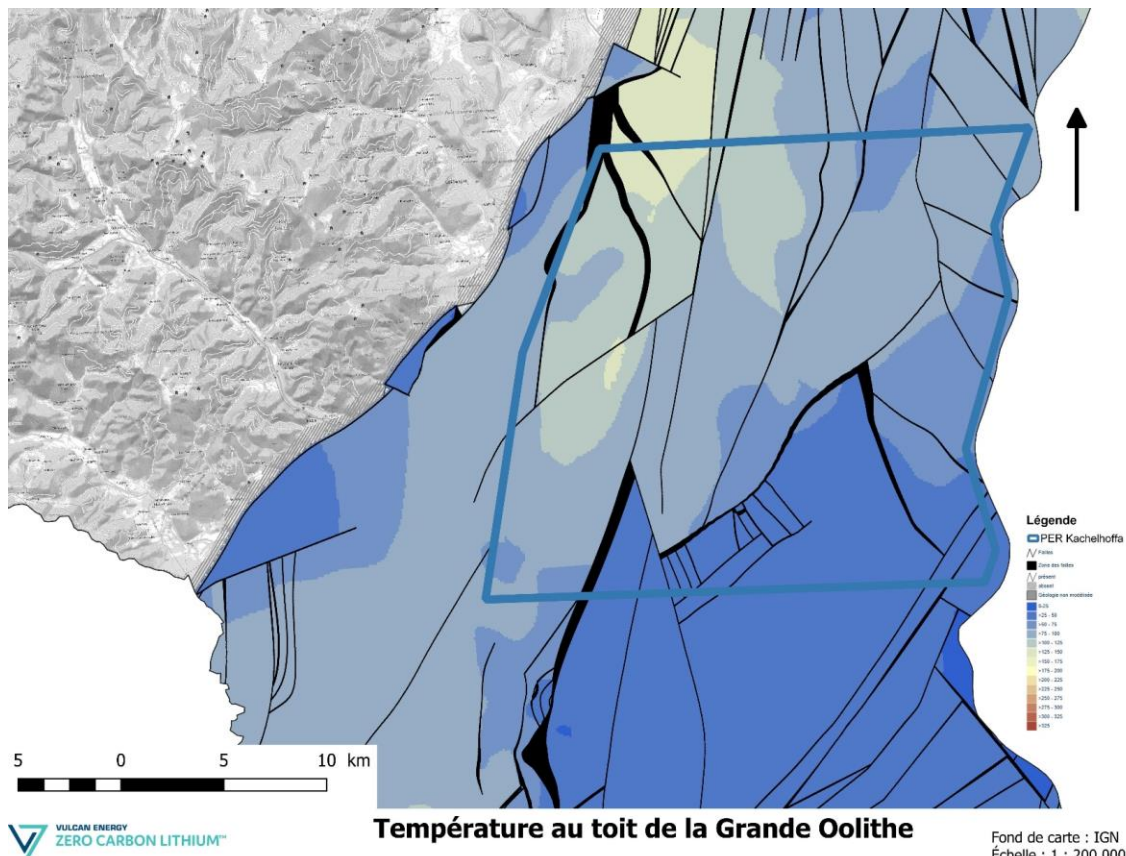


Figure 71 : Température au toit de la Grande Oolithe (Source : GeORG) au niveau du périmètre sollicité.

Les températures sont comprises environ entre 40 et 140°C dans le périmètre sollicité au toit de la formation Figure 71. La salinité de l'eau est assez élevée avec en moyenne 20 g/L (dans le secteur les valeurs sont comprises entre 5 et 150 g/L (BRGM, 1983)). La médiane des perméabilités de la Grande Oolithe est extrêmement faible, avec 0,15 mD (Figure 72). Celles-ci variant entre 0,01 et 700 mD. Les porosités ne sont donc pas le reflet direct des perméabilités. Dans quelques puits de la région (Neuwiller, Feldkirch et Reiningue) des tests (test d'interférence, de débit et des essais hydraulique) ont trouvé des valeurs de l'ordre de 190 à 500 mD.

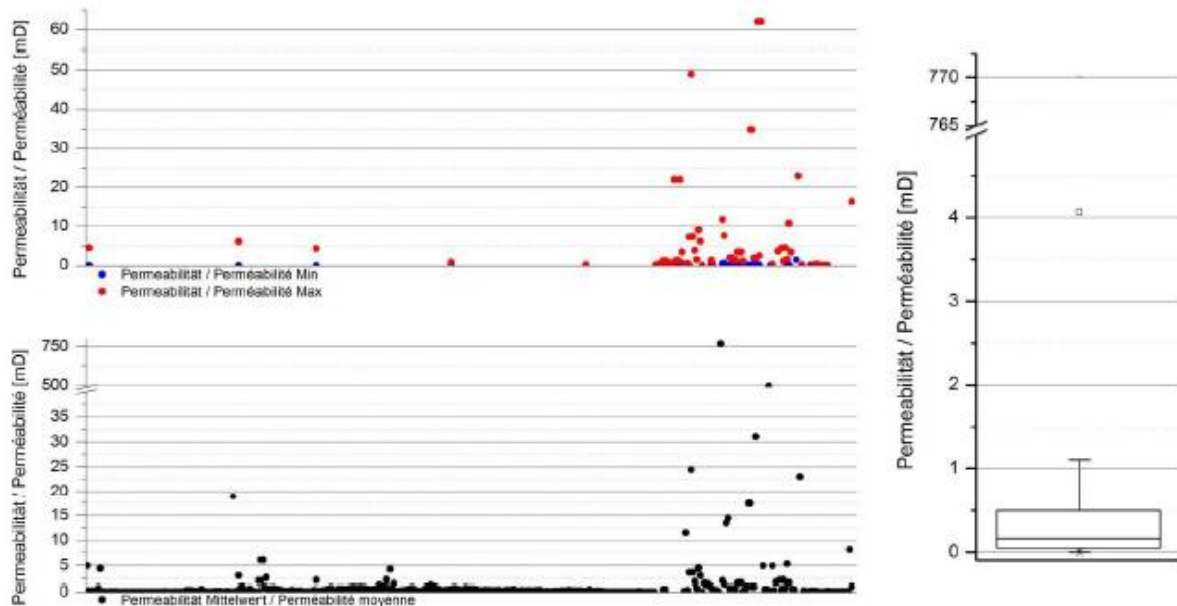


Figure 72 : Perméabilités minimales et maximales (en haut à gauche), moyennes (en bas à gauche) de la Grande Oolithe, ainsi que son diagramme en boîtes à moustache (Source : GeORG).

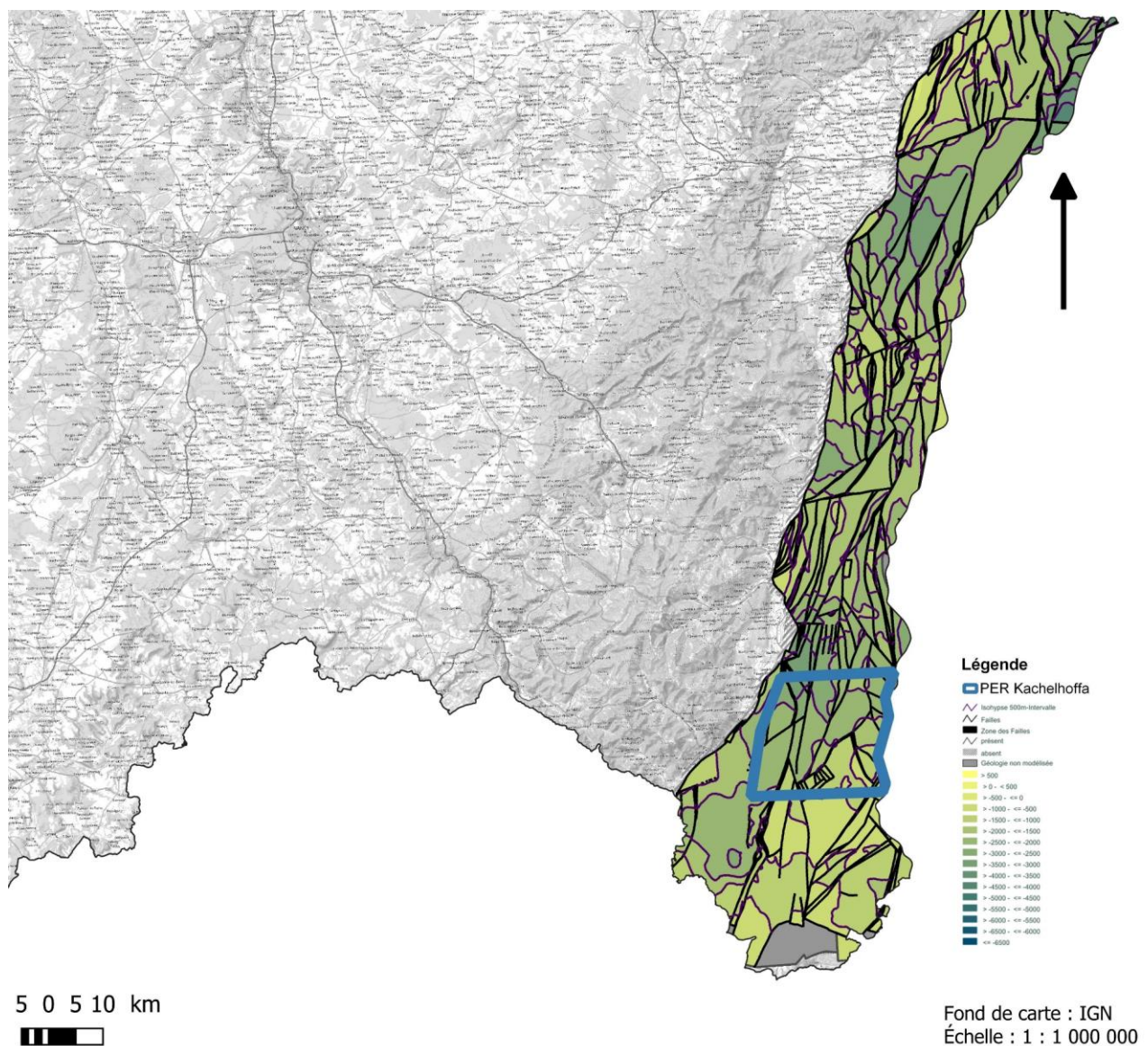
D'un point de vue hydrogéologique on peut subdiviser la Grande Oolithe en deux parties : la partie supérieure, peu oolithique, compact dont les fissures sont minéralisées par de la calcite et la partie inférieure principalement karstifiée dont les fissures et fractures sont ouvertes. Dans la masse de la formation la perméabilité reste faible, les circulations d'eau se faisant suivant des cheminements préférentiels de type failles, fissures et karstification. La Grande Oolithe est un réservoir potentiellement reconnu, et les essais de productivité dans les forages montrent que de fortes arrivées d'eau et des pertes de boue lors des forations sont fréquentes.

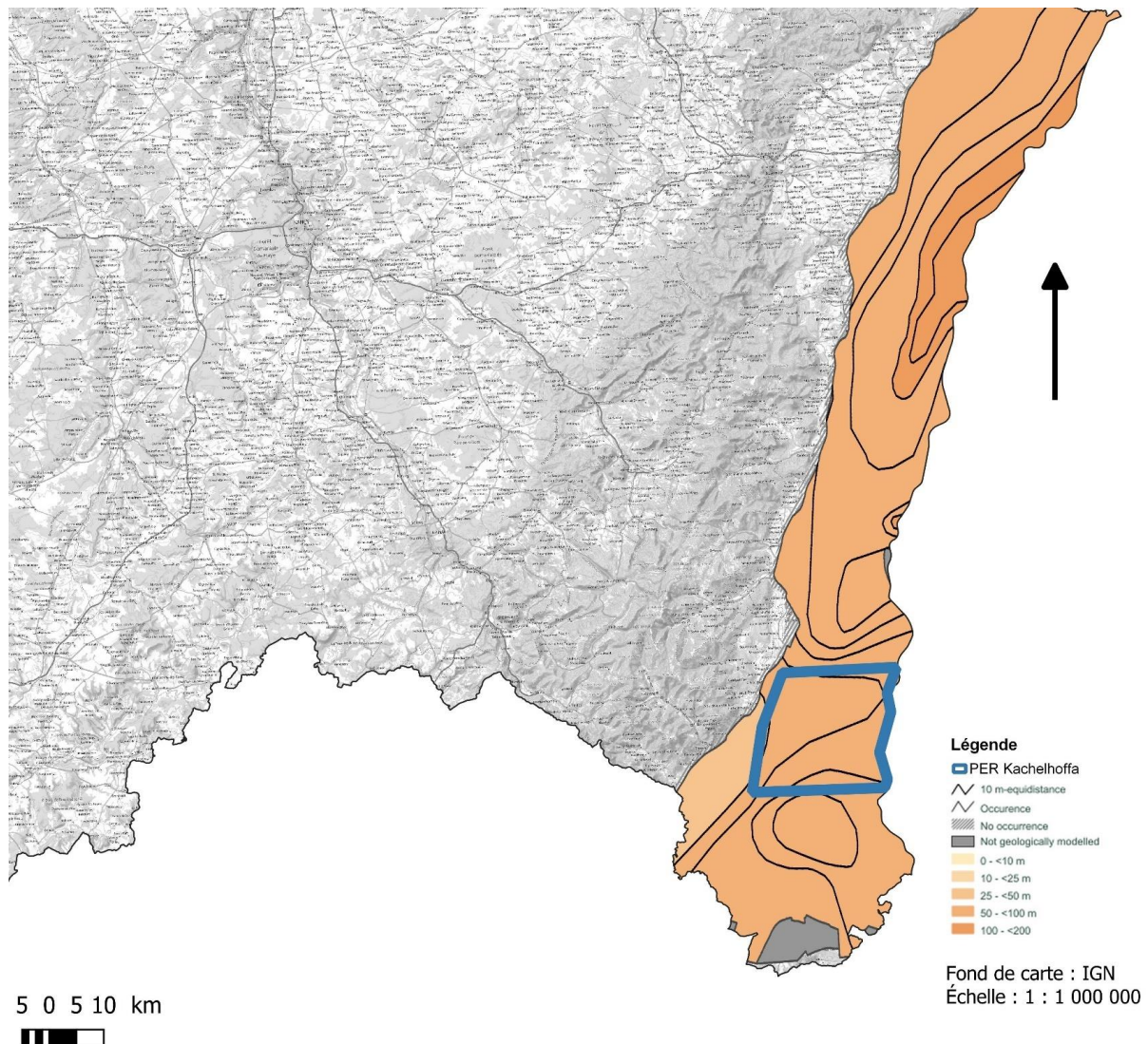
Description du Muschelkalk :

Le Muschelkalk est un épisode marin qui survient après l'épisode continental qu'est le Buntsandstein. La transition marine se produit au Muschelkalk inférieur et se poursuit au Muschelkalk moyen avec des passées évaporitiques, tandis que le Muschelkalk supérieur représente un dépôt marin franc. Les couches du Muschelkalk se caractérisent par leur richesse en calcaires coquilliers, reliques d'une faune marine. Ménillet et al 2015 décrit très bien l'environnement de dépôts de ces formations. Au Muschelkalk inférieur ces dépôts correspondent à des couches détritiques fines, souvent dolomitiques, déposées alors que l'environnement de dépôts était une immense vasière littorale. On y trouve des marnes dolomitiques, des dolomies et quelques grès en partie basale. Plus tard, dans des lagunes littorales sursalées vont se former les couches argileuses, silteuses et carbonatées avec des intercalations d'évaporites. Cette période correspond au Muschelkalk moyen. Enfin, au Muschelkalk supérieur se déposent des calcaires coquilliers et oolithiques, d'abord exclusivement puis en alternance avec des vases silto-carbonatées, alors que

le piémont d'aujourd'hui ressemble à une plate-forme recouverte par la mer. On y trouve des organismes typiques tels que les échinodermes et les céphalopodes. À l'exception de la partie basale gréseuse, le Muschelkalk inférieur est dolomitique et argilo-dolomitique. D'importantes variations latérales de faciès ont eu lieu lors des dépôts du Muschelkalk moyen. Néanmoins, le Muschelkalk supérieur est assez homogène. Les assises du Muschelkalk moyen sont essentiellement argileuses dans sa partie inférieure, marneuses et parfois salifères dans sa partie moyenne. Les intercalations calcaires et dolomitiques, épisodiques à la base, sont de plus en plus nombreuses en montant dans la formation. Elles prédominent dans la partie supérieure et peuvent former un unique aquifère avec les calcaires du Muschelkalk supérieur. Ceux-ci sont constitués de calcaires gris, résistants, à entroques dont la base est souvent oolithique et de calcaires marneux à cératites.

Côté français, le toit du Muschelkalk varie de 950 m à 3 300 m de profondeur dans le périmètre du PER sollicité (Figure 73). L'épaisseur du Muschelkalk supérieur (Figure 74) varie entre 60 et 80 m dans le périmètre sollicité.





**VULCAN ENERGY
ZERO CARBON LITHIUM™** **Épaisseur du Muschelkalk supérieur**

Figure 74 : Carte de l'épaisseur du Muschelkalk Supérieur (Source : GeoRG).

« Les réservoirs carbonatés du Trias moyen constituent des objectifs irréguliers du fait de la présence de plusieurs bancs peu épais et qui ne peuvent être considérés en géothermie que lorsqu'ils sont fortement fracturés » (Munck et al 1979). La partie contributive du Muschelkalk en termes d'aquifère se concentre au niveau de sa partie supérieure (Figure 75) présentant une porosité moyenne de l'ordre de 9% (Figure 76 A) avec des valeurs variants de 1 à 17 % et une perméabilité de l'ordre de 1.3 mD (Figure 76 B), deux paramètres nettement moins favorables pour le Muschelkalk inférieur et moyen (Figure 76 C et D). Le réservoir du Muschelkalk supérieur ne présente pas de porosité propre, celle-ci étant liée à la fracturation. Ce réservoir mal connu et peu exploité du côté français l'est par exemple du côté suisse à Riehen près de Bâle. Les températures estimées au toit du Muschelkalk dans le PER dit "Kachelhoffa minéral" varient entre 60 et 130°C (Figure 77), ce qui convient parfaitement à des projets de géothermie pour de l'hydrothermalisme ou l'alimentation de réseaux de chaleur.

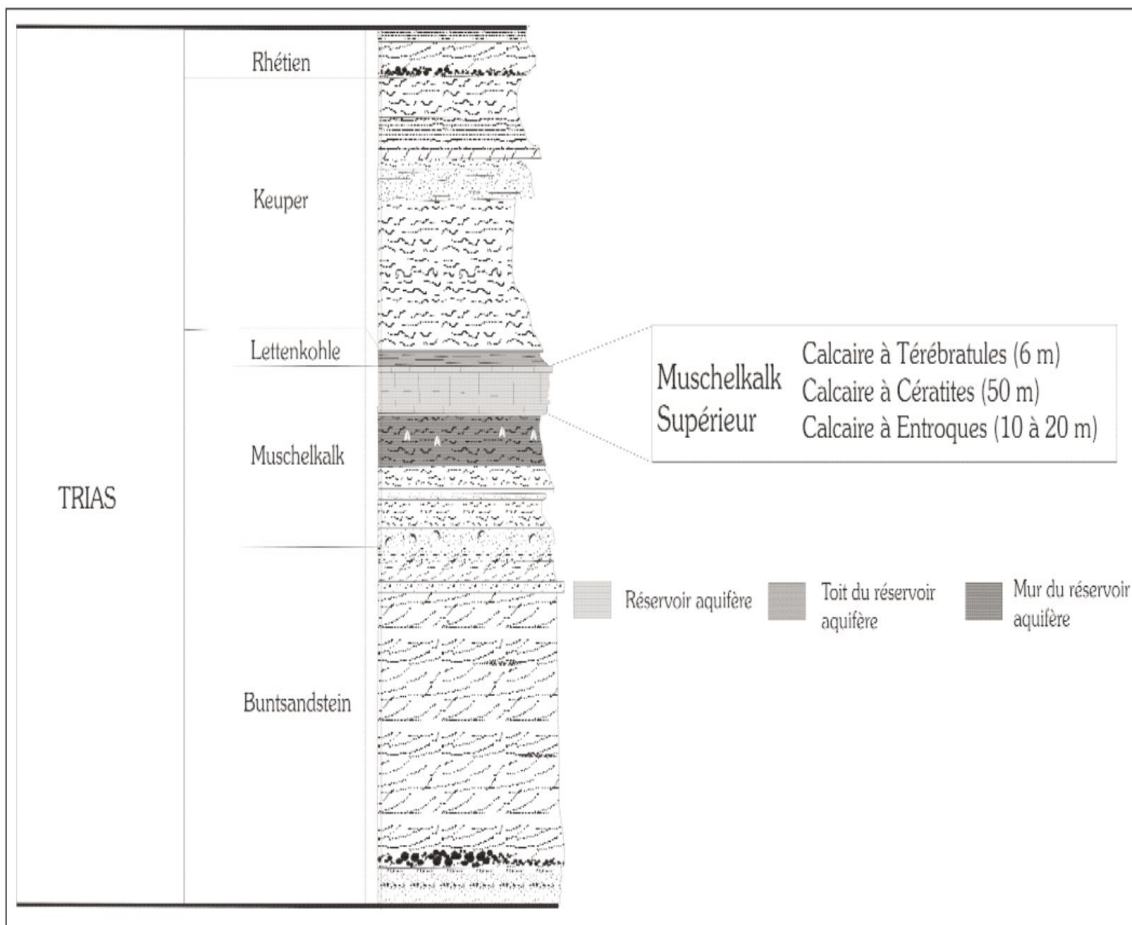


Figure 75 : Coupe lithostratigraphique des calcaires du Muschelkalk formant le principal aquifère de cet horizon géologique (Source : Atlas hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse).

Le Muschelkalk supérieur est un important aquifère minéral et thermal grâce à la présence localisée de bonnes perméabilités du fait de la forte fissuration, et secondairement du fait de vides résultant de processus de karstification (Source GeORG). Les eaux thermales du Muschelkalk supérieur sont exploitées à Freiburg, à Bad Krozingen et à Bad Bellingen dans le sud du Fossé Rhénan et à Morsbronn-les-bains dans le nord du fossé. La salinité de l'eau est variée dans cette partie du Haut-Rhin avec tout au sud (en dehors du PER) à Montbouton 92 g/L et entre 30 et 60 g/L dans le Bassin Potassique. En prenant tout le PER sollicité la salinité se situe entre 10 et 50 g/L environ.

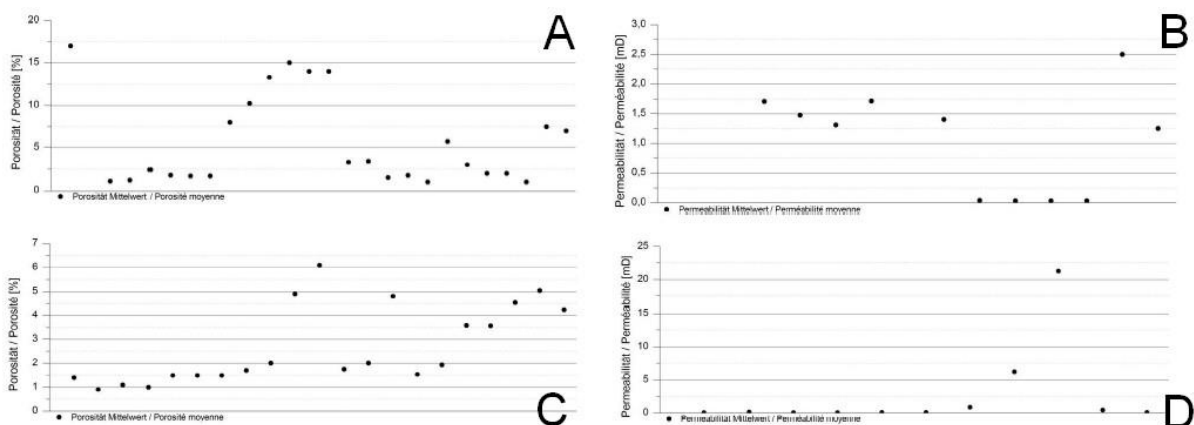


Figure 76 : Porosité moyennes du Muschelkalk supérieur (A) et du Muschelkalk inférieur et moyen (C), ainsi que les perméabilités moyennes du Muschelkalk supérieur (B) et du Muschelkalk inférieur et moyen (D) (Source : GeORG).

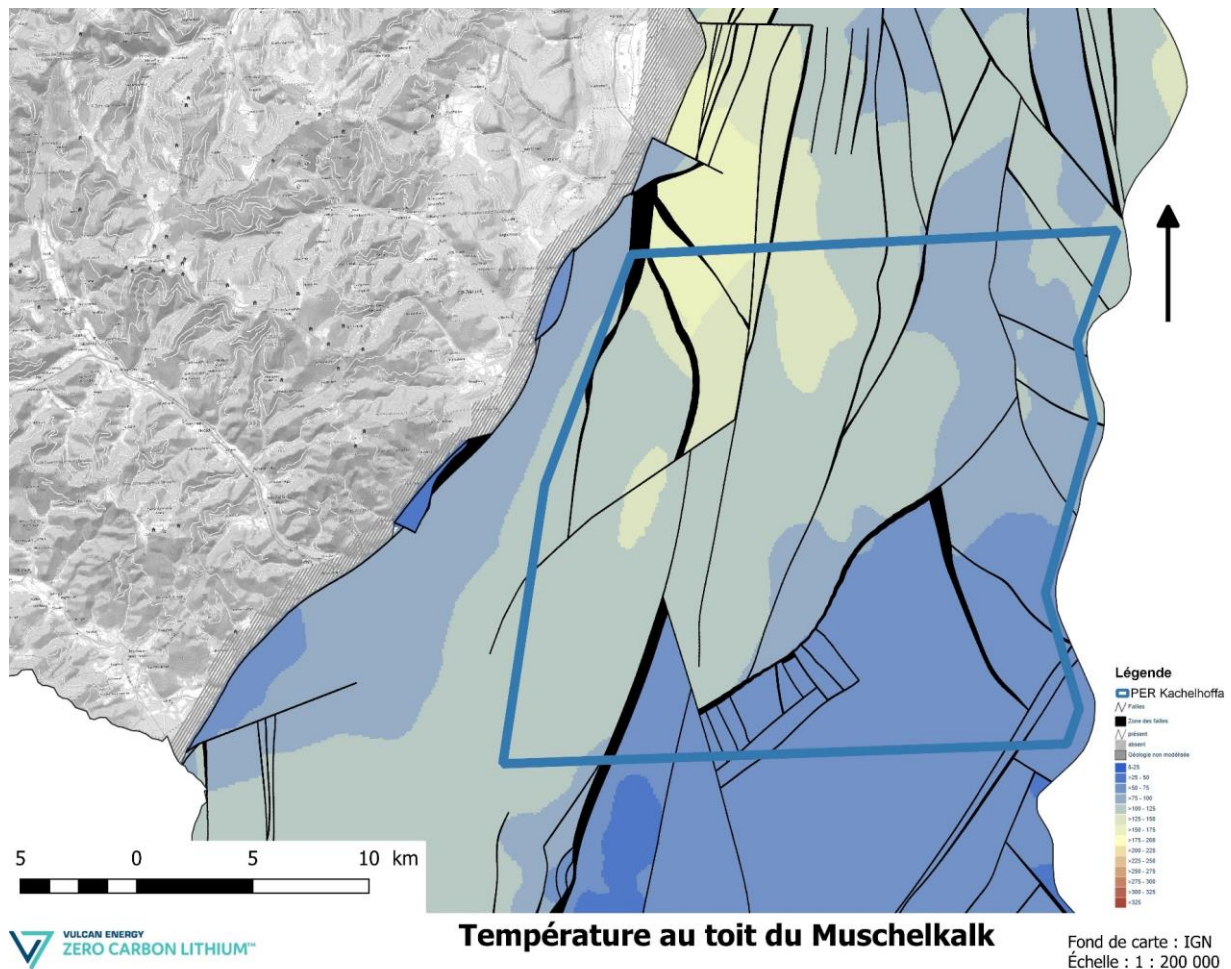


Figure 77 : Température au toit du Muschelkalk (Source : GeORG) au niveau du périmètre sollicité.

Description des couches permo-triasiques :

Le Buntsandstein correspond à une formation argilo-gréseuse dont l'agencement est complexe : composée d'une alternance de couches gréseuses majoritaires et de couches argileuses intercalées (Figure 66 et Figure 78). La série du Buntsandstein est essentiellement constituée par des grès rouge sombre à l'état humide, roses à l'état sec. Ce sont des grès quartzo-feldspathiques principalement à grains moyens, ciment siliceux et pigment ferrugineux (hématite et goethite). Ce système aquifère a été reconnu par de nombreux forages exécutés dans le Fossé Rhénan. La granulométrie de ces grès diminue du Sud au Nord alors que l'épaisseur augmente. Le substratum est constitué, suivant les secteurs, par les grès permien ou par le socle souvent granitique. La profondeur de la formation du Buntsandstein varie d'environ 1 100 à 3 300 mètres (Figure 79). Dans l'ensemble, la puissance des grès permo-triasique de 75 à 110 m d'épaisseur sur le périmètre sollicité (Figure 80). Les valeurs de porosité des grès oscillent de 1,4 à 24,2 % (Figure 81) avec une médiane des porosités de 9,51%. Ces valeurs sont peu élevées mais, là encore, les indices de fracturation sont nombreux. La perméabilité demeure faible hors des zones fracturées avec une valeur médiane de 2,33 mD (malgré quelques valeurs atteignant 250 mD ; Figure 81). Haffen (2012) explique d'ailleurs que dans le Buntsandstein « la perméabilité est croissante du sommet vers la base de la série, correspondant à une augmentation de l'épaisseur des bancs ». Dans le puits SCS-101, proche du périmètre sollicité, une bonne perméabilité a été estimée car des pertes de boues ont été enregistré jusqu'à 20 m³/h (cf. rapport fin de sondage du puits). La salinité des fluides circulant au travers du Buntsandstein sont comprises entre 20 à 80 g/l.

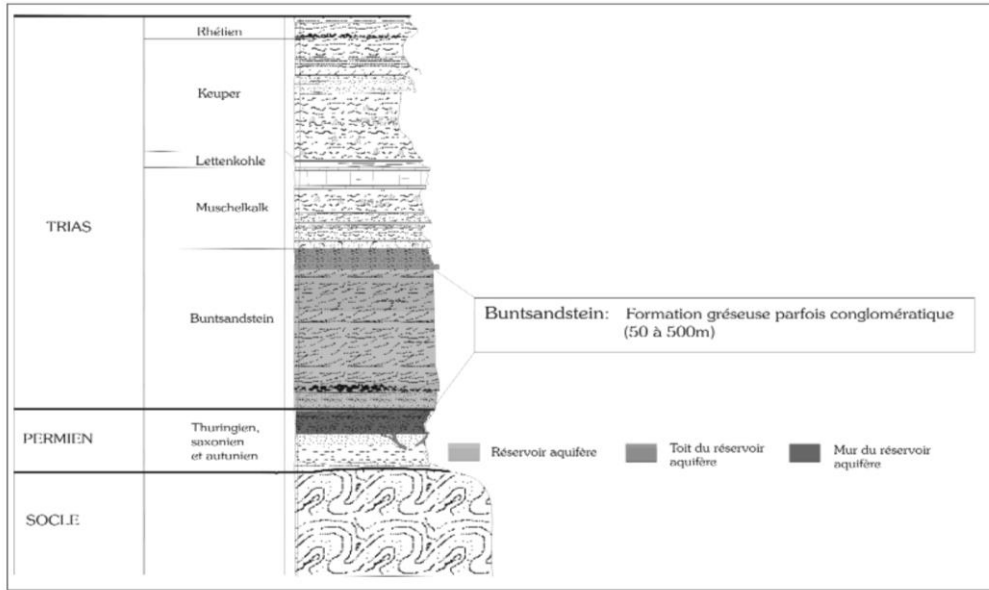


Figure 78 : Coupe lithostratigraphique des couches permo-triasiques (Source : Atlas hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse).

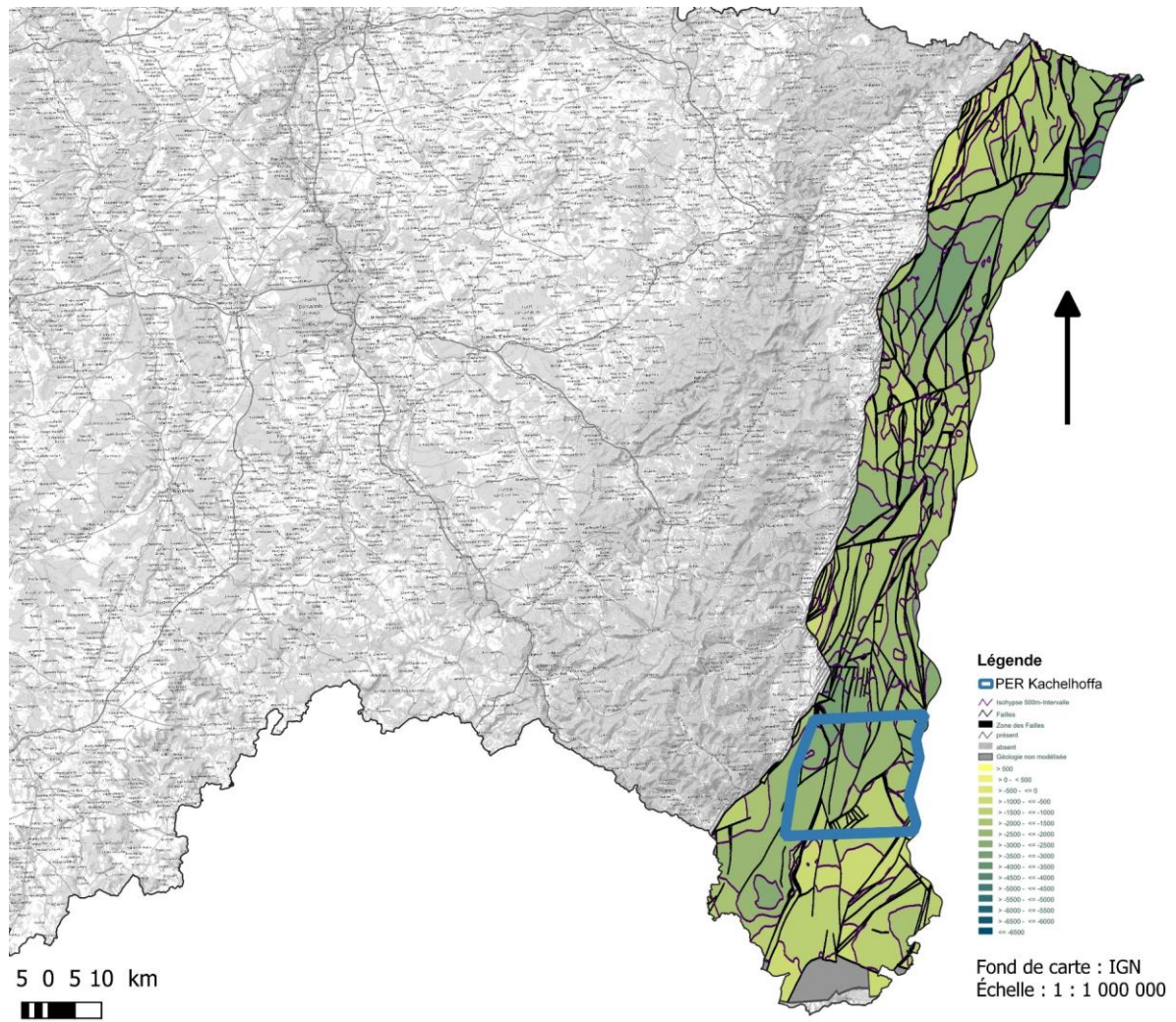
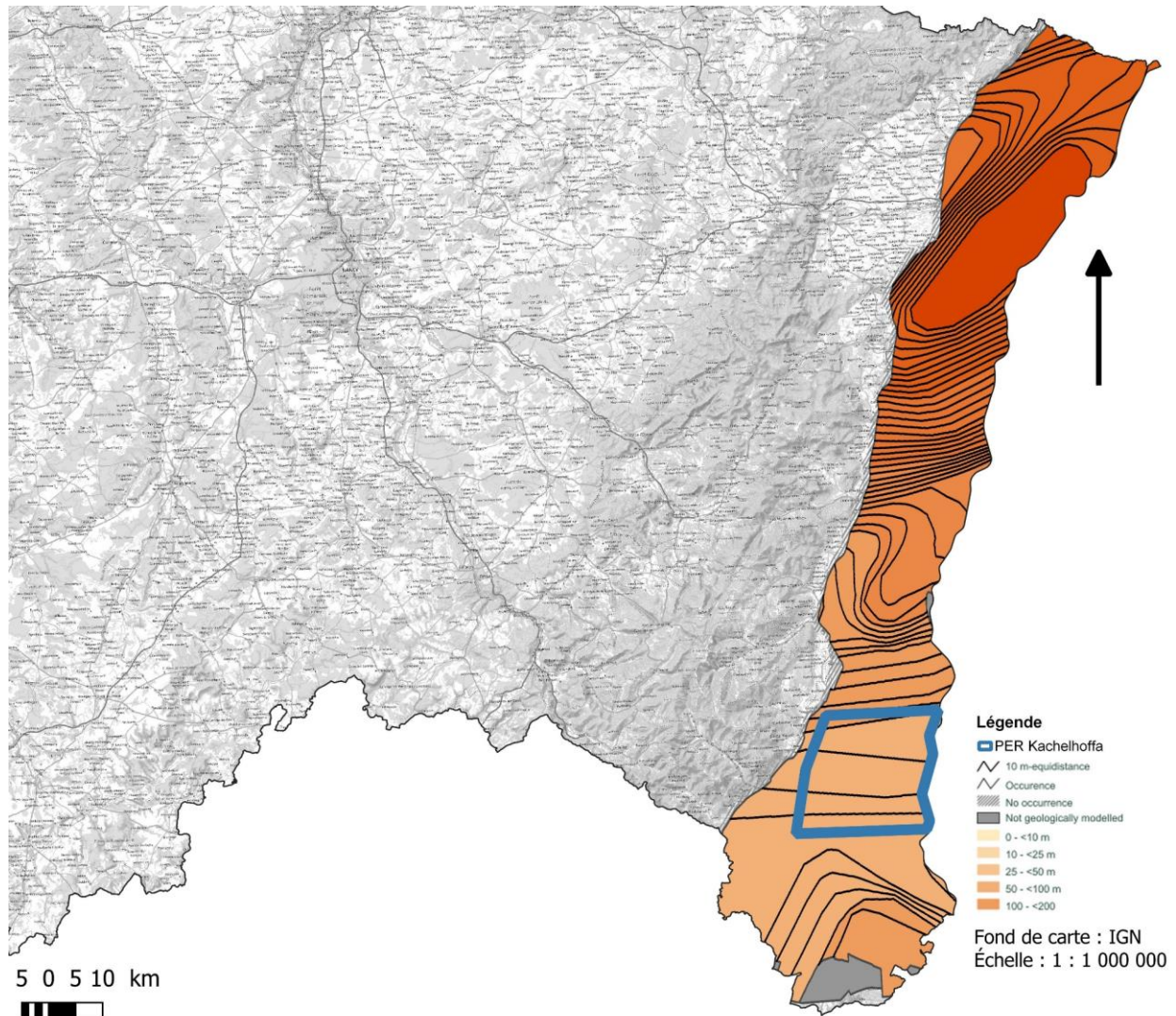


Figure 79 : Carte présentant la profondeur du toit des couches permo-triasiques (Source : GeORG).



VULCAN ENERGY ZERO CARBON LITHIUM™ **Épaisseur des couches permo-triasiques**

Figure 80 : Carte de l'épaisseur des couches permo-triasiques (Source : GeORG).

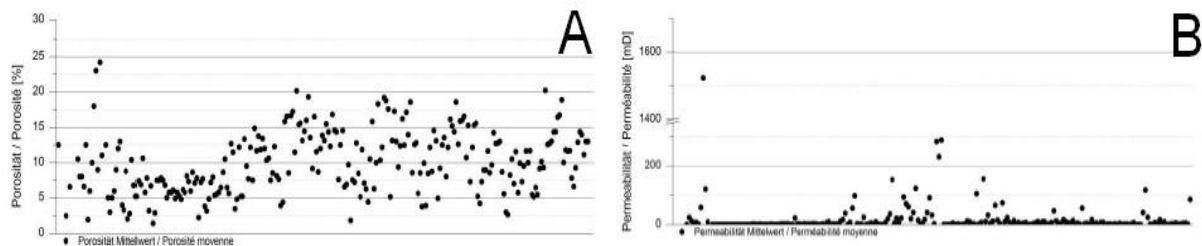


Figure 81 : Porosités moyennes (A) et perméabilités moyennes (B) du Buntsandstein (Source : GeORG).

Les températures au toit du Buntsandstein sont comprises globalement entre 65 et 170°C (Figure 82), ce qui convient parfaitement à des projets de géothermie pour de l'hydrothermalisme ou l'alimentation de réseaux de chaleur ainsi que la production d'électricité.

Si le Permien est assez bien connu dans le domaine Vosgien (bassin de Villé, bassin de Saint-Dié-des-Vosges, ...) où il affleure et fait quelques centaines de mètres d'épaisseur (près de 1 000 m dans le bassin de Ronchamp-Giromany). Comme nous l'avons vu précédemment son épaisseur peut varier

fortement de plus de 500 m pour ne représenter à d'autres endroits que quelques mètres voir être complètement absent.

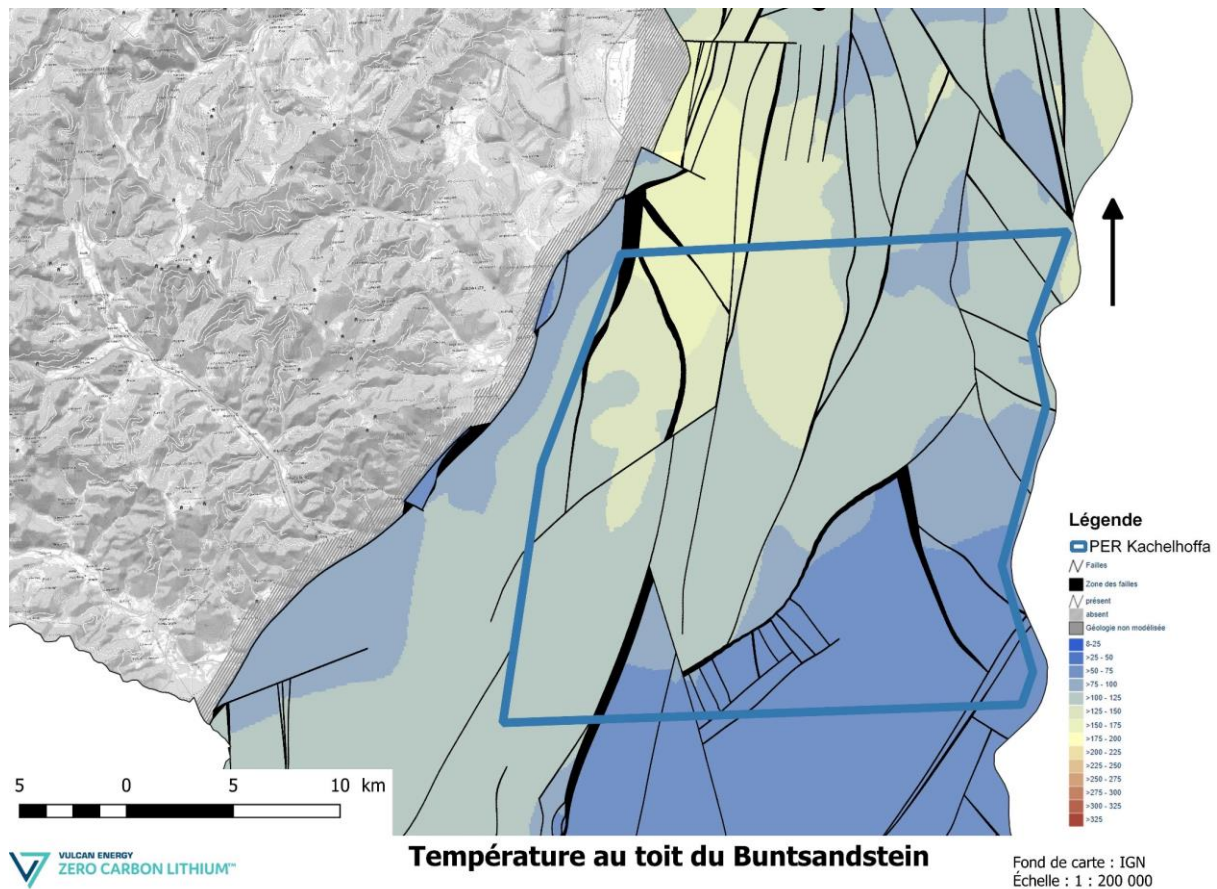


Figure 82 : Température au toit du Buntsandstein (Source : GeORG) au niveau du périmètre sollicité.

Dans le rapport de GeORG, il n'y a aucune indication concernant la perméabilité des formations permiennes. Ils disposent aussi d'une seule mesure de porosité, dont la valeur est de 6,5%. Néanmoins ils décrivent les formations du Stéfano-Permien comme étant une ressource hydrothermale importante. Cette unité de structure extrêmement hétérogène est majoritairement constituée de grès, de conglomérats et de roches magmatiques. La porosité matricielle dépend largement de la granulométrie, de la compaction et de la cimentation. Généralement, la perméabilité des roches ne suffit pas à elle seule pour une utilisation hydrothermale. Dans les roches magmatiques non fracturées, la perméabilité est probablement extrêmement faible. La conductivité hydraulique du massif rocheux est donc avant tout déterminée par le degré de fracturation et le comportement hydraulique des discontinuités présentes dans la roche. Les températures dans les formations permiennes y sont comprises globalement entre 65 et 170°C (Figure 83), comme pour le Buntsandstein, ce qui convient parfaitement à des projets de géothermie pour de l'hydrothermalisme ou l'alimentation de réseaux de chaleur ainsi que la production d'électricité. Compte-tenu du peu de données sur le Permien du Haut-Rhin il est difficile de se prononcer sur le potentiel de ces couches sédimentaires comme cible géothermique mais elles ne peuvent être négligées. D'autant plus que du côté allemand c'est un réservoir ciblé par certains projets.

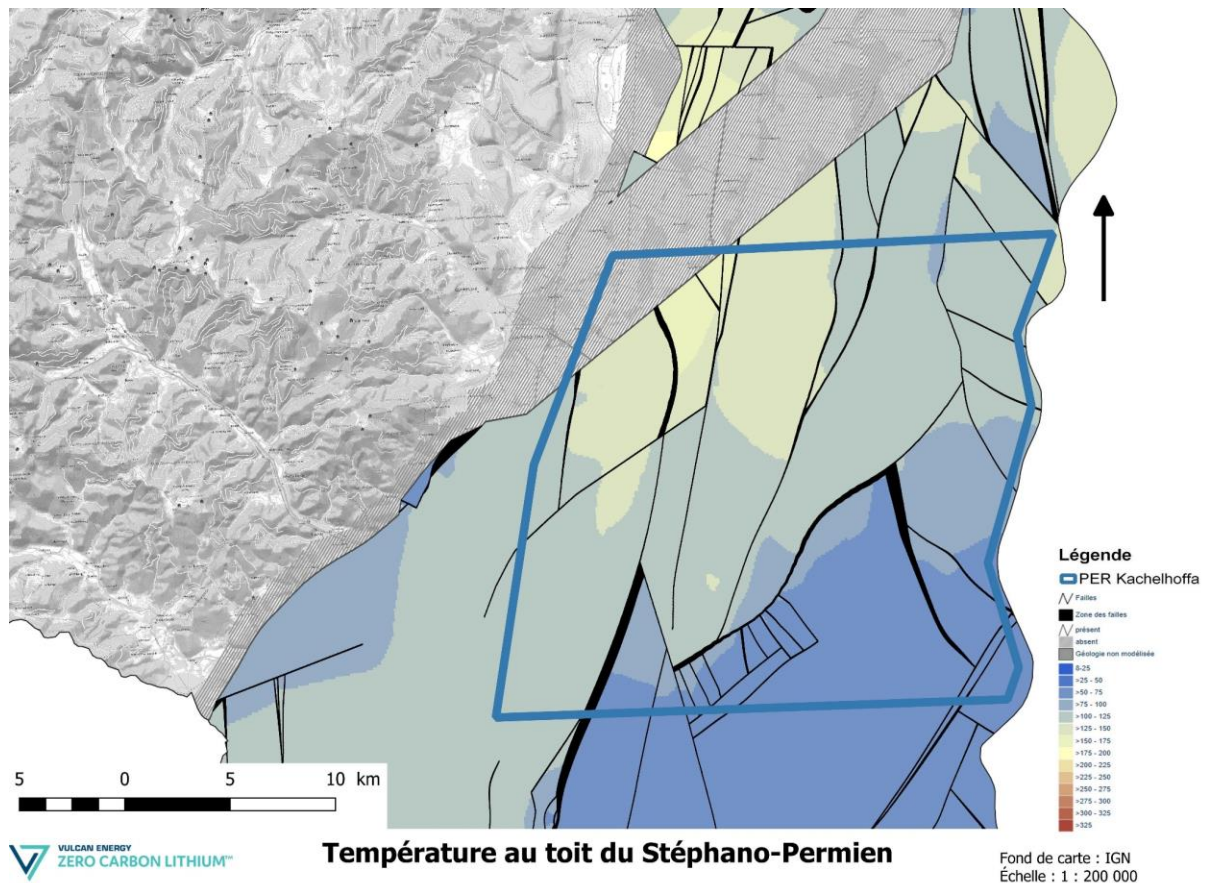


Figure 83 : Température au toit des couches stéphano-permiennes (Source : GeORG) au niveau du périmètre sollicité.

Description du socle granitique :

Le socle du massif vosgien Nord situé au Nord de l'accident majeur de Lalaye-Lubine et s'étendant jusqu'à la vallée de la Bruche (connu sous le nom de Massif du Champ du Feu), comprend des terrains cristallins, très disloqués (diorites et granodiorites du Sud du Hohwald et du Champ-du-Feu, granites du massif du Champ-du-Feu), des formations métamorphiques (formations du Climont, schistes de Villé) et des terrains volcano-sédimentaires. L'ossature des Vosges moyennes comprend essentiellement des gneiss et des migmatites, formations fortement métamorphosées (Figure 84). La ligne tectonique majeure du massif est celle de Lalaye-Lubine. C'est un complexe d'écaillés par l'intermédiaire desquelles les gneiss d'Urbeis chevauchent les schistes de Villé, lesquels sont métamorphosés jusqu'à prendre l'aspect de mica-schistes à grenat. Cette zone d'écaillés de Lalaye-Lubine, large de 2 km, marque avec la série de Villé la limite entre Vosges du Nord et Vosges moyennes. Les éléments tectoniques sont sensiblement différents d'une région à l'autre. Les Vosges du Nord résultent de la structure d'un ancien socle remanié ultérieurement lors de la plutonisation et de la tectonisation de l'ensemble siluro-dévonien sus-jacent. Les Vosges moyennes ont été le siège d'intrusions de granite le long de dislocations très intenses.

Les granites et gneiss se montrent aquifères dans leurs parties fissurées et celles présentant de fortes altérations (Figure 85 A et B). Les circulations d'eau se font entre autres dans les arènes qui sont constituées essentiellement de grains de quartz et de feldspaths avec une proportion variable d'argile. À l'affleurement dans les Vosges, la profondeur du socle hercynien peut atteindre plus de 5 000m (Figure 86) dans les différents bassins (e.g. le bassin de Strasbourg) ou dans les zones d'approfondissement du Fossé Rhénan (e.g. zone de Lauterbourg). Dans l'ensemble du Fossé Rhénan Supérieur on estime le toit du socle entre 160 et 6 800 m de profondeur et des températures pouvant atteindre les 200 °C (Figure 87). Au niveau du périmètre sollicité le toit se situe environ entre

1 250 et 3 700 m de profondeur et les températures sont comprises entre 70 et 180°C (cf figures ci-dessous issu de GeORG).

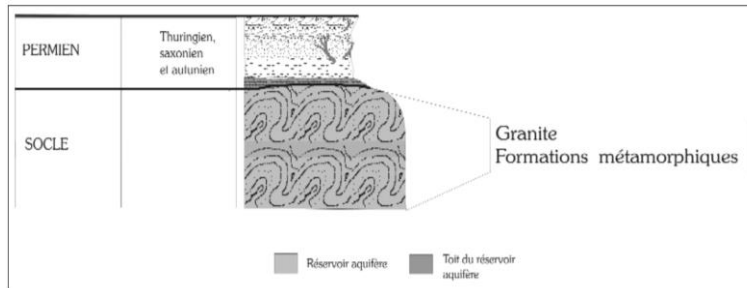


Figure 84 : Coupe lithostratigraphique du Paléozoïque du socle du massif Vosgien (Source : Atlas hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse).

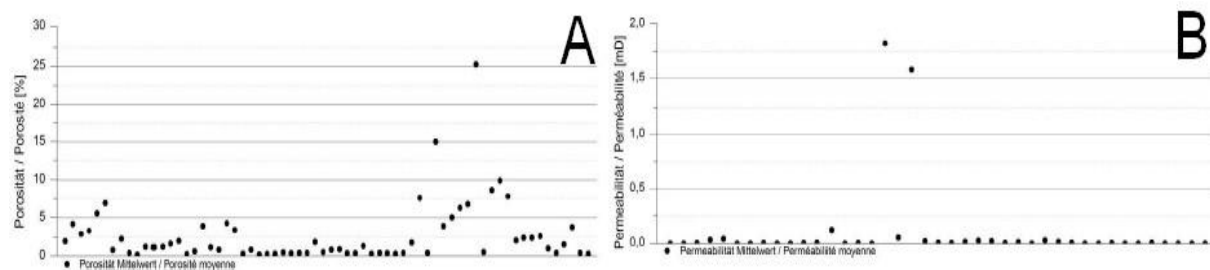


Figure 85 : Porosités moyennes (A) et perméabilités moyennes (B) du socle hercynien (Source : GeORG).

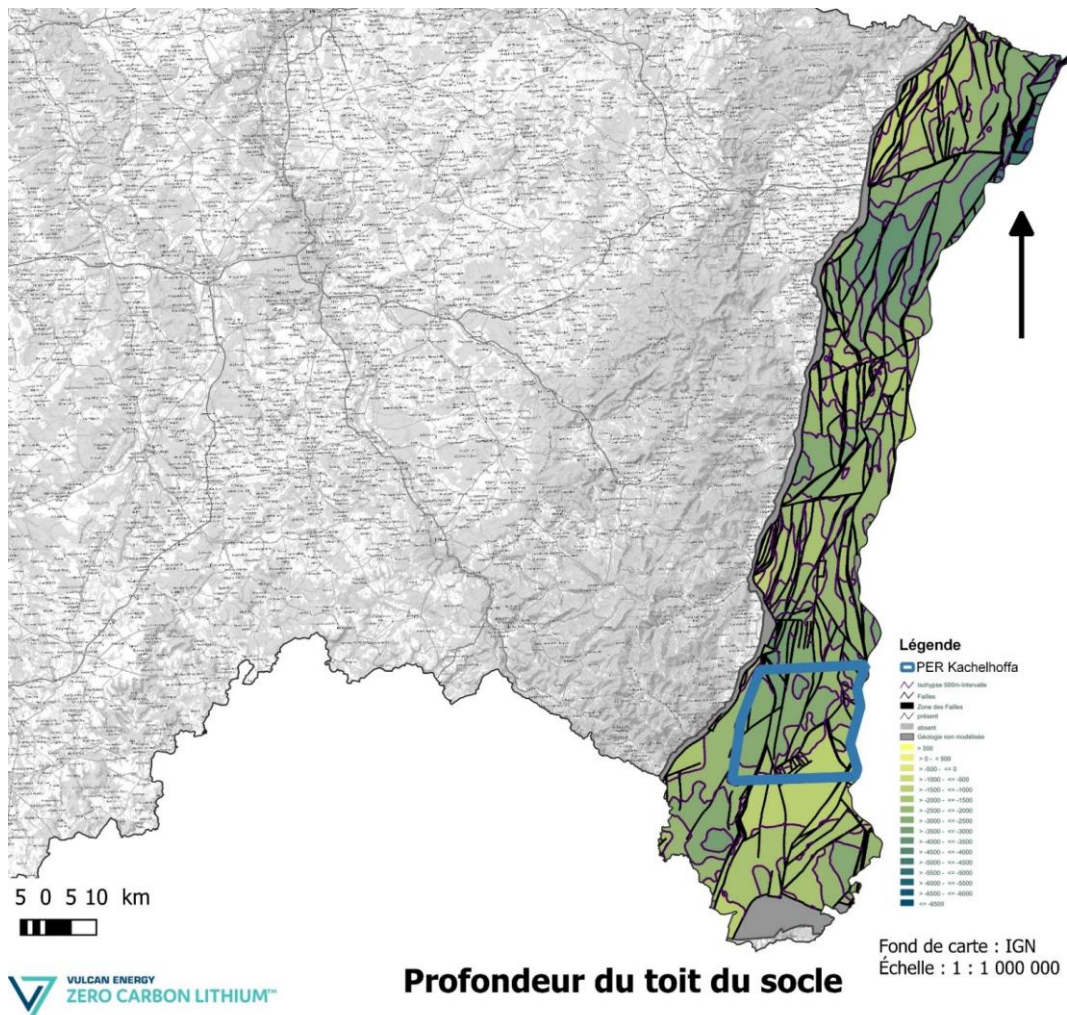


Figure 86 : Carte présentant la profondeur du toit du socle hercynien (Source : GeORG).

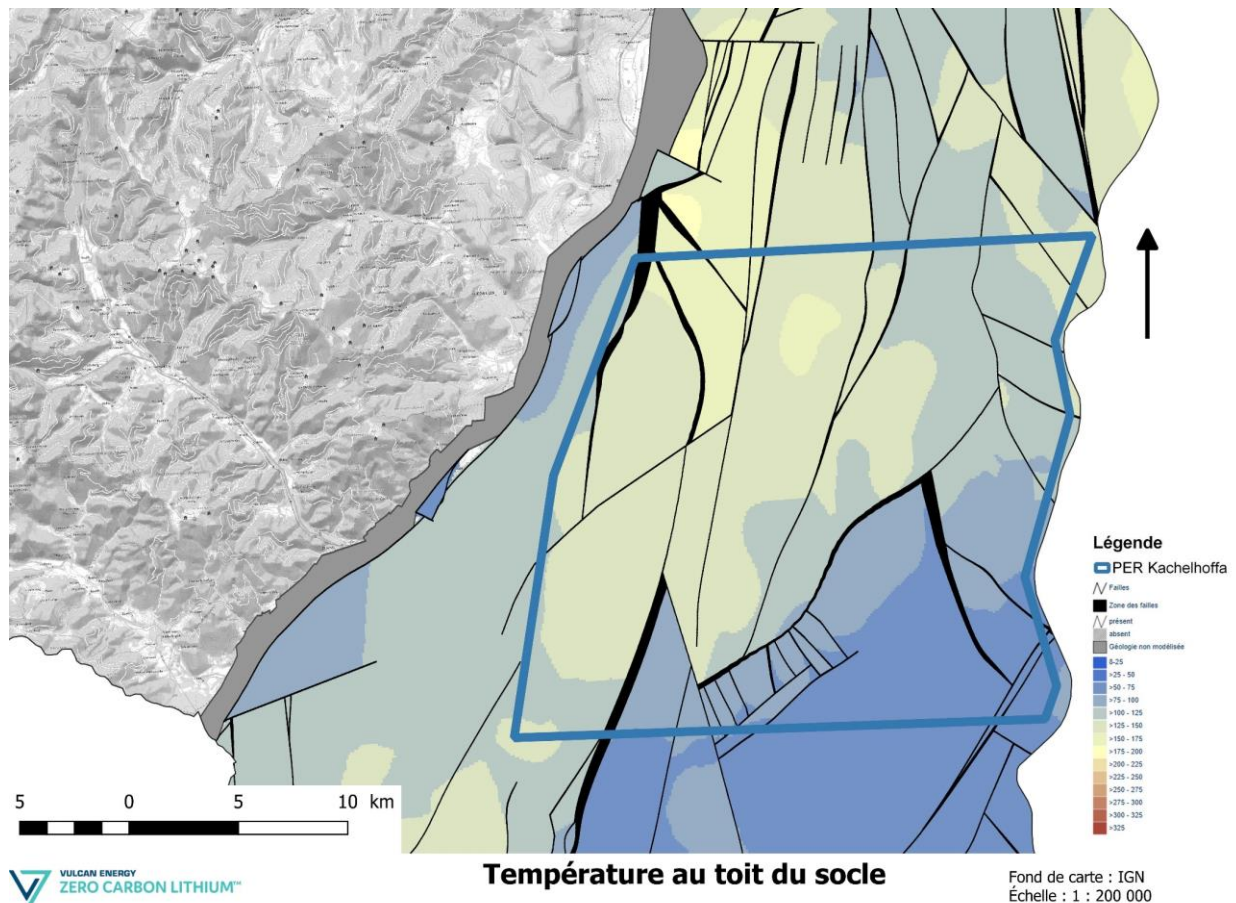


Figure 87 : Température au toit du socle hercynien (Source : GeORG) au niveau du périmètre sollicité.

Si l'on compare la carte de la température estimée au toit du socle ainsi que celle d'Edel et al (2018) concernant sa nature (Figure 88), on observe que dans le secteur nord-ouest où le granite est présent la température y est plus élevée qu'au nord-est par exemple. Néanmoins au sud-est où des granites sont présents la température estimée est assez faible.

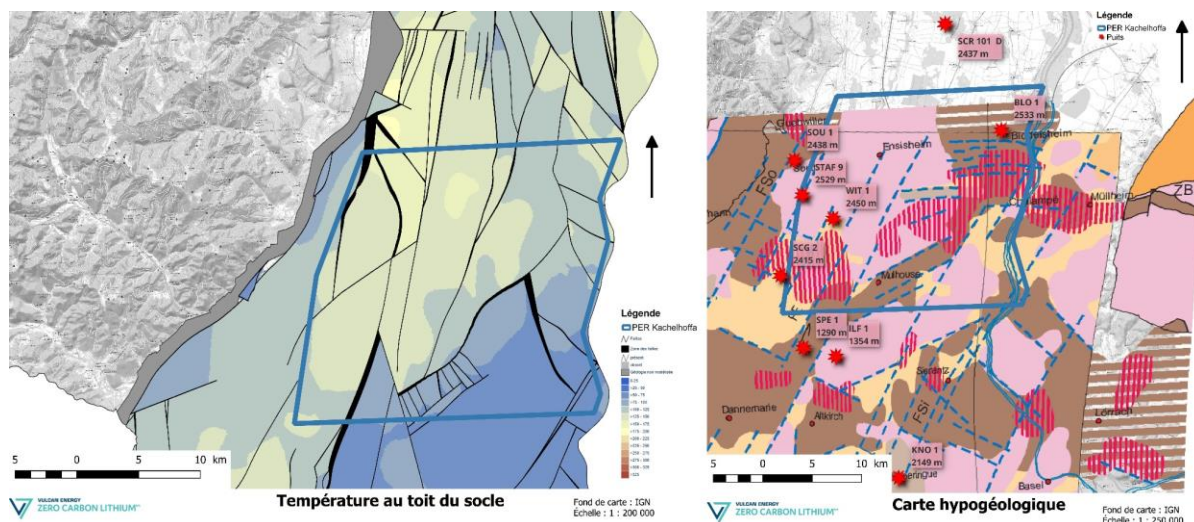


Figure 88 : Carte de la température estimée au toit du socle versus la nature du socle.

L'héritage structural prédispose à l'organisation des fractures dans le réservoir et régit l'héritage hydrothermique (Glaas et al 2021). La perméabilité est principalement contrôlée par des réseaux de fractures presque verticaux qui croisent les grès triasiques et le sous-sol cristallin paléozoïque. Dans

le Fossé Rhénan Supérieur, l'objectif le plus prometteur est de croiser et de courir tangent à des failles locales normales fortement plongeantes dans le granite interne.

5.2 Données de puits

Entre la bordure du rift et le centre du Fossé Rhénan Supérieur on observe un morcellement des terrains lié à l'histoire des mouvements tectoniques. Horsts et grabens se succèdent les uns à côtés des autres, où près du Rhin la couverture sédimentaire est généralement la plus complète et la plus importante. L'étude des données géologiques (issu des puits et du terrain) et géophysiques (issu de la sismique, de la gravimétrie, ...) est essentielle à la compréhension des différents sous-bassins. Du fait de l'activité pétrolière et minière passées; plusieurs puits apportent des informations sur la géologie des formations présentes dans le secteur (épaisseur, faciès et autres caractéristiques) et c'est celles-ci que nous allons détailler dans cette section. Les données géophysiques seront étudiées dans la prochaine section.

Dans le périmètre du PER dit "Kachelhoffa minéral", 14 puits pétroliers atteignant à minima les formations triasiques ont été forés entre 1 290 et 2 741 m de profondeur (Figure 89). Ci-dessous (Tableau 5) le tableau recense les principales informations concernant ces puits. Ces données serviront également de base bibliographique dans le cadre des travaux menés sur le périmètre du permis.

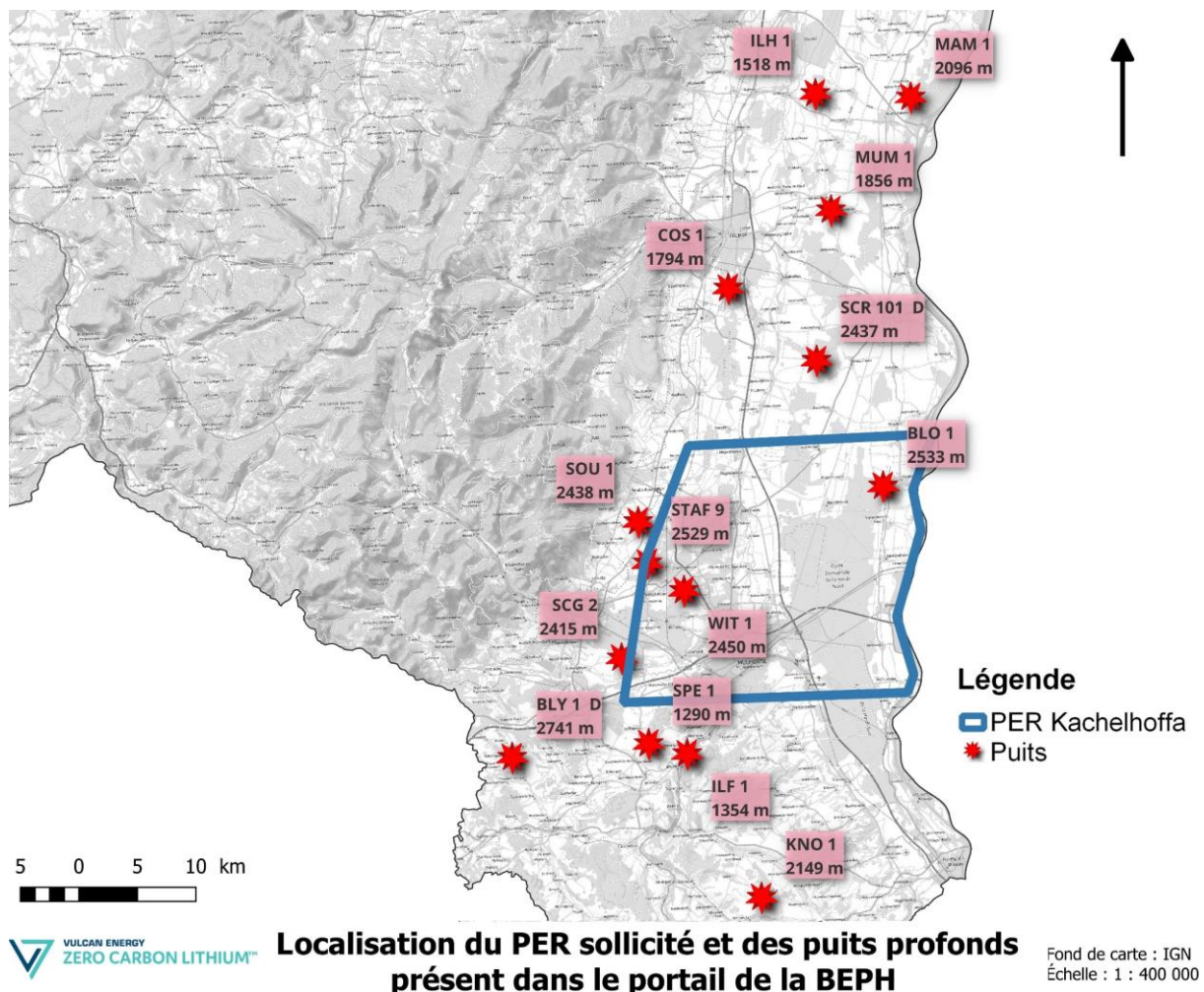


Figure 89 : Carte des puits profonds présents dans le PER dit "Kachelhoffa minéral" (Source : BRGM).

Nom	Indice BSS	X (Lambert 93)	Y (Lambert 93)	Profondeur atteinte (m)	Formation atteinte	Température	Autre
MAM 1	BSS000ZAVR	1039786	6796228	2096	Buntsandstein supérieur	88° à 2 086 m	Grande Oolithe (GO) aquifère ainsi que les grès du Trias inférieur
ILH 1	BSS000YWFF	1031354	6796717	1 518,1	Muschelkalk moyen	/	(GO) aquifère et érodée ou écrêtée par faille. Bajocien, Lettenkhole et Muschelkalk aquifères
MUM 1	BSS000ZACK	1032979	6786596	1 856	Socle	76° à 1 784 m	/
COS 1 (COLS 1)	BSS001AYGY	1024146	6780013	1 794	Muschelkalk supérieur	70° à 1 794 m	Présence huile dans les grès de l'Aalénien, et Muschelkalk fissuré et aquifère
SCR 101	BSS001AYWK	1031754	6773766	2 437	Buntsandstein inférieur	/	Pas de GO, pas de système aquifère ; puits sec
BLO 1	BSS001BAZU	1037420	6763050	2 533,05	Buntsandstein supérieur	/	Peu d'indices d'huiles et faibles, GO présence de fissures recristallisées mais aussi d'eau
SOU 1 (BPR 5)	BSS001CXMD	1016507	6759953	2 438,5	Socle	/	GO faible quantité huile, pas aquifère
STAF 9	BSS001CXMB	1017304	6756480	2 528	Muschelkalk moyen	/	GO, Keuper et Muschelkalk supérieur aquifères, indices relevés mais absence d'huile exploitable
WIT 1	BSS001CXLV	1020384	6754154	2 450	Muschelkalk moyen	Test open hole : 116° à 2 369 m	GO présence d'huile en zone ouverte ou suintement huile dans les fissures plus fines. Présence d'eau peu salée dans GO et Muschelkalk supérieur
SCG 2 (SCHW 1)	BSS001DACE	1015098	6748364	2 414,75	Buntsandstein supérieur	/	GO grès imprégnée sur 12m. Lettenkohle, Muschelkalk et Buntsandstein peu perméables et sans indices. Puits éruptif après remontée des outils d'eau salée à 12 g/L avec légère présence de gaz combustible
BLY 1D	BSS001EKDU	1005849	6739930	2 741	Muschelkalk inférieur	/	GO présence d'huile et aquifère
SPE 1	BSS001ENEB	1017418	6741049	1 290	Jurassique	62° à 1 000 m	/
ILF 1	BSS000YWFF	1031354	6796717	1 518,1	Permien	/	Quelques imprégnations et suintements d'huile dans GO. Keuper supérieur grès imprégné et suintement d'huile, Lettenkohle et Muschelkalk supérieur aquifère
KNO 1	BSS001EPMN	1027114	6727931	2 148,8	Socle	/	GO, Keuper, Lettenkohle et Muschelkalk sec. Buntsandstein 3 m ³ /h d'eau à 70g/L et grès Permien : 10 m ³ /h à 12,3 g/L

Tableau 5 : Puits issus de la BSS (BRGM) présent dans le périmètre du PER dit «Kachelhoffa minéral» (puits avec une profondeur supérieure à 500 m).

Dans le périmètre du PER sollicité les températures et donc le gradient thermique (Figure 90) est très intéressant pour concevoir des projets de géothermie profonde, avec la possibilité de trouver des saumures chaudes (au-delà de 80°C en-dessous de 2 000 m de profondeur) circulant naturellement dans le réseau de fractures et de failles profondes.

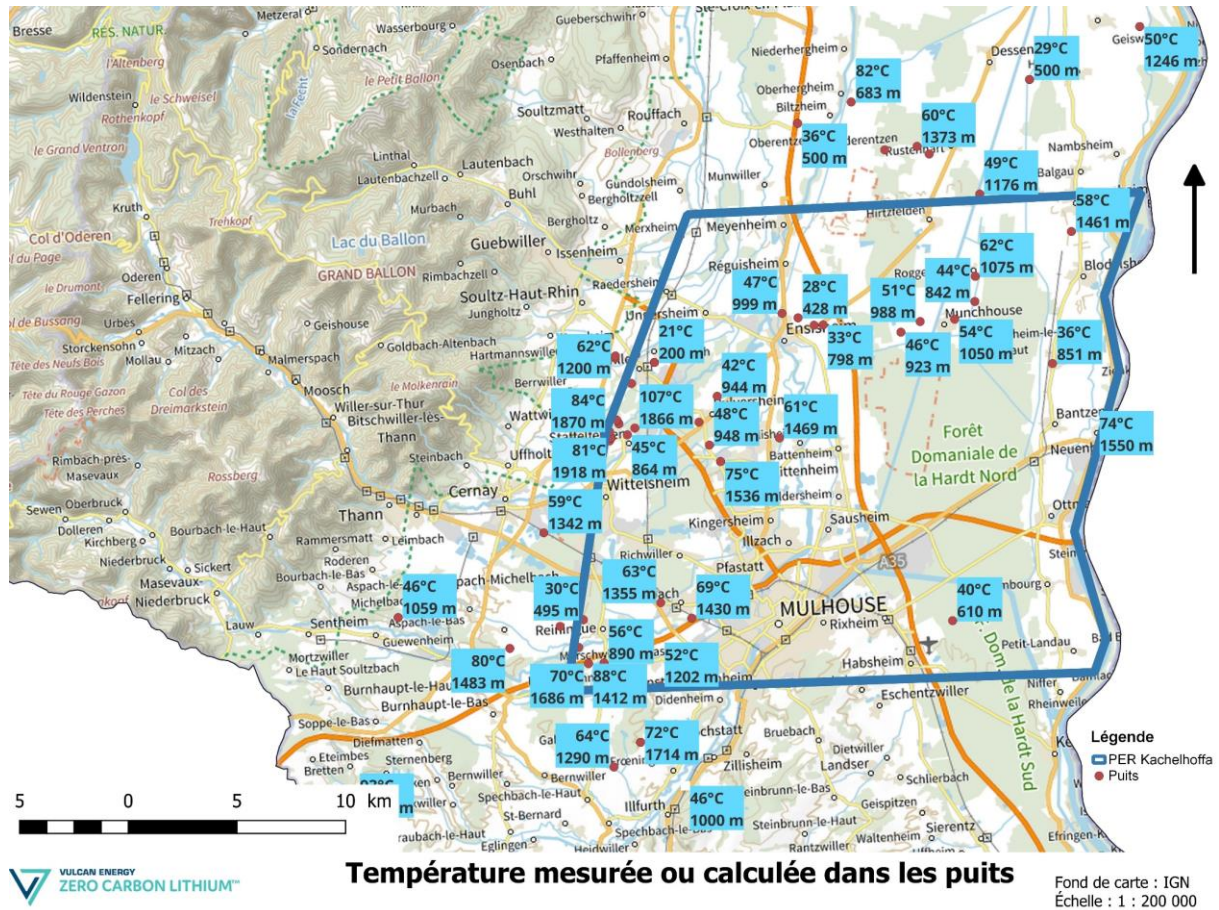


Figure 90 Température mesurée ou calculée dans les puits pétroliers (Source : BRGM).

Dans les bas structuraux (tel le puits de Wittenheim) les cibles géothermiques sont situées entre 2 200 m et 3 000 m de profondeur tandis que sur les horsts (type Illfurth) elles se situent aux alentours de 1 000 m. Les profondeurs sont tout à fait en accord avec le projet et les capacités de Vulcan Energy France à forer des puits géothermiques.

5.3 Connaissances géophysiques

Le Fossé Rhénan Supérieur a été exploré dans le passé (principalement entre les 1970 -1990) par les pétroliers avec de nombreuses acquisitions de lignes sismiques 2D (Figure 91).

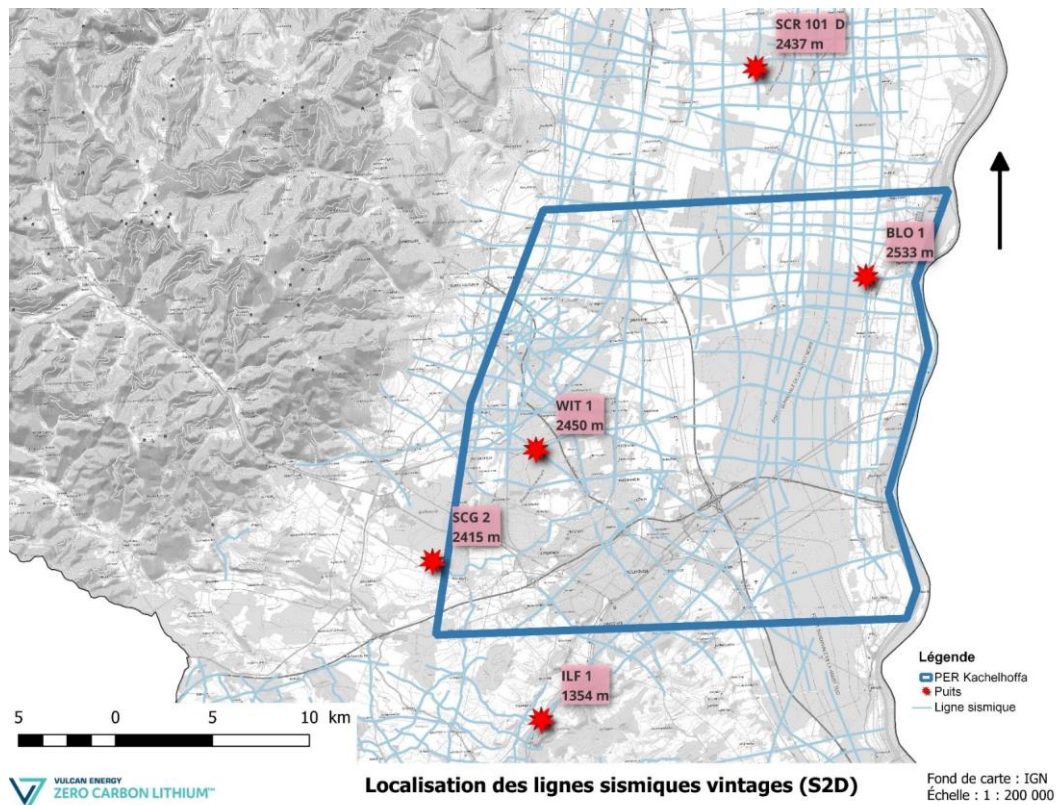


Figure 91 : Carte présentant la position des lignes sismiques vintages 2D dans le périmètre sollicité.

La couverture sismique est assez dense pour fournir à cette époque-là une première image du fossé. Ce sont d'ailleurs une partie ces données qui ont permis au projet GeORG (INTERREG IV Rhin Supérieur) (Figure 92) d'aboutir à leur cartographie des failles majeures dans la modélisation du Fossé Rhénan Supérieur (Figure 93).

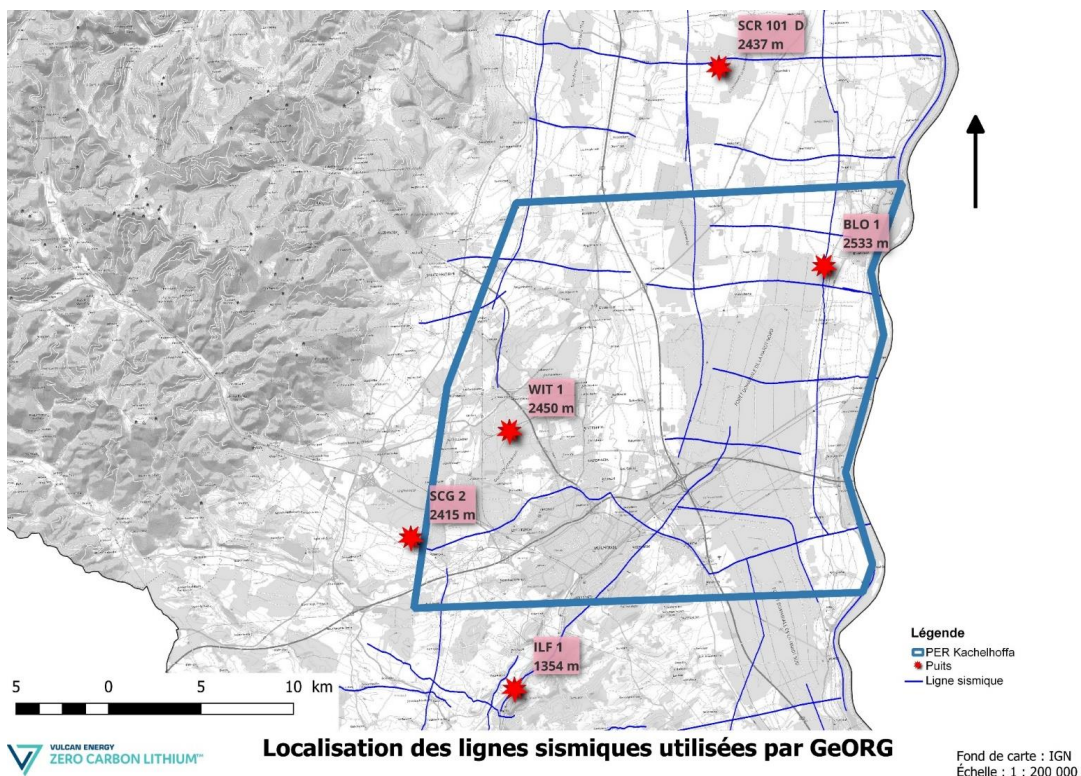


Figure 92 : Carte présentant la position des lignes sismiques vintages 2D utilisées pour la construction du modèle de GeORG.

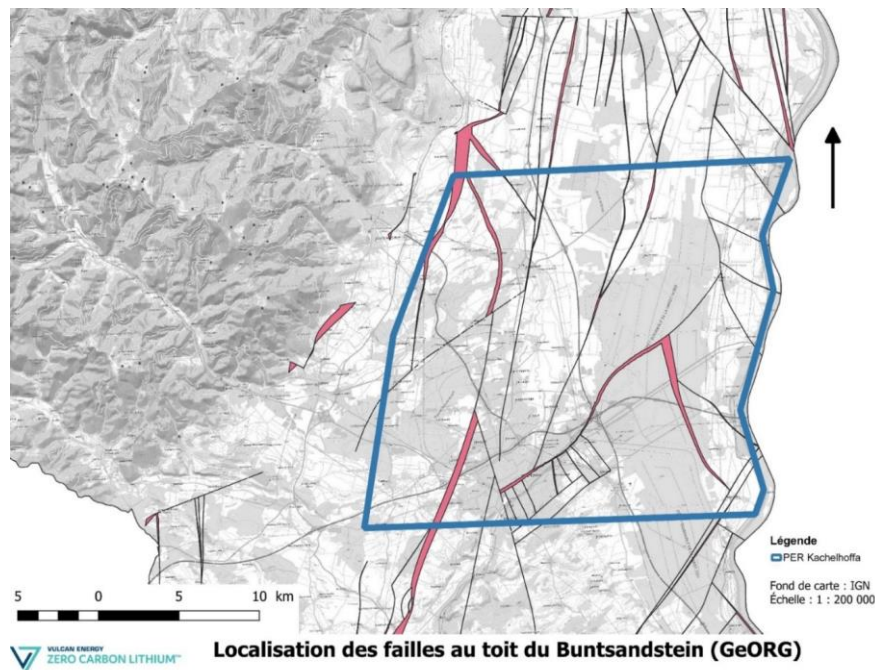


Figure 93 : Carte de la localisation des failles au toit du Buntsandstein (Source : GeORG).

L'interprétation des lignes sismiques vintage (utilisées dans le projet de GeORG Figure 93, ainsi que dans celui de Dezayes cf. Figure 94) permet d'avoir une première idée des structures présentes dans le périmètre du permis sollicitée. Néanmoins, une campagne de sismique 3D est un élément essentiel dans le développement de nouveaux projets géothermiques. En effet, en comparant les figures deux figures (Figure 93 et Figure 94), on observe des différences parfois notables sur la position des failles majeures. D'autant plus que l'agencement structural interprété par Dezayes semble plus simple que celui observé dans le modèle régional de GeORG. Une campagne de sismique 3D apparaît nécessaire afin de lever ces incertitudes.

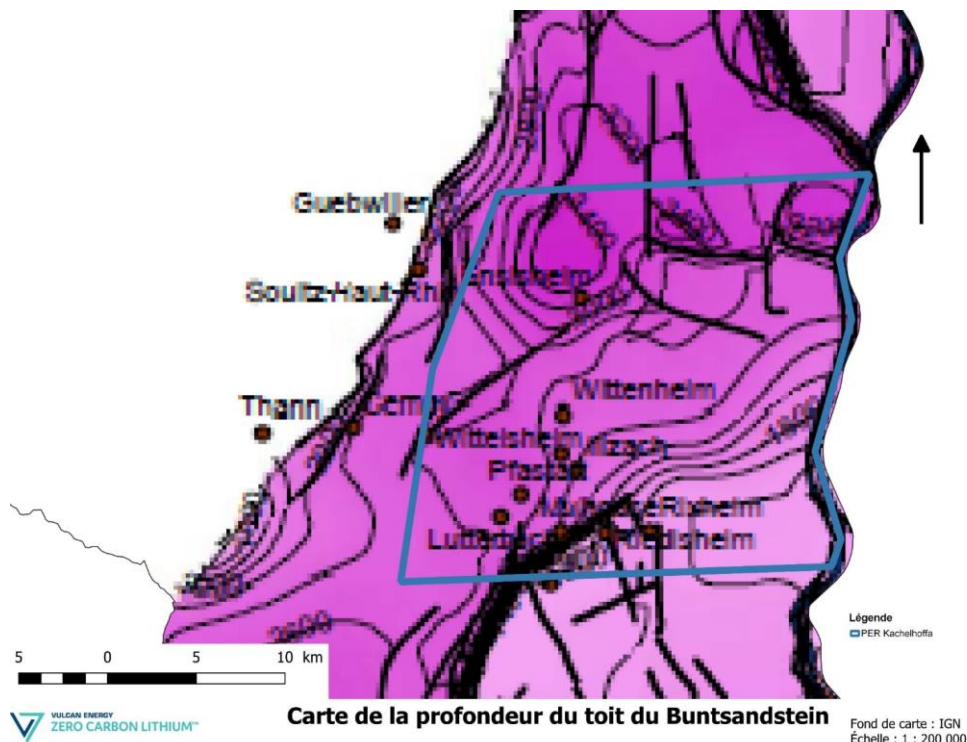


Figure 94 : Carte de la profondeur du toit du Buntsandstein (Source : Dezayes et al 2007) avec la représentation des failles majeures (en noir) présent à cet horizon.

Outre pour la localisation des failles, la qualité de la sismique est un élément important dans les projets de géothermie profonde. En effet dans le Fossé Rhénan Supérieur la couverture sédimentaire étant complexe il est nécessaire de pouvoir bien imaginer toutes les parties de cette dernière. Dans le Haut-Rhin il faut à la fois être capable d'imager les formations salifères peu profondes (dépôts de sel gemme et présence de diapirs) ainsi que la transition, plus ou moins profonde, entre le socle et la couverture sédimentaire.

Comme nous l'avons vu précédemment dans le dossier, les séries salifères affectent différemment la structuration des sous-bassins dans le Fossé Rhénan Supérieur et tout particulièrement dans le Bassin de Mulhouse où l'épaisseur cumulée du sel peut atteindre près de 1 000 m d'épaisseur (à l'est de Guebwiller). On observe dans le secteur sollicité du PER deux rôles tectoniques du sel (Wanesson, 1998) :

- La disharmonie structurale complète entre les séries tertiaires où les failles ont un caractère listrique et s'enracine à la base de l'épais banc de Sel I (Figure 95) et les séries mésozoïques qui ne sont affectées que de failles normales à fort pendage ;
- Par diapirisme sous forme de murs de sel perçant l'ensemble de la série tertiaire jusqu'à proximité de la surface. Ces murs s'alignent sur les principales directions de fracture du Fossé Rhénan méridional (N010° à N020° et N120° à N140°), recoupant à l'emporte-pièce l'ensemble de la série tertiaire, créant de multiples possibilités de piégeage.

La ligne sismique réinterprétée ci-dessous (Figure 95) est très bel exemple de l'utilité d'une campagne de sismique dans la compréhension d'un bassin aussi mouvementé que le Bassin de Mulhouse. En sismique les diapirs de sel (en vert) sont bien visibles car ils entrecoupent les réflecteurs horizontaux et parallèles à la surface (et dont ces derniers se courbent le long de la limite du diapir) représentant les dépôts tertiaires (en jaune) voir parfois quaternaires (en bleu ; cf. Figure 96).

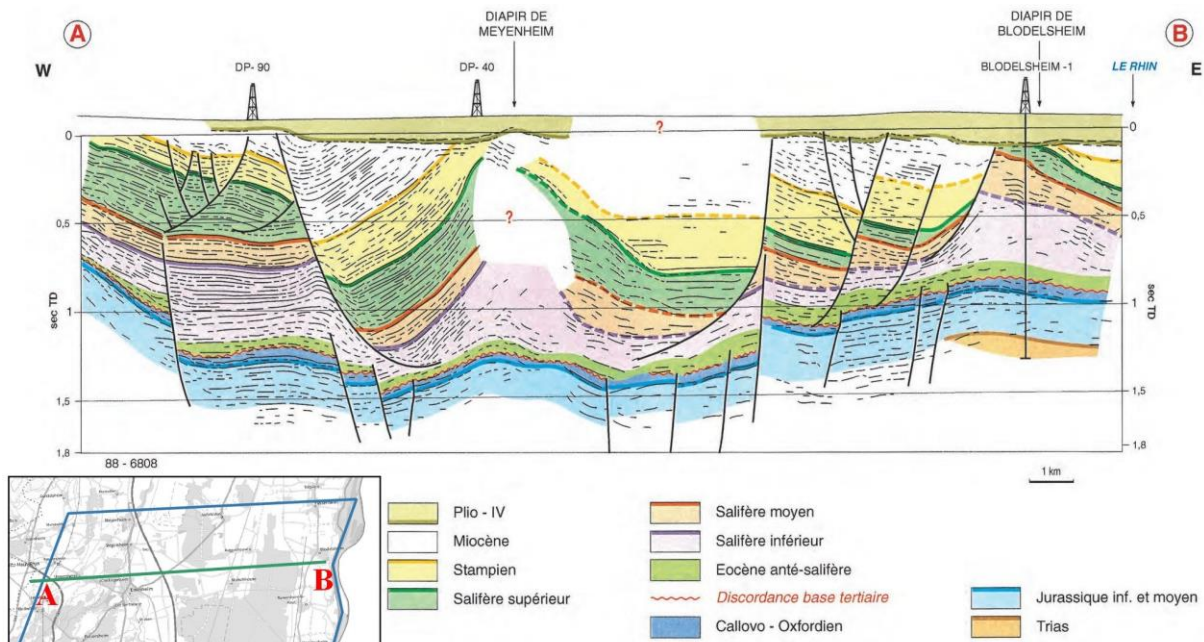


Figure 95 : Profil sismique A à B composite à travers le bassin de Mulhouse et la localisation de la ligne par rapport au périmètre du PER (Source : Wanesson 1998).

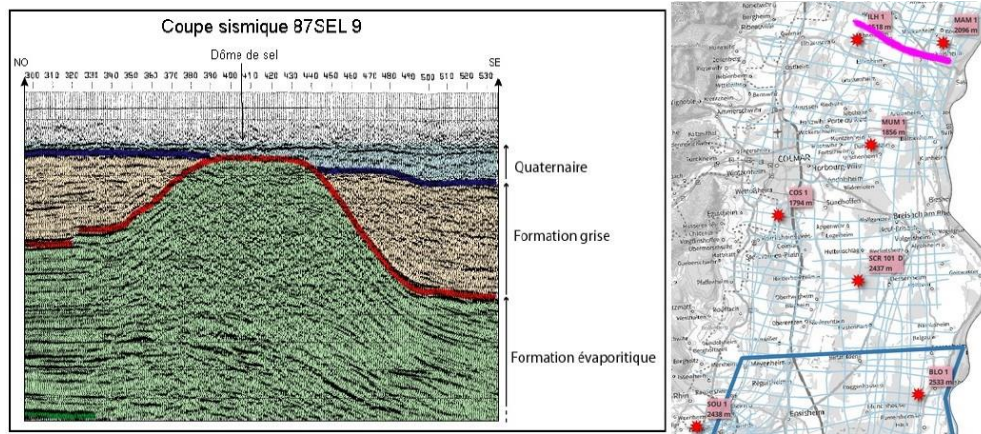


Figure 96 : Une partie de la coupe sismique 87SEL9 montrant le dôme de sel en remontée affectant ainsi la formation d'âge Tertiaire (en jaune) et Quaternaire (en bleu) (Source : Bouiflane, 2008).

Les formations profondes telles que le Muschelkalk, le Buntsandstein, le Permien et la transition avec le socle Varisque sont également des éléments recherchés dans le projet porté par Vulcan Energie France. Sur la figure ci-dessous (Figure 97), on observe l'interprétation de différentes lignes sismiques, respectivement du nord au sud du périmètre sollicité. Si le Muschelkalk (en orange) et le Buntsandstein (en brun) sont globalement constant sur toutes les lignes, nous observons bien la variation d'épaisseur du Permien (en rougeâtre) d'est en ouest et du nord au sud sur le périmètre sollicité. Comme discuté précédemment il sera également déterminant de localiser les diapirs de sel afin de définir la position des futurs forages géothermiques. On observe que sur la ligne B (Figure 97 et Figure 98) ci-dessous qu'il n'y pas de diapirs interprétés sur la ligne, or d'après l'expertise effectuée au §5.2.1 de ce rapport il aurait dû y en avoir deux sur la coupe sismique B et un seul sur la coupe C (Figure 98). Du coup l'acquisition de nouvelles données permettra de clarifier certaines incertitudes actuelles sur le secteur sollicité.

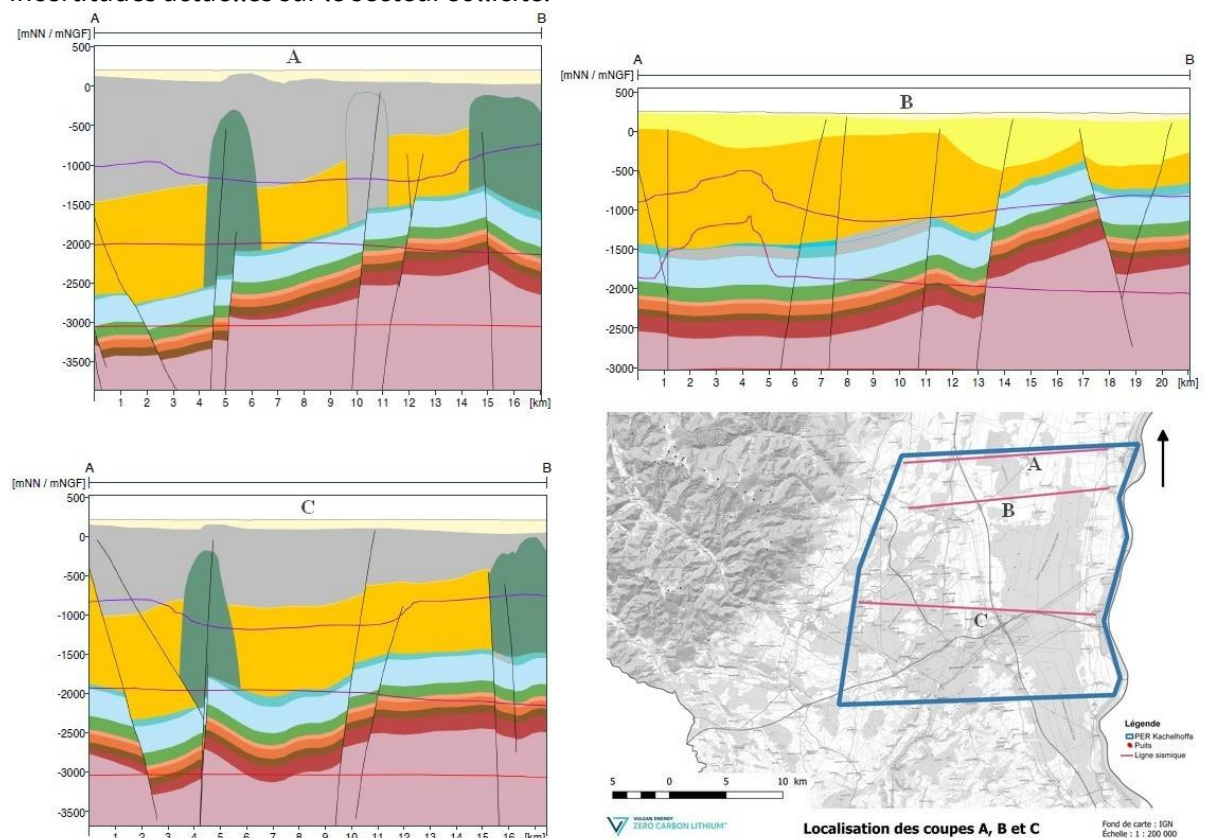


Figure 97 : Interprétation de lignes sismiques à différents endroits du PER du "Kachelhoffa" (Source : GeORG).

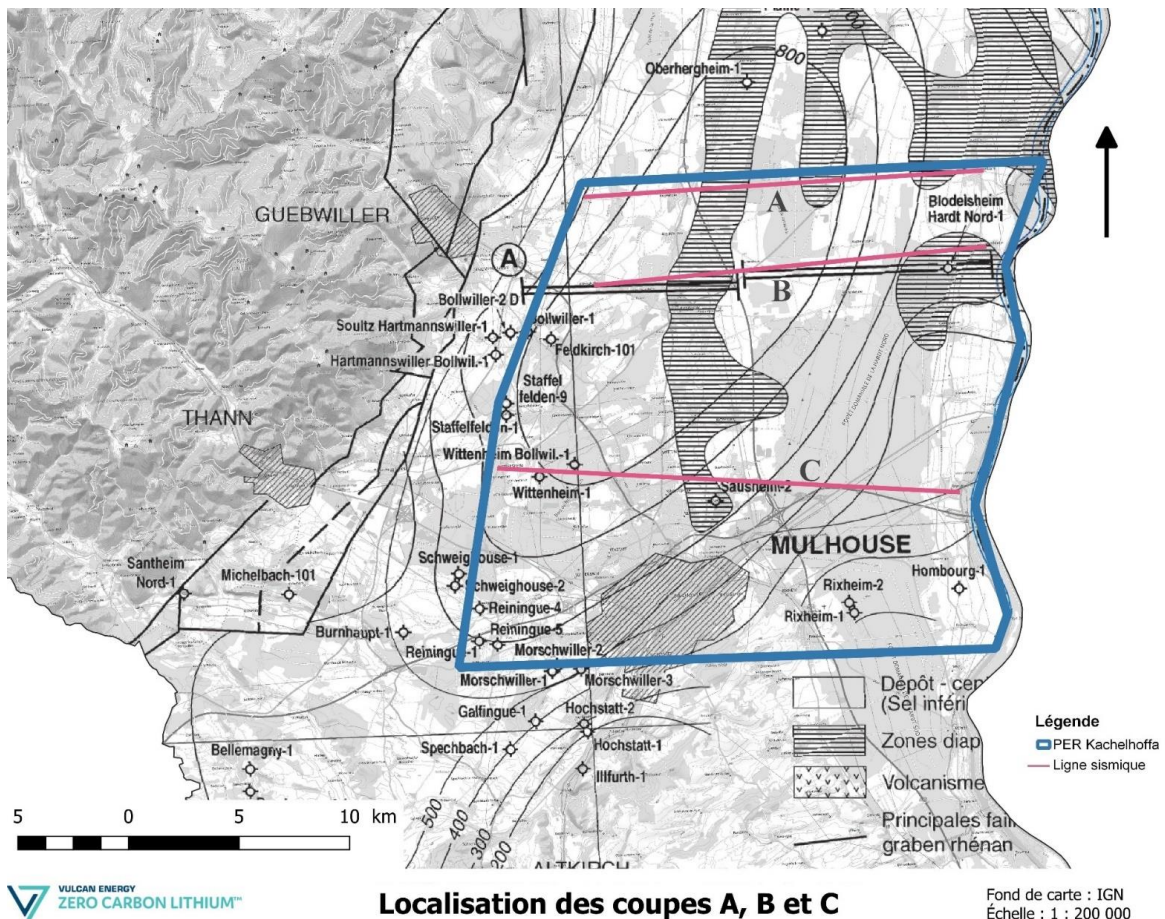


Figure 98: Localisation des lignes interprétées A, B et C ainsi que la localisation des diapirs de sel (Source : GeORG et Wanesson, 1998).

En plus de la sismique, de nombreuses études ont été réalisées dans le Haut-Rhin comme notamment concernant la déformation verticale actuelle de la région. Liaghat et son équipe (1998) a montré l'activité diapirique sur les mouvements verticaux est particulièrement visible sur les profils recoupant les rides salifères obliques au rift. Entre Fessenheim est Neuf-Brisbach des mouvements de surrection sont corrélés avec la présence de diapirs. Les rides salifères orientées NO-SE sont parallèle à l'axe de contrainte principale connu dans la région (N140°E de compression régionale), ainsi l'ouverture et la montée de sel sont facilitées par le champ de contrainte et on atteint 1 mm.an^{-1} de déplacement vertical. Par contre les rides salifères axiales ont une ouverture moins favorable permettant la remontée du sel ($0,5 \text{ mm.an}^{-1}$).

La principale observation des travaux d'Henrion et al (2020 ; Figure 99) est un raccourcissement NNO-SSE entre le front alpin et les montagnes du Jura (superficie A entouré en rouge Figure 99, correspondant à 0.3 mm.an^{-1} de raccourcissement pour 50 km). Le champ de contrainte du Fossé Rhénan Supérieur diffère selon la localisation mais fait du fossé une structure globalement décrochante généralement senestre. Vers le nord de la zone A (vers le périmètre du PER), il n'y a pas de zone où une contrainte claire et constante est observée.

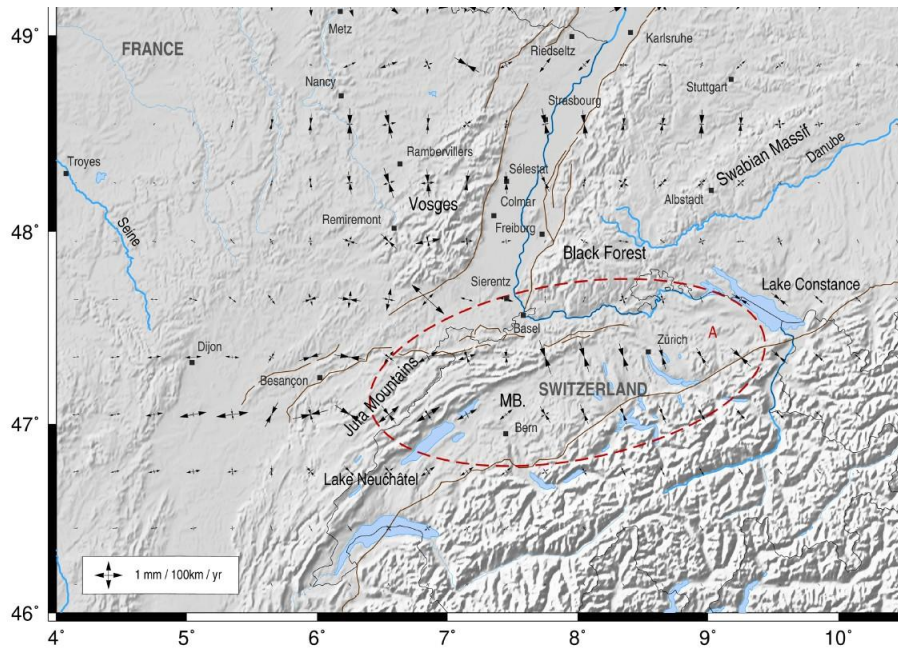


Figure 99 : Tenseur de vitesse de déformation concernant le Fossé Rhénan Supérieur (Henrion et al 2020).

D'après Illies et Greiner (1979), le sud et le nord du graben rhénan sont en subsidence alors que le centre est en soulèvement (Figure 100).

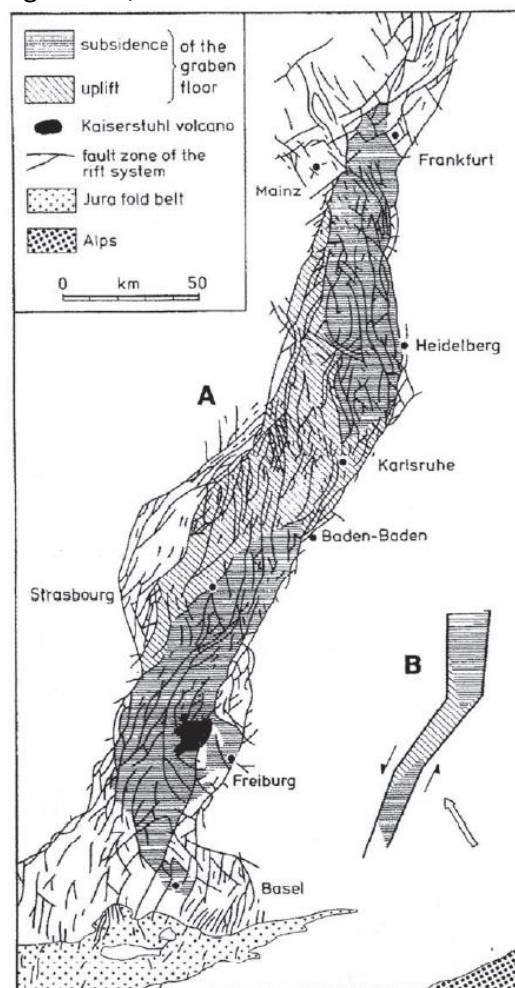


Figure 100 : Activité néotectonique dans le Fossé Rhénan Supérieur (Illies et al., 1979).

Des analyses de données cinématiques ont été effectuées dans le graben rhénan par Lopes et Behrmann (2006 ; Figure 101). Les mesures de glissement de failles ont été recueillies et l'analyse cinématique qui en résulte montre une forte prédominance de failles à décrochement et certaines failles normales à obliques (Lopes et Behrmann, 2006). Dans l'ensemble, il y a une cohérence régionale dans les orientations des axes d'extension et de raccourcissement dans toute la zone d'étude.

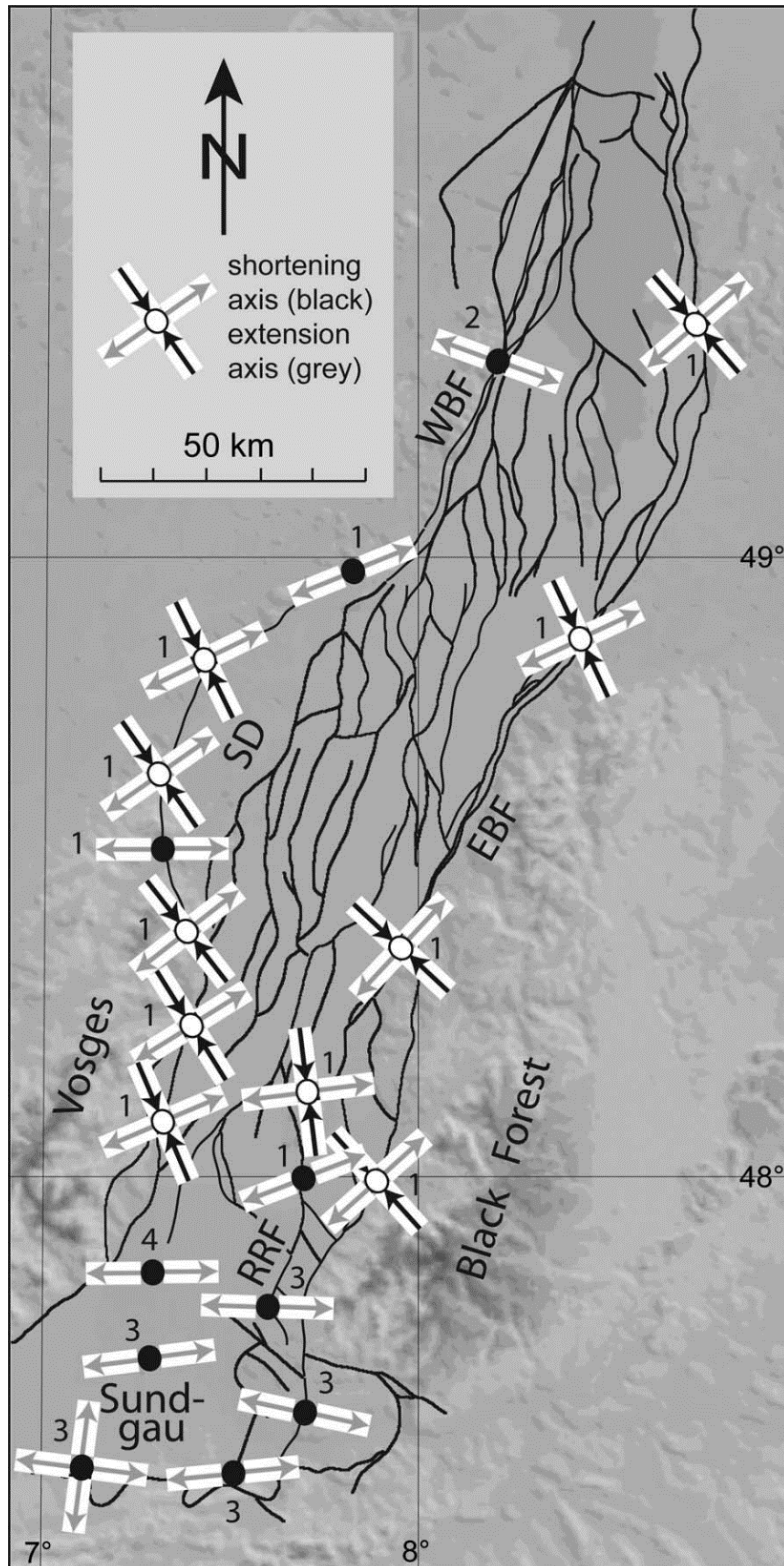


Figure 101 : Carte de la cinématique actuelle du Fossé Rhénan Supérieur (Source : Lopes et Behrmann, 2006).

En résumé, de nombreuses connaissances sont disponibles à la fois en termes de géologie, de structurale et de géophysique, ce qui permet de faire cette demande concernant le Permis Exclusif de Recherches dit « Kachelhoffa » en ayant une connaissance *a priori* du potentiel local pour de la géothermie profonde. De nouvelles données seront nécessaires pour peaufiner les projets mais les éléments déterminants à la réussite de projets géothermiques tel que la température (Figure 102), la présence de différents horizons cibles et le réseau de failles naturellement sont disponibles dans le périmètre sollicité.

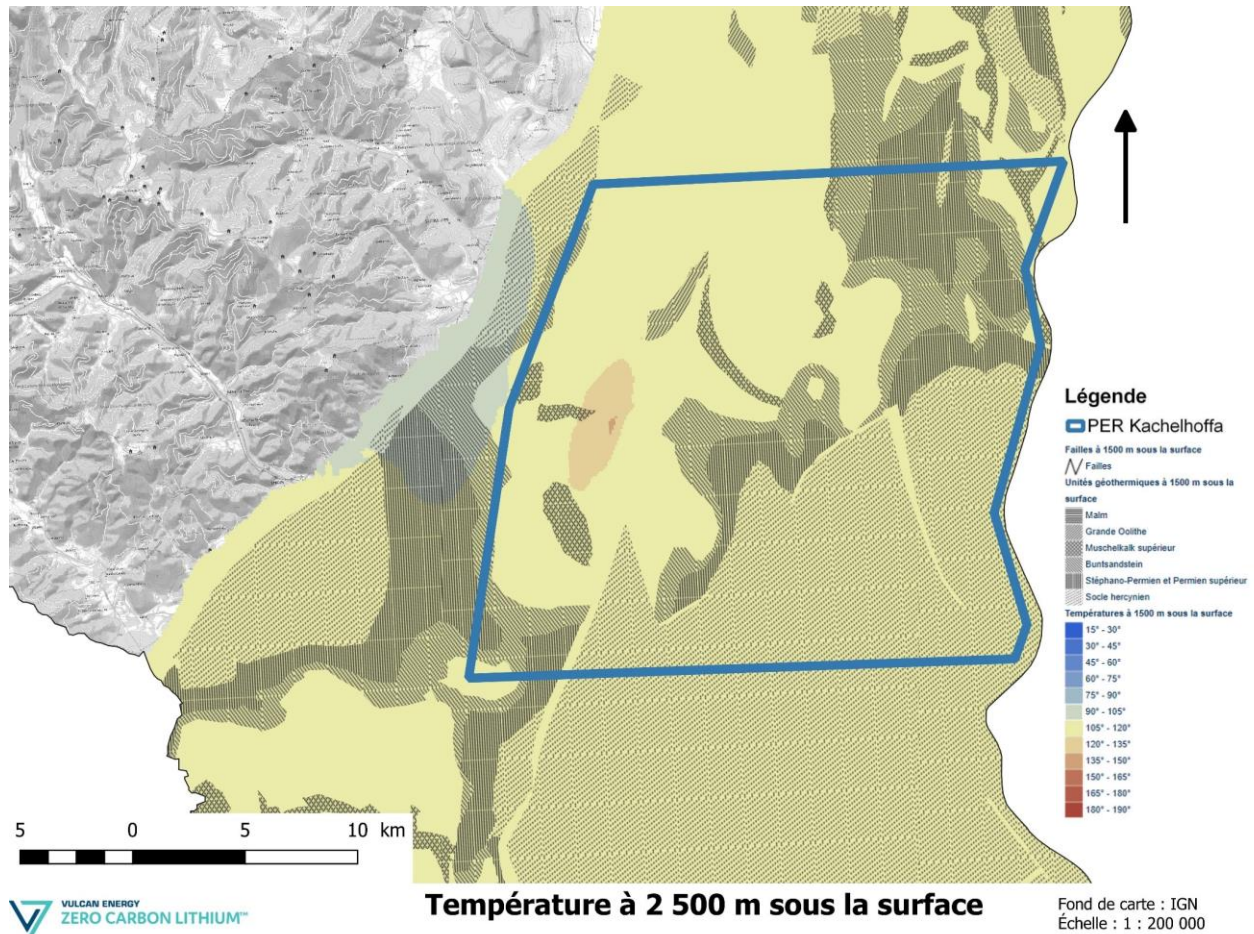


Figure 102 : Température estimée à 2 500 m de profondeur (Source : GeORG).

6 Impacts socio-économiques

6.1 Impact sociétal

6.1.1 Acceptabilité

L'acceptance des projets est une étape cruciale dans le plan de développement de Vulcan Énergie France. Elle pourra s'appuyer sur la méthode mise en œuvre de l'autre côté du Rhin où elle se décline en 5 étapes :

- Expliquer le projet,
- Écouter et prendre en considération tous les points de vue,
- Accompagner sur le terrain,
- Participer au développement de la filière,
- Transmettre aux nouvelles générations.

Expliqué le projet

S'inscrivant dans des temps longs, il convient de parfaitement décrire les différentes phases d'un projet de production d'énergie renouvelable et de lithium géothermal. Cela passe nécessairement par un important investissement humain et en temps afin d'échanger sur les finalités du projet, ses répercussions sur le territoire et en particulier ses risques et leurs mitigations. Pour ce faire, le Groupe Vulcan ouvre un bureau d'accueil dédié aux citoyens (Figure 103) et y organise des rencontres afin de mettre en place le lien avec les personnes vivant sur le territoire concerné par un projet (1 bureau d'accueil par site). Un service téléphonique de type « Hotline » est également mis en place afin de pouvoir répondre à des sollicitations plus larges que concernant uniquement le projet local.



Figure 103 : Ouverture d'un bureau d'accueil dans les villes accueillant un projet de production d'énergie renouvelable et de lithium géothermal.

Écouter et prendre en considération les points de vue

Pour les phases importantes du projet, des réunions publiques d'informations réunissant toutes les parties prenantes sont organisées (Figure 104). D'abord détaillé sous la forme d'ateliers en petit groupe sur des thématiques techniques, ces échanges sont ensuite synthétisés lors d'un rendu général où les points de vue et les questionnements sont présentés à tous avec des propositions de points d'actions par le porteur de projet.



Figure 104 : Réunion publique d'échanges autour du projet de Vulcan Energie Ressourcen en Allemagne.

Accompagner sur le terrain

Une importante phase de communication est mise en œuvre pour toutes les périodes durant lesquelles des opérations seront réalisées sur le terrain (Figure 105). L'objectif étant de présenter les équipements qui seront mis en œuvre au plus près de la population et de détailler encore une fois les plannings associés et les objectifs visés.





Figure 105 : Présentation des équipements d'acquisition de sismique réflexion 3D dans le cadre du programme exploratoire.

Participer au développement de la filière

Vulcan Énergie France s'inscrit dans la stratégie de transparence du Groupe Vulcan qui participe abondamment aux différents congrès scientifiques (Figure 106) pour y présenter ses projets, ses travaux et ses résultats. Moteur dans le développement de la filière, le Groupe Vulcan participe à de nombreux projets de recherches européens afin d'échanger et améliorer la technicité des projets d'extraction de lithium et de production d'énergie renouvelable.



Figure 106 : Participation aux congrès géothermiques et lithium afin de présenter les travaux du Groupe Vulcan au reste de la communauté industrielle et académique.

Transmettre aux nouvelles générations

Un effort particulier est également accordé à la transmission (Figure 107) du savoir et de la passion des métiers qui sont nécessaires au développement de nos projets. De l'exploration au forage, en passant par la chimie d'extraction et le design des installations de surface, c'est toute la chaîne de valeur que peut présenter le Groupe Vulcan.



Figure 107 : Ouverture de la centrale géothermique d'Insheim aux élèves, aux élus, aux associations et à nos partenaires industriels afin de promouvoir la filière géothermique et lithium offrant de nombreuses opportunités.

Le contexte alsacien a été marqué initialement en 2015/2016 (Source : (Chavot et al. 2018)) puis en 2020 (Source : DNA du 09/12/2020) par des renoncements au développement de projets de géothermies profondes. Les études sociologiques conduites par la suite ((Chavot et al. 2021)) ont permis d'identifier les raisons ayant pu conduire à un rejet de ces projets par une partie de la population et d'autres d'apporter des recommandations pour améliorer la communication à destination des citoyens ((Meller et al. 2018), (Trutnevyte & Wiemer 2017), (Virginie SCHMIDLE-BLOCH 2019) et (Tobia Spampatti 2022)).

Il conviendra en priorité d'apporter des éléments de réponses aux attentes des habitants concernant les risques inhérents à un projet industriel (Figure 108).

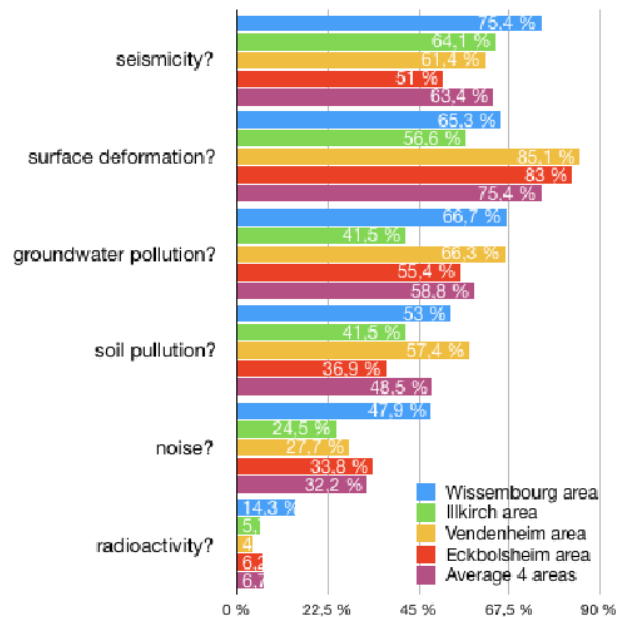


Figure 108 : Perception des risques pour les personnes informées (n=268) sur les projets de géothermie profonde. Question posée : Selon vous, l'exploitation d'une centrale géothermique peut générer... (Source : (Chavot et al. 2019))

Pour ce faire, un retour d'expérience sur les incidents devra être réalisé de manière transparente en y intégrant les raisons techniques et de gouvernance ayant conduit à leur occurrence. Il conviendra également de présenter la stratégie de mitigation qui sera mise en œuvre par Vulcan Énergie France en s'appuyant sur des cas concrets ayant permis le fonctionnement opérationnel de sites industriels (Soultz-sous-Forêts, Landau, Insheim). Cette transparence concernant la compréhension et la prise en compte des risques paraît absolument nécessaire pour l'acceptance des projets et la confiance dans l'opérateur ayant la charge de la réalisation des projets (Figure 109).

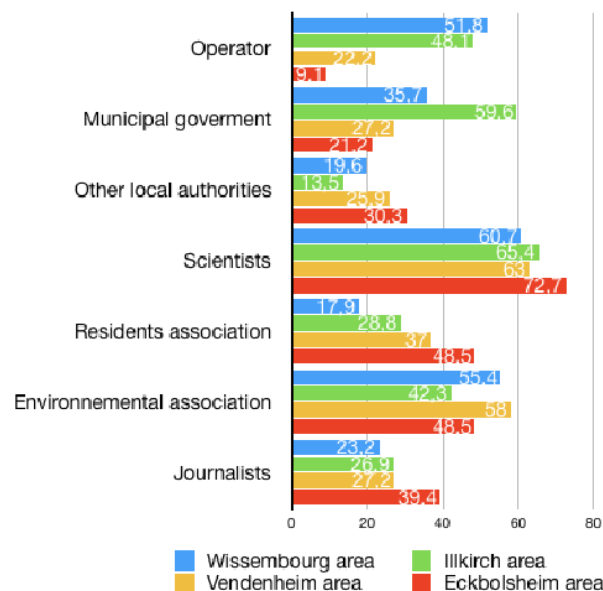


Figure 109 : Variation de la confiance des personnes questionnées (n=221) concernant la provenance d'une information. Question posée : En qui avez-vous le plus confiance pour vous informer concernant les aspects techniques de la géothermie profonde ? (Source : (Chavot et al. 2019))

6.1.2 Gouvernance

Les récents évènements liés au projet dit « GeoVen » sur le ban communal de Vendenheim ont conduit à une profonde remise en question du modèle de gouvernance des projets de géothermie. Une réelle nécessité d'appropriation des projets énergétiques par les élus et les citoyens apparaît nécessaire. Cette appropriation des projets passera par une plus forte intégration des projets au sein des plans de développement énergétiques des EPCI concernées. La mise en place des Plans Climat et leurs déclinaisons dans des Schémas Directeurs des Énergies, mis en œuvre par exemple au sein de l'Eurométropole de Strasbourg et de l'Alsace du Nord, permet d'apporter aux concitoyens une vision plus territoriale et plus intégrée des projets de production d'énergie renouvelable et de lithium décarboné.

L'autre chemin d'intégration passe également par la mise en place de comité de suivi de projet, permettant d'assurer une continuité d'information et d'échange avec les parties prenantes. La mise en place de ces comités apparaît maintenant actée avec par exemple son ordonnance dans l'Arrêté ministérielle du 22 juin 2022 statuant de l'obtention d'un Permis Exclusif de Recherches de gîtes Géothermiques.

Enfin, le type de structures de projets pourra également faire partie d'une réflexion conjointe afin de définir les conditions d'investissements et de gouvernance. De nombreuses collectivités et EPCI mettent en place des sociétés de projets avec les industriels afin de coconstruire les objectifs de développement énergétiques du territoire (Exemple : GéoRueil entre Engie et la Ville de Rueil Malmaison).



Figure 110 : Exemple de réflexion autour d'un montage de sociétés de production d'EnR. (Source : (Anon 2017))

6.2 Impact économique

6.2.1 La filière lithium

Le projet de production de lithium géothermal décarboné porté par Vulcan Énergie France, s'inscrit dans la stratégie Européenne d'électrification du parc automobile. Encore récemment soutenu par la Présidence de la République Française (Source : Interview du Président Emmanuel Macron aux Échos le 16 octobre 2002), cet objectif du 100% électrique à 2035 ne doit pas se faire au détriment de notre souveraineté, « il faut y veiller et pour cela, travailler sur toute la chaîne de valeur.

Nous avons des mines de lithium en France et nous allons les développer grâce au nouveau code minier ; c'est clé pour notre souveraineté .

En termes d'investissements, le coût estimatif de la partie extraction du lithium géothermal représente plus de 150 m€ (Figure 111).

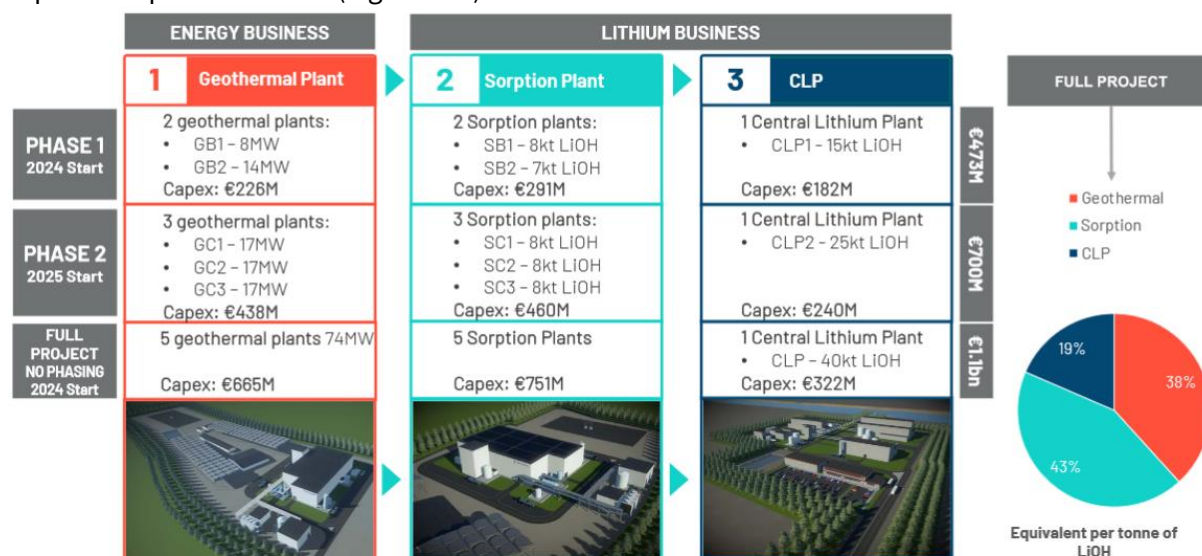


Figure 111 : Description des phases et des coûts de développement prévus pour le projet Outre-Rhin de Vulcan Energie Ressourcen GmbH.

Des études sont actuellement menées au sein de Vulcan Energy Engineering afin de sécuriser les sources d'approvisionnement en matériaux. Si l'impact écologique, LCA (Life Cycle Analysis), a d'ores et déjà fait partie d'une large étude menée par une société spécialisée ((Minviro 2021) et (PELL & LINDSAY 2022)), une LCCA (Life Cycle Cost Analysis) sera également réalisée afin de cartographier les dépenses assujetties à la construction, à l'exploitation et à la maintenance de la partie extractive. D'un point de vue des emplois directs pour le DLE, au moins 50 personnes seront nécessaires sur site (Tableau 6). Par ailleurs, dans la filière de la chimie, le ratio emplois directs / indirects est de l'ordre de 4 à 5 (Source : ADEME) faisant que chaque site DLE permettra l'emploi indirect d'au-moins 200 personnes.

Catégorie	Description du poste
Administratif	Assistance
Ingénieur	Ingénieur Process
Ingénieur	Programmeur
Ingénieur	Ingénieur projet
Ingénieur	Ingénieur environnemental
Technicien	Commande automate
Technicien	Superviseur
Technicien	Traitement de la saumure
Technicien	Process DLE

Tableau 6 : Catégorie et description des postes nécessaires au fonctionnement d'une usine de sorption adjointe à la centrale géothermique.

Concernant la partie raffinage du Chlorure de Lithium (usine de conversion dite - CLP pour Central Lithium Plant), c'est plus de 80 employés par site qui seront nécessaires au bon fonctionnement de l'usine avec là encore de nombreux emplois indirects à la clef (au moins 320). Cette phase de conversion n'est à l'heure actuelle pas encore planifiée côté français et pourra soit se faire sur le territoire national, soit de manière conjointe avec les usines de conversions qui seront construites en Allemagne.

6.2.2 Dépenses, emplois et décarbonation

Un projet de centrale de production à partir des saumures géothermales nécessite un important investissement financier (50 m€, (Ravier et al. 2016)). Il est dès lors intéressant d'analyser la distribution de cet investissement et d'appréhender à quel point ce type de projets peuvent bénéficier à l'activité économique locale et nationale. Ce type d'études sur la répartition des dépenses d'un projet de géothermie et d'extraction de lithium ne sont que peu réalisées. Concernant l'extraction de lithium, cette analyse est actuellement en cours dans le cadre de la construction du démonstrateur (échelle 1/200) qui sera déployé sur la centrale géothermique de Landau (Allemagne). Concernant la production de chaleur, l'exemple de la centrale de Rittershoffen permet d'évaluer l'impact économique et sociétal du projet ((Dalmais et al. 2022)). Il apparaît que le choix des équipements et des prestataires permet de promouvoir largement un savoir-faire local et national (Figure 112) se répercutant également sur la création d'emplois (Figure 113).

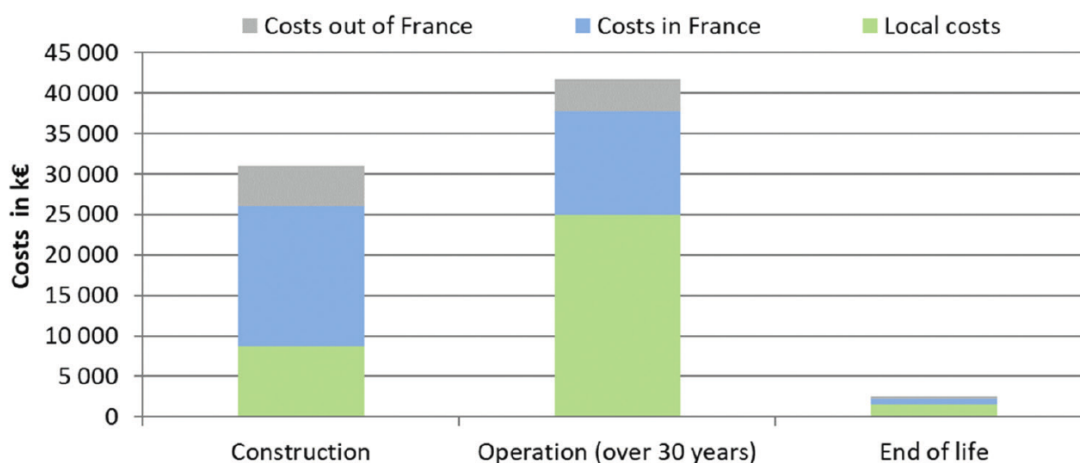


Figure 112 : Répartition des coûts d'un projet de géothermie profonde et localisation des dépenses. Cas de la centrale géothermique de Rittershoffen. (Source : (Dalmais et al. 2022))

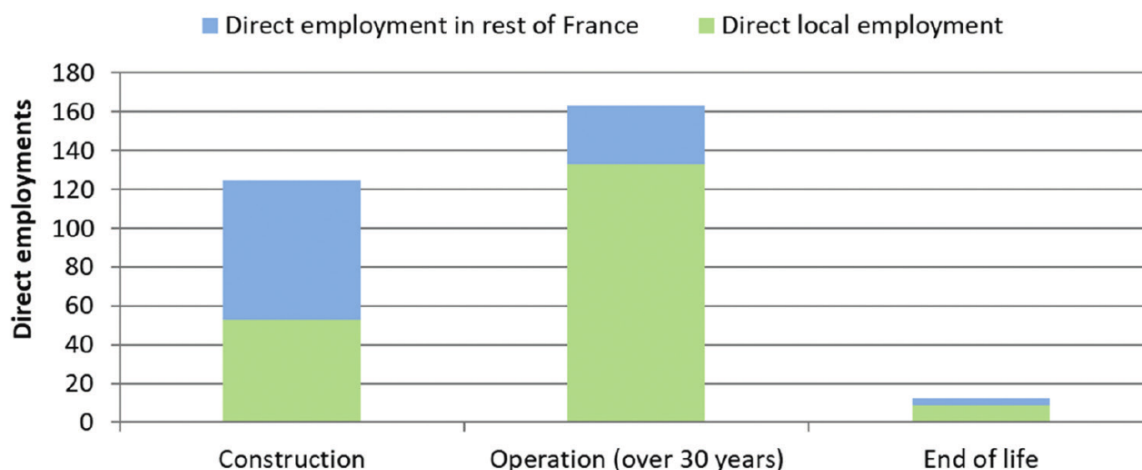


Figure 113 : Part des emplois directs et indirects d'un projet de géothermie profonde dans le cas de la centrale géothermique de Rittershoffen. (Source : (Dalmais et al. 2022))

A l'image de l'agglomération de Mulhouse, de nombreux réseaux de chaleur (Figure 114) sont d'ores et déjà actif dans le périmètre sollicité et ouvre l'opportunité de diversifier et sécuriser d'autant plus l'approvisionnement de ces réseaux.

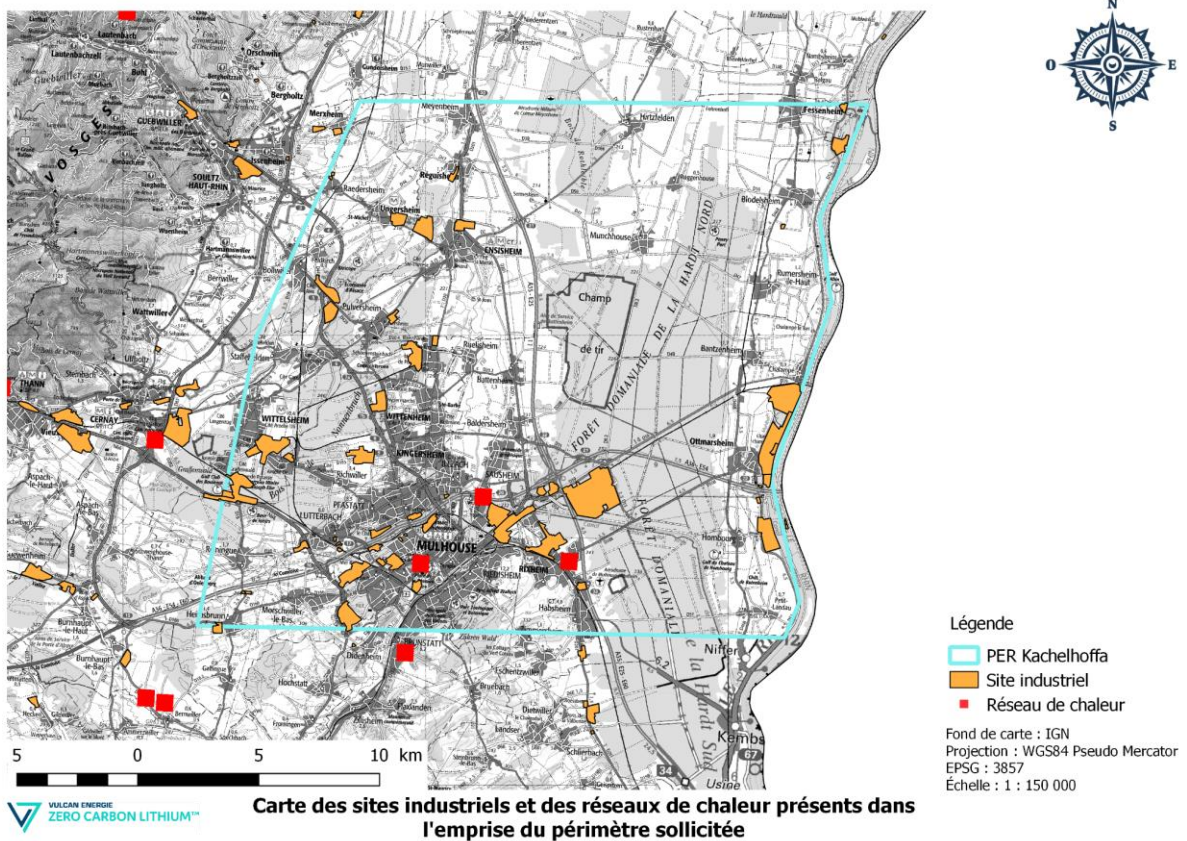


Figure 114 : Carte des sites industriels et de réseaux de chaleur présents dans l'emprise sollicitée.

Les dernières analyses des réseaux de chaleur dotés d'une solution géothermique confirment la pertinence de cette solution du point de vue tarifaire (Figure 115) avant même les récentes problématiques géopolitiques affectant le cours du gaz naturel (Figure 116).

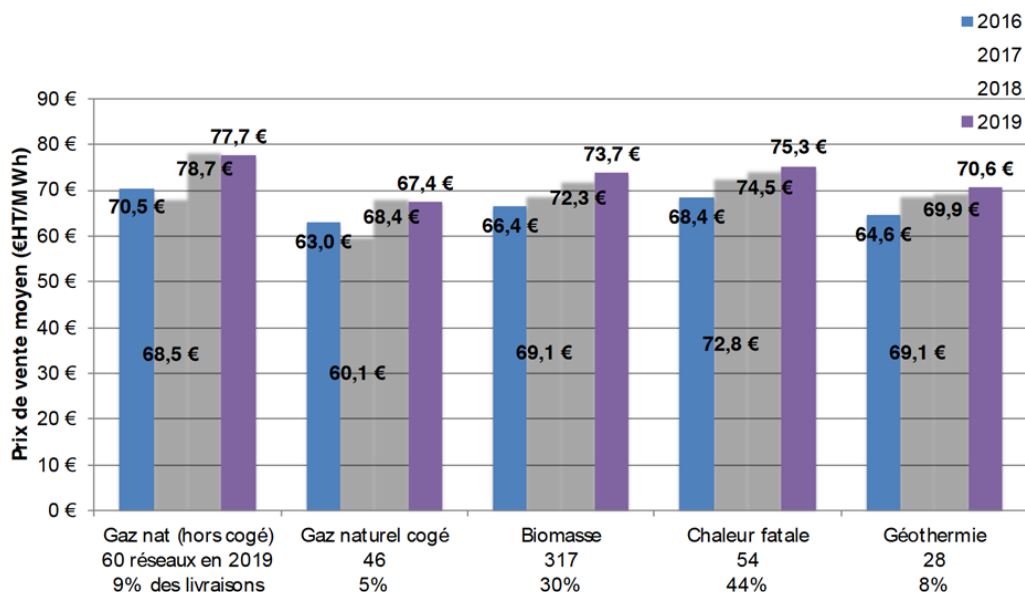


Figure 115 : Évolution du prix de vente moyen de la chaleur de 2016 à 2019 en fonction de l'énergie majoritaire utilisée par le réseau. (Source : (Anon 2021))

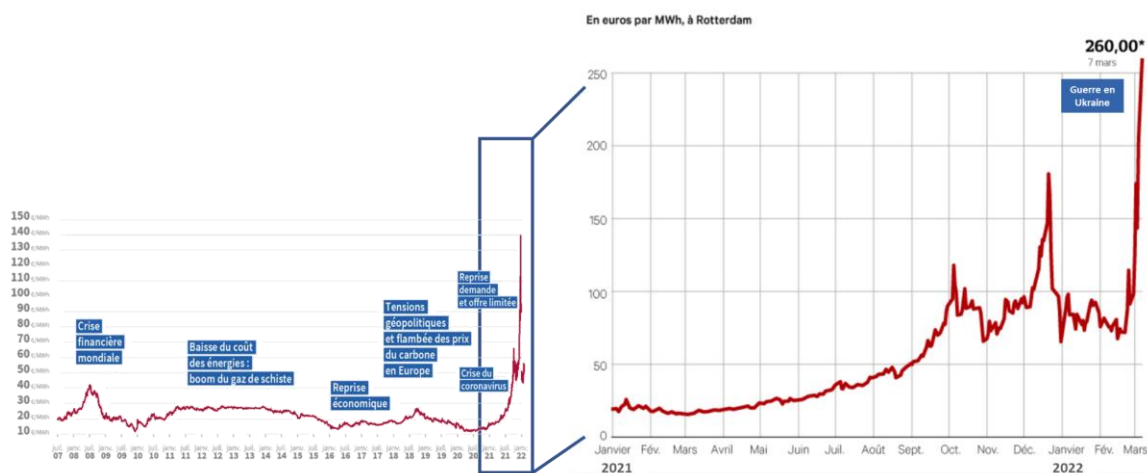


Figure 116 : Prix du gaz (en €/MWh) de juillet 2007 à mars 2022. (Source : Bloomberg)

On retrouve cette stabilité tarifaire pour les réseaux de chaleur comprenant une large part d'EnR (Figure 117) en leur sein car il s'agit d'une production s'affranchissant grandement des dépendances extérieures. C'est bien la géothermie qui s'affirme comme la source la plus locale et ayant une part variable la plus faible pour l'édition de son coût de vente (Figure 118).

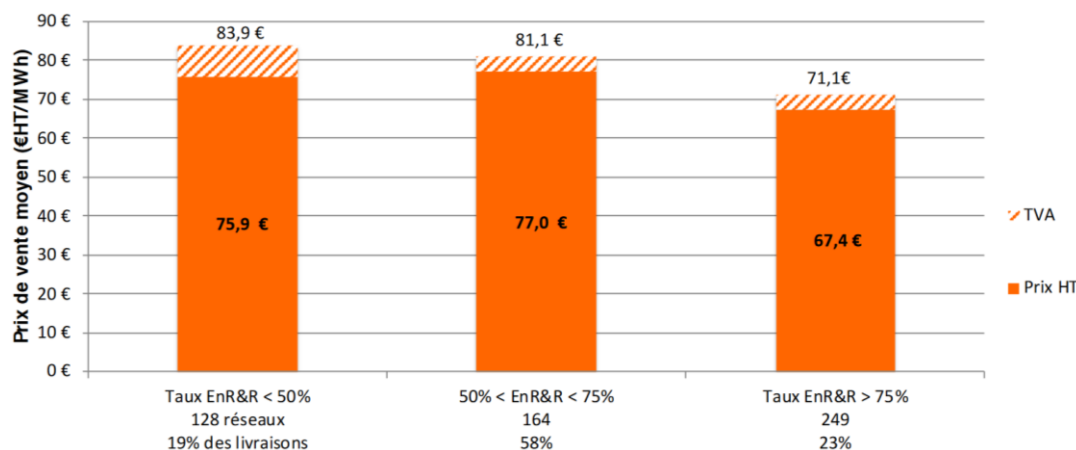


Figure 117 : Impact du taux d'EnR dans un réseau de chaleur sur le prix de vente moyen de la chaleur. (Source : (Anon 2021))

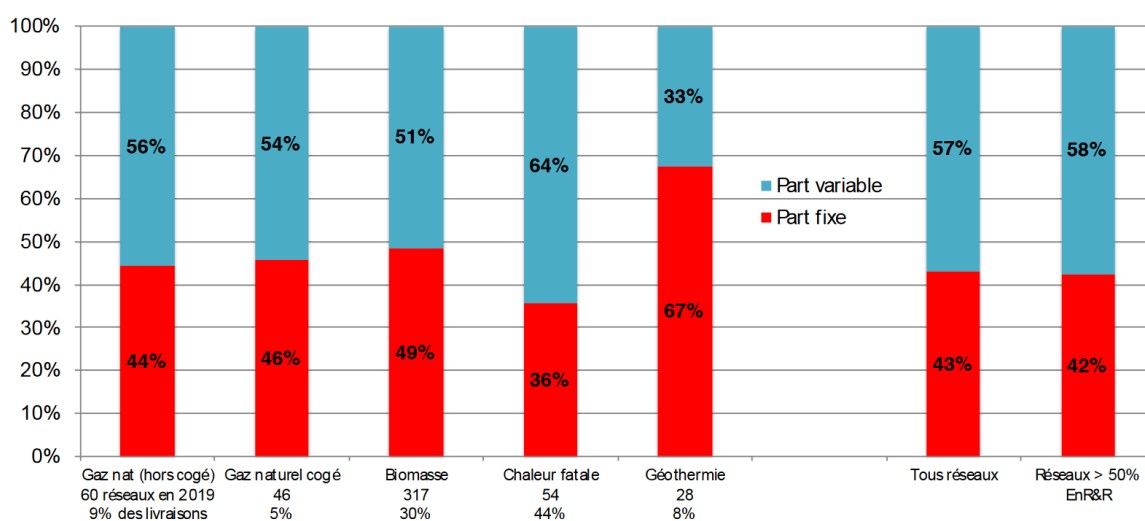


Figure 118 : Répartition part fixe et part variable des recettes en fonction de l'énergie majoritaire utilisée par le réseau en 2019. (Source : (Anon 2021))

Un développement de cette ressource énergétique locale non délocalisable permettra d'apporter un avantage commercial indéniable à toute entreprise faisant le choix de s'implanter en Alsace du Sud afin de bénéficier, entre autres, d'une ressource énergétique de base à tarif pérenne et décarboné. Cette capacité d'attractivité pourra être mise en avant pour toutes les futures zones d'activités sans pour autant oublier l'important travail de planification pour apporter des solutions au plus de 2.6 TWh de consommation de chaleur (Figure 119) dans et à la proche périphérie du périmètre sollicité dans le cadre de cette demande d'octroi de Permis Exclusif de Recherches.

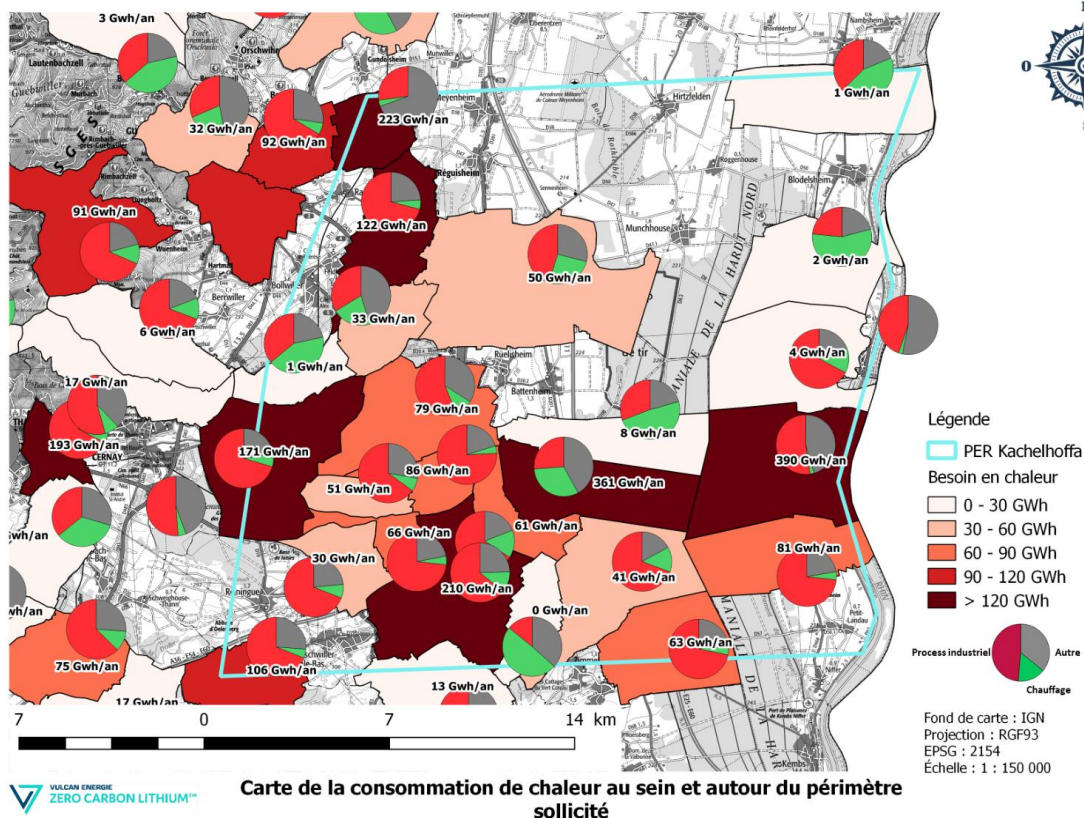


Figure 119 : Consommation de chaleur au sein et à proximité du territoire sollicité. (Source : CEREMA)

6.2.3 Substances connexes

La saumure géothermale du Fossé Rhénan Supérieur possède des calories, des composés chimiques (Figure 120) et des gaz dissous (Figure 121).

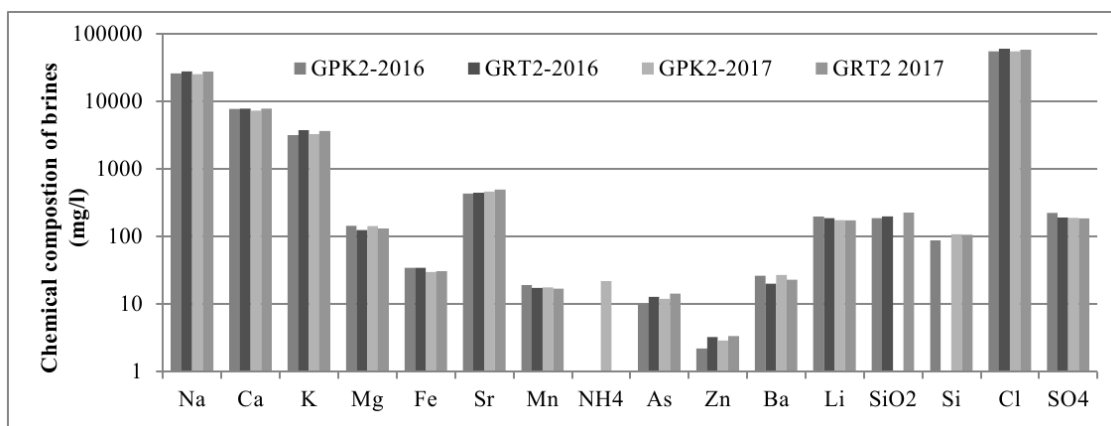


Figure 120 : Suivi géochimique des saumures géothermales des projets de Soultz-sous-Forêts et de Rittershoffen. (Source : (Mouchot et al. 2018))

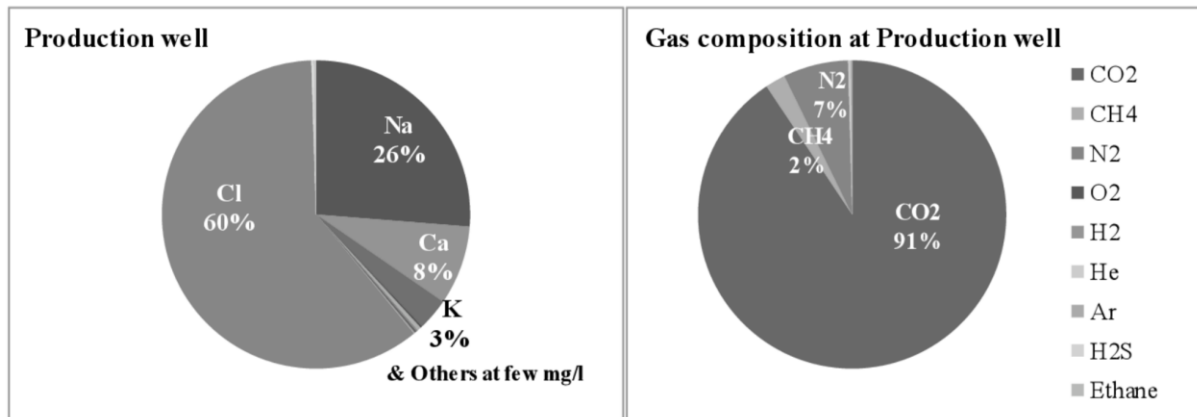


Figure 121 : (à gauche) Composition géochimique de la saumure issue du puits producteur de Rittershoffen (GRT-2) et (à droite) la composition en gaz dissous dans cette même saumure. (Source : (Mouchot et al. 2018))

En considérant ces substances comme étant annexes à la production de lithium, il sera possible d'entamer des études de valorisation pour ces coproduits. En effet, malgré son identification depuis les années 1990 ((H. Pauwels 1989)), le lithium n'a été que très récemment considéré comme critique et valorisable.

Ainsi, d'autres minéraux tel que le Strontium, le Magnésium, Silicate et Zinc (Figure 122) pourront être intégré dans l'analyse de valorisation car faisant partie des matériaux jugés critiques en termes de souveraineté.

Geothermal power plant	CRMs	Mean concentration in the brine (mg/L)	Market interest	Prices in 2022 (€/ton)	Possible income per year (€)
Sultz-sous-Forêts	Mg	136	Magnesium powder, Mg alloy and Mg ingot	5000	5.42E+05
	Sr	431	Strontium metal	14,135	4.84E+06
	Li	168	Lithium carbonate, Li hydroxide monohydrate, Li chloride	60,000 for LCE	4.27E+07
	Si	89	Silicon metal, Si powder	3000	2.12E+05
	Zn	2.7	Zinc ingot, Zn oxide, Zn powder	3600	7.81E+03
	Possible Income (€/L)				
Possible income (€/year)					4.83E+07
Rittershoffen	Mg	123	Magnesium powder, Mg alloy and Mg ingot	5000	1.05E+06
	Sr	459	Strontium metal	14,135	1.11E+07
	Li	181	Lithium carbonate, Li hydroxide monohydrate, Li chloride	60,000 for LCE	9.86E+07
	Si	98	Silicon metal, Si powder	3000	5.00E+05
	Zn	3.3	Zinc ingot, Zn oxide, Zn powder	3600	2.04E+04
	Possible Income (€/L)				
Possible income (€/year)					1.11E+08

Figure 122 : Estimation de la possible valorisation des substances connexes considérées comme métaux critiques présentes dans la saumure géothermale. (Source : (Dalmais et al. 2022))

Concernant la filière agricole, il pourra également être qualifié le besoin en chaleur afin d'envisager la mise en place de serres afin de proposer au territoire une possibilité de souveraineté alimentaire. En effet, en considérant les besoins de chauffage des serres (4 GWh / an / ha pour un chauffage à 20°C), une centrale géothermique de l'ordre de 25 MWth produisant jusqu'à 160 GWh/an permettrait donc d'assurer les besoins de près de 40 ha de cultures sous serres soit moins de 2% des surfaces agricoles utiles (SAU) du périmètre sollicité. L'impact économique et social serait important avec près de 280 emplois directs et autant d'emplois indirects (7 emplois directs et indirects par ha, source : ADEME) mais également de l'ordre de 10 000 repas par jour produits grâce à une culture locale (4 ha permettant de confectionner 1 000 repas / jour, source : ADEME).

7 Durée d'exclusivité sollicitée

La zone sollicitée dans le cadre de cette demande de Permis Exclusif de Recherches de mines de Lithium et substances connexes possède d'ores et déjà des données géophysiques et géologiques ayant permis l'identification d'un important potentiel. Cependant, compte tenu des études complémentaires qu'il conviendra de mener (en raison de l'ancienneté des données et du programme exploratoire proposé par Vulcan Énergie France incluant des sismiques réflexion 3D haute définition), **une durée d'exclusivité de 5 années est demandée** afin d'aboutir à l'identification, la caractérisation et la validation de la capacité à produire du lithium géothermal depuis le gisement présent au sein de l'emprise du PER.

8 Bibliographie

- Abdelfettah, Y. et al., 2020. Using highly accurate land gravity and 3D geologic modeling to discriminate potential geothermal areas: Application to the Upper Rhine Graben, France. *Geophysics*, 85(2), pp.G35–G56.
- Agemar, T. et al., 2014. The geothermal information system for Germany-GeotIS. *Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, pp.129–144.
- Aichholzer, C. et al., 2016. New stratigraphic interpretation of the Soultz-sous-Forêts 30-year-old geothermal wells calibrated on the recent one from Rittershoffen (Upper Rhine Graben, France). *Geothermal Energy*, 4(1), pp.1–26.
- Anon, 2021. *Enquête sur le prix de vente de la chaleur et du froid en 2019*,
- Anon, 2017. *Les montages juridiques et financiers possibles pour qu'une collectivité participe à la production d'Enr sur son territoire*,
- Aquilina, L. et al., 1997. Water-rock interaction processes in the Triassic sandstone and the granitic basement of the Rhine Graben: Geochemical investigation of a geothermal reservoir. *Geochimica et cosmochimica acta*, 61(20), pp.4281–4295.
- Armandine Les Landes, A. et al., 2019. Locating Geothermal Resources: Insights from 3D Stress and Flow Models at the Upper Rhine Graben Scale. *Geofluids*, 2019.
- Bosia, C. et al., 2021. Evolution of Brine Geochemical Composition During Operation of EGS Geothermal Plants (Alsace, France). In *Proceedings of the 46th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA*. p. 21.
- Bossennec, C. et al., 2021. Characterisation of fluid flow conditions and paths in the Buntsandstein Gp. sandstones reservoirs, Upper Rhine Graben.
- C., R., 1999. *Réseau accélérométrique du Fossé rhénan supérieur Coupes géologiques commentées au droit des nouvelles stations*, <http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RR-40744-FR>.
- Cameselle, A.L., 2010. Mapping of Sedimentary Bodies by 3D Seismic Reflection Data. Application to the pre-Messinian Ebro Margin.
- Charléty, J. et al., 2007. Large earthquakes during hydraulic stimulations at the geothermal site of Soultz-sous-Forêts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(8), pp.1091–1105.
- Charléty, J. et al., 2006. Tomographic study of the seismic velocity at the Soultz-sous-Forêts EGS/HDR site. *Geothermics*, 35(5-6), pp.532–543.
- Chavot, P. et al., 2021. L'information comme enjeu? La controverse autour de la géothermie profonde à l'Eurométropole de Strasbourg. *Natures Sciences Sociétés*, (Supp. 5), pp.43–54.

- Chavot, P. et al., 2019. Public perception of geothermal projects in Alsace: between energy transition and territorial rooting. In *European Geothermal Congress 2019*.
- Chavot, P. et al., 2018. Social shaping of deep geothermal projects in Alsace: politics, stakeholder attitudes and local democracy. *Geothermal Energy*, 6(1), pp.1–21.
- Dalmais, E. et al., 2022. Environmental and Socio-Economic Impact of Deep Geothermal Energy, an Upper Rhine Graben Perspective. *IntechOpen*.
- Dezayes, C. et al., 2007. Estimation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias dans le Fossé rhénan. *Final report. BRGM/RP-55729-FR*, 72.
- Dezayes, C. et al., 2013. Forage d'exploration géothermique GRT-1. Suivi géochimique des fluides et caractérisation des zones fracturées. *Rapport final BRGM/RP-62546-FR*.
- Doehl, F., 1967. The Tertiary and Pleistocene sediments of the northern and central part of the Upper Rhinegraben. *Abhandlungen des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg*, 6, pp.48–54.
- Drüppel, K. et al., 2020. Experimental alteration of granitic rocks: Implications for the evolution of geothermal brines in the Upper Rhine Graben, Germany. *Geothermics*, 88, p.101903.
- Dubois, G. & Dubois, C., 1955. *La géologie de l'Alsace. Aperçu général et excursions géologiques*, Persée-Portail des revues scientifiques en SHS.
- Duringer, P. et al., 2019. The complete lithostratigraphic section of the geothermal wells in Rittershoffen (Upper Rhine Graben, eastern France): a key for future geothermal wells La colonne lithostratigraphique complète du doublet géothermique de Rittershoffen (Fossé Rhénan Supérieur, Est de la France): les clés pour de futurs puits géothermiques. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 190(1).
- Edel, J. et al., 2018. Structure and nature of the Palaeozoic basement based on magnetic, gravimetric and seismic investigations in the central Upper Rhinegraben. *Geothermal Energy*, 6(1), pp.1–25.
- Freyermark, J. et al., 2019. Influence of the main border faults on the 3d hydraulic field of the central Upper Rhine Graben. *Geofluids*, 2019.
- Genter, A., 2021. Deep fractured EGS, concepts & reservoir Deep fractured EGS, concepts & reservoir assessment in the Upper Rhine Graben.
- Glaas, C., 2021. *Mineralogical and structural controls on permeability of deep naturally fractured crystalline reservoirs*.
- H. Pauwels, C.F.M.B., 1989. *Secondary production from geothermal fluids processes for Lithium recovery*,

- H. Pauwels, M.L.A.G., 1991. *Valorisation des fluides géothermaux contenant du lithium en vue d'une production Industrielle*,
- Haas, I. & Hoffmann, C., 1929. Temperature gradient in Pechelbronn oil-bearing region, Lower Alsace: its determination and relation to oil reserves. *AAPG Bulletin*, 13(10), pp.1257–1273.
- Haffen, S., 2012. *Caractéristiques géothermiques du réservoir gréseux du Buntsandstein d'Alsace*.
- Heap, M.J. et al., 2019. Petrophysical properties of the Muschelkalk from the Soultz-sous-Forêts geothermal site (France), an important lithostratigraphic unit for geothermal exploitation in the Upper Rhine Graben. *Geothermal Energy*, 7(1), pp.1–29.
- Lehuteur, M., 2015. *Étude d'un réservoir géothermique profond par corrélation de bruit sismique ambiant*.
- Lehuteur, M. et al., 2018. Reservoir imaging using ambient noise correlation from a dense seismic network. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(8), pp.6671–6686.
- Magenet, V. et al., 2014. Two-dimensional THM modelling of the large scale natural hydrothermal circulation at Soultz-sous-Forêts. *Geothermal Energy*, 2(1), pp.1–21.
- Marcelo Azevedo, M.B.K.H.A.K., 2022. *Lithium mining: How new production technologies could fuel the global EV revolution*,
- Maurer, V., 2019. *Demande de PER dit « Permis lithium d'• Outre-Forêt » - Mémoire technique*,
- Maurer, V. et al., 2018. Geothermal reservoir temperature estimation derived from gradient wells in a continental rift context (Upper Rhine Graben). In *43rd Stanford geothermal workshop, Stanford, California, USA*. pp. 12–14.
- Maurer, V. et al., 2016. Towards a 3D velocity model deduced from 2D seismic processing and interpretation in Northern Alsace (France). In *European geothermal congress*.
- Maurer, V. et al., 2016. Towards calibrating an automatic detection system to monitor micro-seismic activity induced by geothermal projects in the Upper Rhine Graben. In *Proc. European Geothermal Congress*.
- Meller, C. et al., 2018. Acceptability of geothermal installations: A geoethical concept for GeoLaB. *Geothermics*, 73, pp.133–145.
- Minviro, 2021. *Industry-leading Life Cycle Assessment results*,
- Mosser, C., Gall, J.-C. & Tardy, Y., 1972. Géochimie des illites du Gres a Voltzia du (Buntsandstein supérieur) des Vosges du Nord, France. *Chemical Geology*, 10(2), pp.157–177.

- Mouchot, J. et al., 2018. First year of operation from EGS geothermal plants in Alsace, France: scaling issues. In *Proceedings of the 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California*. pp. 12–14.
- Mundhenk, N. et al., 2013. Corrosion and scaling as interrelated phenomena in an operating geothermal power plant. *Corrosion Science*, 70, pp.17–28.
- Pauwels, H., Fouillac, C. & Fouillac, A.-M., 1993. Chemistry and isotopes of deep geothermal saline fluids in the Upper Rhine Graben: Origin of compounds and water-rock interactions. *Geochimica et cosmochimica acta*, 57(12), pp.2737–2749.
- PELL, R. & LINDSAY, J., 2022. COMPARATIVE LIFE CYCLE ASSESSMENT STUDY OF SOLID STATE AND LITHIUM-ION BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLE APPLICATION IN EUROPE.
- Ravier, G. et al., 2016. Towards a comprehensive environmental monitoring of a geothermal power plant in the Rhine graben. In *Proceedings of the European Geothermal Congress, Strasbourg, France*. pp. 19–23.
- Richard, A. et al., 2020. How to upscale geothermal energy from deep fractured basement in the Upper Rhine Graben? The impact of a new 3D seismic dataset. In *Proceedings World Geothermal Congress 2020*.
- Richard, A. et al., 2019. Upper Rhine Graben: the largest exploration by 3D seismic reflection. In *European Geothermal Congress, Den Haag, Netherlands*.
- Rotstein, Y. et al., 2006. Insight into the structure of the Upper Rhine Graben and its basement from a new compilation of Bouguer Gravity. *Tectonophysics*, 425(1-4), pp.55–70.
- Roussé, S., 2006. *Architecture et dynamique des séries marines et continentales de l'oligocène moyen et supérieur du sud du fossé rhénan: Evolution des milieux de dépôt en contexte de rift en marge de l'avant-pays alpin*.
- S. Gabalda,
Y.V.D.R.C.P.P.C.L.C.G.C.A.G.A.L.G.M.B.L.B.T.B.D.A.L.B.N.C.D.D.C.D.A.R.F.T.,
2013. *Élaboration d'un chantier RGF : retour d'expérience du chantier pilote Vosges - Fossé rhénan*,
- Salaun, N. et al., 2020. High-resolution 3D seismic imaging and refined velocity model building improve the image of a deep geothermal reservoir in the Upper Rhine Graben. *The Leading Edge*, 39(12), pp.857–863.
- Sanjuan, B. et al., 2022. Lithium-rich geothermal brines in Europe: An up-date about geochemical characteristics and implications for potential Li resources. *Geothermics*, 101, p.102385.
- Sanjuan, B. et al., 2016. Major geochemical characteristics of geothermal brines from the Upper Rhine Graben granitic basement with constraints on temperature and circulation.

- Chemical Geology*, 428, pp.27–47.
- Sanjuan, B., Gourcerol, B. & Millot, R., 2020. Les saumures géothermales: une nouvelle ressource en lithium? *Géochronique*, p.7–pages.
- Schumacher, M.E., 2002. Upper Rhine Graben: role of preexisting structures during rift evolution. *Tectonics*, 21(1), pp.6–1.
- Sissingh, W., 1998. Comparative tertiary stratigraphy of the Rhine Graben, Bresse Graben and Molasse Basin: correlation of Alpine foreland events. *Tectonophysics*, 300(1-4), pp.249–284.
- Sittler, C., 1992. Illustration de l'histoire géologique du Fossé rhénan et de l'Alsace. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie. Abhandlungen*, 186(3), pp.255–282.
- Sittler, C., 1965. *Le Paléogène des fossés rhénan et rhodanien. Études sédimentologiques et paléoclimatiques*, Persée-Portail des revues scientifiques en SHS.
- Stober, I. & Bucher, K., 2015. Hydraulic and hydrochemical properties of deep sedimentary reservoirs of the Upper Rhine Graben, Europe. *Geofluids*, 15(3), pp.464–482.
- Tobia Spampatti, U. de G.U.J.J.H.U. de G.E.T.U. de G.T.B.U. de G., 2022. Dominance des informations négatives dans la formation des perceptions de l'énergie géothermique, et une stratégie prometteuse pour les combattre. In *Journée de la Géothermie*.
- Trutnevyte, E. & Wiemer, S., 2017. Tailor-made risk governance for induced seismicity of geothermal energy projects: An application to Switzerland. *Geothermics*, 65, pp.295–312.
- Vallier, B. et al., 2020. THM modeling of gravity anomalies related to deep hydrothermal circulation at Soultz-sous-Forêts (France). *Geothermal Energy*, 8(1), pp.1–21.
- Vidal, J. & Genter, A., 2018. Overview of naturally permeable fractured reservoirs in the central and southern Upper Rhine Graben: Insights from geothermal wells. *Geothermics*, 74, pp.57–73.
- Virginie SCHMIDLE-BLOCH, P.H.M.M., 2019. How to win acceptability, the French geothermal industry approach. In *European Geothermal Congress*.
- Watzel, R., 2022. Minerals for future technologies: how Germany copes with challenges. *Geological Society, London, Special Publications*, 526.