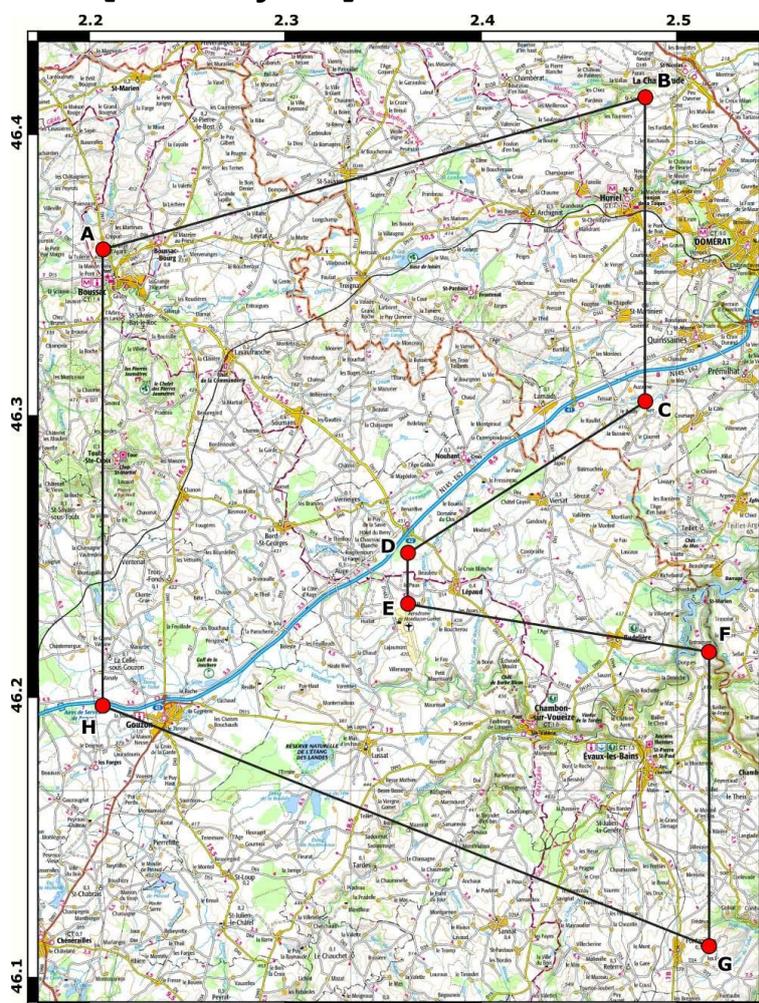


**Demande de Prolongation de Validité
du Permis Exclusif de Recherches
de Gîtes Géothermiques**

Permis de « Combrailles-en-Marche »

RÉSUMÉ NON TECHNIQUE

[Mise à jour] Décembre 2021



*Résumé Non Technique des éléments du Mémoire Technique et de la Notice d'Impact
du Permis Exclusif de Recherches de « Combrailles-en-Marche » visant les ressources géothermiques.*

DOCUMENT PUBLIC

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION, GEOTHERMIE ET CONTEXTE	5
1.1. Introduction	5
1.2. Recherche et développement chez TLS Geothermics	5
1.3. La géothermie	6
1.4. Contexte de la prolongation de validité du permis	7
2. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE ET ENJEUX.....	8
2.1. Géographie et implantation du projet.....	8
2.2. Synthèse des éléments relatifs aux enjeux liés au milieu naturel.....	10
2.3. Hydrogéologie.....	11
2.4. Impacts potentiels du projet.....	11
2.5. Impact sur la ressource en eau	13
2.5.1.Eaux superficielles.....	13
2.5.2.Eaux souterraines.....	14
2.6. Incidence sur le contexte réglementaire	14
3. GEOLOGIE DU PER.....	15
4. BILAN DE L'EXPLORATION SUR LA PERIODE PRECEDENTE (2016-2020)	18
4.1. Recherche et développement contribuant à l'exploration du PER.....	18
4.1.1.Méthode l'exploration	18
4.1.2.Géosciences.....	18
4.2. Connaissances nouvelles	19
4.2.1.Liste des acquisitions de données.....	19
4.2.2.Chronologie des acquisitions de données	19
4.2.3.Chronologie des traitements & modèles produits	19
5. LES RESSOURCES GÉOTHERMIQUES ATTENDUES.....	20
5.1. Type de ressource thermique attendu	20
5.2. Une ressource thermique possiblement identifiée	20
5.3. Des ressources minérales dans les fluides géothermiques	20
5.4. Travaux envisagés pour cette seconde période (2020-2025)	21

Liste des Figures

Figure 1 : Principe d'une exploitation géothermique. Ici production d'électricité en surface au moyen d'une centrale à cycle binaire (ORC)	6
Figure 2 : Probabilité de présence de ressources géothermiques pour la production électrique en Europe selon le concept des zones de failles crustales de TLS Geothermics	7
Figure 3 : Limite géographique du PER sur fonds cartographique	8
Figure 4 : Localisation des communes concernées par le périmètre du permis et population	9
Figure 5 : Cartographies de synthèse présentant les enjeux principaux sur le territoire	10
Figure 6 : Machine de forage installée en 2014 sur le puits d'Arcueil (94)	12
Figure 7 : Localisation du PER sur fond de carte géologique au 1/1000000ème éditée par le BRGM	15
Figure 8: Zones de failles crustales du PER.....	16
Figure 9: Zones de failles crustales vues en coupe. Les flèches rouges soulignent les conduits géothermaux possibles.....	16
Figure 10: Carte géologique au 1/50000ème du permis « Combrailles-en-Marche ».....	17
Figure 10: Simulation de circulation fluide et transferts thermiques dans une zone de faille particulière pour une croûte normalement chaude du même type que celle du PER.....	20

1. INTRODUCTION, GEOTHERMIE ET CONTEXTE

1.1. Introduction

TLS Geothermics est un bureau d'ingénieries géosciences, explorateur et développeur de projets, crée en 2012. La société s'est engagée dans une approche innovante de la géothermie profonde et a noué plusieurs partenariats avec des laboratoires publics et universitaires dans des projets collaboratifs de recherche et développement en géologie et en géophysique. TLS Geothermics est une jeune entreprise innovante en géothermie profonde. Son équipe de 6 personnes met en œuvre des projets d'exploration ainsi que des activités de Recherche & Développement, seuls ou en partenariat. Depuis 2014, TLS Geothermics finance ou a financé 3 thèses, 1 post-doctorat et de nombreux stages de masters et ingénieurs. L'entreprise participe et continue de participer à plusieurs projets collaboratifs avec des universités et instituts. TLS Geothermics est titulaire de deux Permis Exclusifs de Recherches de Gîtes Géothermiques en France.

Storengy est une filiale d'ENGIE dont le savoir-faire historique repose sur une maîtrise reconnue de la conception et de l'exploitation de sites de stockage de gaz (1er opérateur européen, 4ème opérateur mondial), avec un parc en France de plus de 500 puits profonds (> 1000 mètres de profondeur). En s'appuyant sur cette expertise sous-sol reconnue, Storengy intervient sur l'ensemble des types de projets de géothermie : production de chaleur et/ou de froid et production d'électricité en France et à l'international (expertise sous-sol et exploration sur 3 projets indonésiens de géothermie haute température du Groupe ENGIE).

1.2. Recherche et développement

Depuis sa création, et dans le cadre de ses projets de recherche, TLS Geothermics a défini un nouveau concept géothermique, les Zones de Failles Crustales :

- ✓ Ces zones de failles d'échelles crustales sont au moins enracinées dans la croûte ductile ($T > 300^{\circ}\text{C}$) et sont suffisamment perméables pour permettre des convections de fluides chauds. Ces convections génèrent des anomalies positives et négatives de température.
- ✓ Ces zones de faille sont théoriquement à même de permettre des débits de l'ordre de 100 litres par seconde.

Le projet ANR GERESFAULT a pour ambition d'améliorer notre compréhension et la caractérisation des Zones de Failles Crustales. Ce projet est coordonné par le BRGM et implique 5 autres universités et 3 entreprises.

Le projet PIA3 GoFAUST (lauréat Geopulse, filiale de TLS Geothermics et Storengy SAS) a pour ambition de démontrer ce concept sur le PER Sioule, un autre permis dont TLS Geothermics est titulaire.

TLS Geothermics étudie depuis 2015 le potentiel géothermique des Zones de Failles Crustales sur les PER Sioule et Combrailles-en-Marche.

TLS Geothermics développe dans ses projets de R&D un protocole d'exploration géothermique dédié aux Zones de Failles Crustales des socles quartzo-feldspathiques (Bellanger et al. 2016, 2017, 2019). Ce protocole inclut notamment :

- ✓ Un algorithme d'inversion conjointe géophysique 3D (Ars et al., 2019)
- ✓ Des simulations numériques thermo-hydrauliques (Duwiquet et al., 2019) et thermo-hydro-mécaniques (Duwiquet et al., 2020)
- ✓ Une analyse mondiale des systèmes géothermaux exploités (Hermant et al., 2019)
- ✓ Une méthode pour caractériser des anomalies de chaleurs induites par les zones de failles est également évalué (Milési et al., 2019, 2020)

1.3. La géothermie

La géothermie est une source alternative, non-intermittente et renouvelable d'énergie primaire permettant de produire chaleur et électricité. Les procédés de valorisation des fluides géothermiques employés de nos jours (comme les centrales à cycle binaire) ne sont pas émetteurs de gaz à effet de serre et de pollution atmosphérique.

Le principe de l'exploitation géothermique consiste à pomper un certain débit d'eau chaude provenant d'un réservoir plus ou moins profonds. En surface les calories du fluide sont exploitées pour produire de la chaleur ou de l'électricité. Un puits pompe l'eau chaude, un second puits réinjecte l'eau refroidie dans son environnement d'origine.

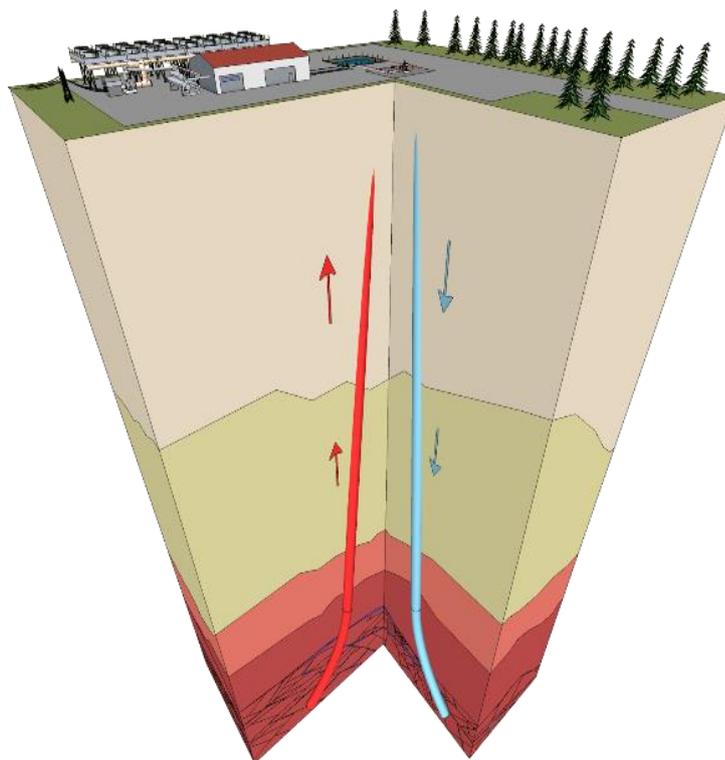


Figure 1 : Principe d'une exploitation géothermique. Ici production d'électricité en surface au moyen d'une centrale à cycle binaire (ORC)

L'inventaire des ressources, notamment par les données de flux de chaleur et gradients géothermiques, montre que le potentiel de la géothermie profonde est prometteur, notamment dans le Massif Central français, et notamment dans le Limousin et en Auvergne-Rhône-Alpes.

Notre conviction est que cette énergie peut jouer un rôle important à l'échelle de la planète dans la lutte contre le changement climatique et dans la transition énergétique. Le PER de Combrailles-en-Marche est situé dans une zone qui répond aux critères du modèle de Zone de Failles Crustales.

TLS Geothermics a modélisé, *suivant certaines hypothèses encore à confirmer*, les probabilités d'existence des ressources géothermiques dites des zones de failles crustales à l'échelle Européenne. Il ressort un potentiel d'un minimum de 6,8 GW, soit l'équivalent approché de 7 réacteurs nucléaires.

La carte ci-dessous rend compte de ce modèle :

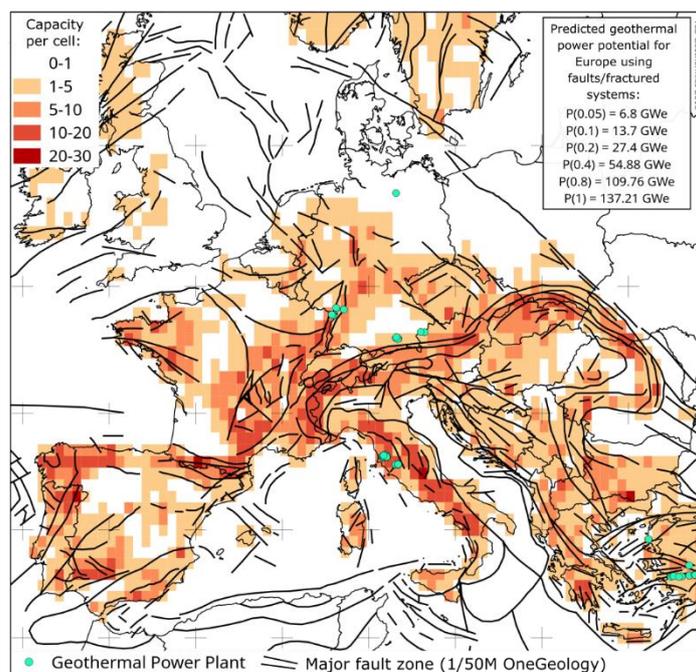


Figure 2 : Probabilité de présence de ressources géothermiques pour la production électrique en Europe selon le concept des zones de failles crustales de TLS Geothermics

1.4. Contexte de la prolongation de validité du permis

La société souhaite, au travers de la prolongation de validité du Permis Exclusif de Recherches dit de « Combrailles-en-Marche », continuer à explorer et développer les nouvelles connaissances du sous-sol local dans les zones où le potentiel géothermique est le plus intéressant au regard des résultats de la première période du PER. Le but ultime est d'y développer une centrale géothermique, voire plusieurs. Cette centrale pourra être soit électrique (4 à 6 MWe) soit de cogénération (électricité et chaleur) déterminée en fonction des besoins locaux. Ce projet de géothermie pourrait également être couplé à une valorisation des éléments présents en solution dans les fluides, notamment le Lithium, élément pour lequel les besoins sont importants dans la transition vers l'électromobilité (batteries). Extrait des fluides géothermiques, ce lithium aurait un impact environnemental très faible comparé aux techniques conventionnelles (salars ou mines) et l'approvisionnement serait bien plus proche des consommateurs (usines de batteries en Europe).

Afin d'atteindre cet objectif, la phase d'exploration géologique et géophysique se poursuivra pour identifier des sites précis pour un éventuel forage d'exploration, qui lui seul pourra quantifier la ressource géothermique. A ce jour donc, la décision finale de forer ne peut être prise, les résultats des études préalables conditionneront cette décision.

Nos entreprises s'engagent dans la mesure du possible (hors éléments confidentiels), à tenir informer de ses projets les responsables locaux, élus ou personnels territoriaux, et les citoyens qui le désirent. Notre action et nos démarches s'inscriront en accord avec ces parties prenantes.

La demande de prolongation de validité du permis s'accompagne d'un Mémoire Technique confidentiel à jour avec un bilan des avancées réalisées sur le PER en première période de validité concernant l'identification de ressources géothermiques. La demande est aussi accompagnée d'une Notice d'Impact, un document public.

Le présent Résumé Non Technique reprend et résume ce document ainsi que les éléments essentiels des enjeux environnementaux décrits dans la Notice d'Impact.

2. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE ET ENJEUX

2.1. Géographie et implantation du projet

Situé à cheval sur les régions Auvergne-Rhône-Alpes et Nouvelle-Aquitaine, le permis inclus notamment les villes creusoises de Boussac, Gouzon, Chambon-sur-Voueize et Evaux-les-Bains ainsi que la ville bourbonnaise d'Huriel (Figure 3).

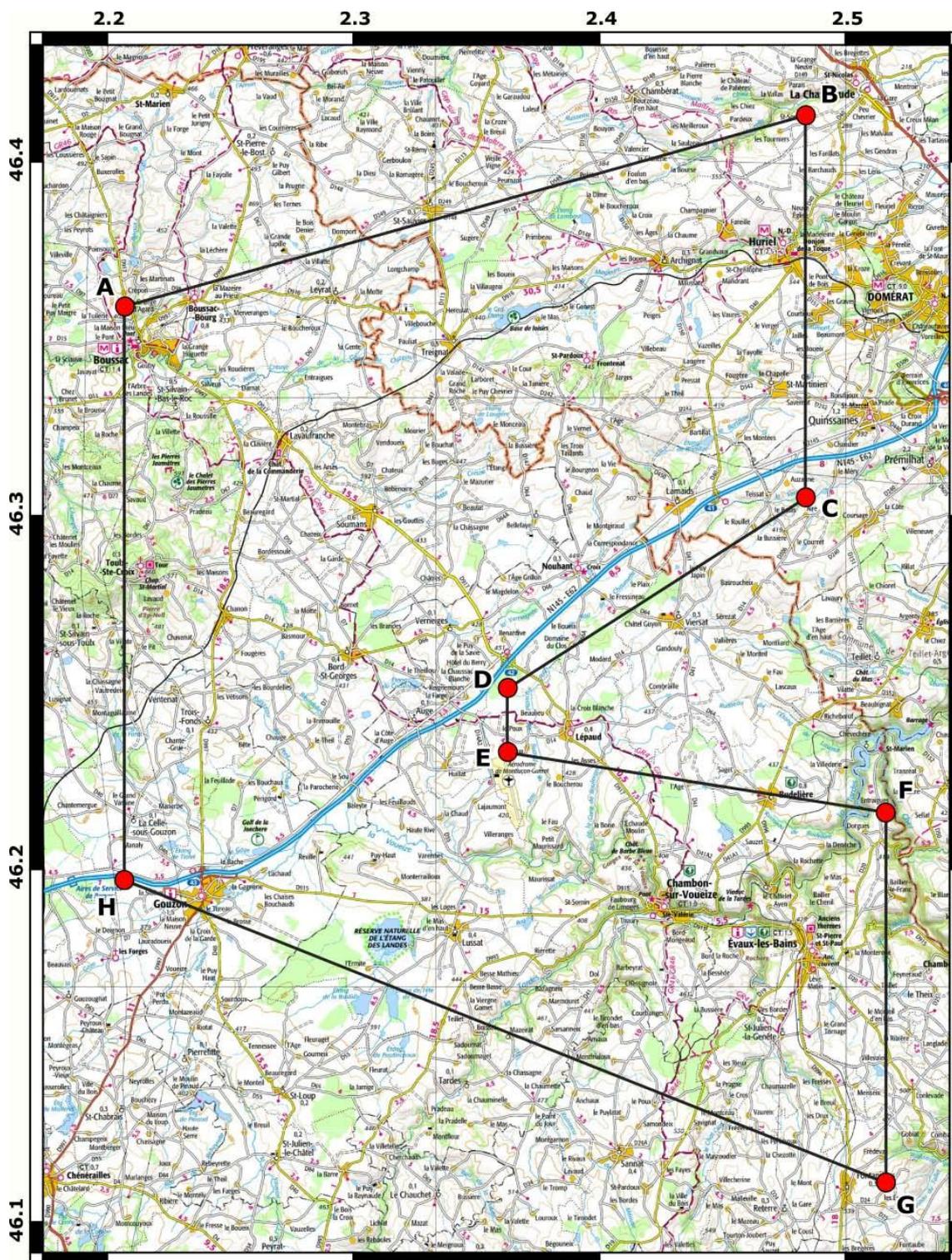


Figure 3 : Limite géographique du PER sur fonds cartographique

La zone du projet englobe une superficie totale d'environ 515 km², portant sur parties des départements de l'Allier (122 km²) et de la Creuse (393 km²). Le périmètre est à cheval sur deux régions : Auvergne-Rhône-Alpes (122 km²) et Nouvelle Aquitaine (393 km²).

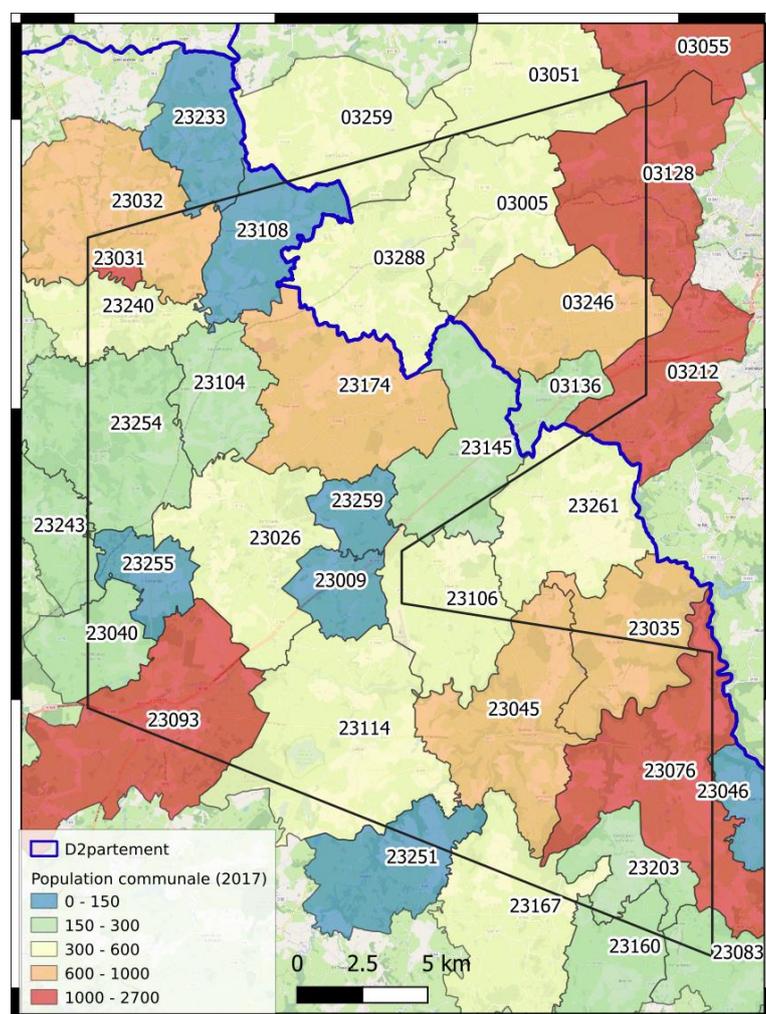
La zone s'étend à l'intérieur d'un périmètre constitué des lignes joignant les points dont les coordonnées géographiques sont les suivantes :

Points	RGF93	
	Longitude E°	Latitude N°
A	2°12'25"	46°21'33"
B	2°29'07"	46°24'47"
C	2°29'07"	46°18'18"
D	2°21'45"	46°15'04"
E	2°21'45"	46°13'59"
F	2°30'59"	46°12'58"
G	2°30'59"	46°06'40"
H	2°12'25"	46°11'49"

Tableau 1 : Coordonnées du périmètre du permis

Au total, 37 communes sont concernées partiellement ou en totalité par le PER :

- ✓ 28 communes dans la Creuse, dont Boussac et Evaux-les-bains, chefs-lieux de cantons
- ✓ 9 communes dans l'Allier, dont Huriel chef-lieu de canton



NOM DE LA COMMUNE	N° INSEE	POPULATION	SURFACE (km ²)
ARCHIGNAT	3005	336	25
AUGE	23009	98	10
BORD-SAINT-GEORGES	23026	353	32
BOUSSAC	23031	1257	2
BOUSSAC-BOURG	23032	717	39
BUDELIERE	23035	717	25
CHAMBERAT	3051	305	29
CHAMBONCHARD	23046	82	13
CHAMBON-SUR-VOUEIZE	23045	892	34
EVAUX-LES-BAINS	23076	1390	45
FONTANIERES	23083	249	15
GOUZON	23093	1580	51
HURIEL	3128	2646	35
LA CELLE-SOUS-GOUZON	23040	151	14
LA CHAPELAUDE	3055	1007	29
LAMAIDS	3136	222	8
LAVAUFRANCHE	23104	245	16
LEPAUD	23106	363	24
LEYRAT	23108	146	18
LUSSAT	23114	426	49
NOUHANT	23145	283	26
QUINSSAINES	3212	1487	26
RETERRE	23160	291	18
SAINT-JULIEN-LA-GENETE	23203	223	12
SAINT-MARTINIEN	3246	602	26
SAINT-PIERRE-LE-BOST	23233	129	17
SAINT-SAUVIER	3259	348	32
SAINT-SILVAIN-BAS-LE-ROC	23240	400	15
SAINT-SILVAIN-SOUS-TOULX	23243	165	15
SANNAT	23167	344	34
SOUMANS	23174	601	37
TARDES	23251	138	22
TOULX-SAINTE-CROIX	23254	263	35
TREIGNAT	3288	396	29
TROIS-FONDS	23255	121	10
VERNEIGES	23259	114	8
VIERSAT	23261	303	29

Figure 4 : Localisation des communes concernées par le périmètre du permis et population

Les éléments plus précis concernant le climat, la géographie, l'économie, l'occupation des sols, l'histoire, et les sites d'intérêts, le tourisme, les voies de communication, les réseaux électriques, activités agricoles et industrielles, et les installations industrielles identifiées du secteur du Permis sont contenus dans la Notice d'Impact.

2.2. Synthèse des éléments relatifs aux enjeux liés au milieu naturel

Une description et une cartographie sont disponibles dans la Notice d'Impact concernant les principaux enjeux identifiés sur les volets environnementaux : faune, flore, zones protégées, zones humides.

La cartographie de synthèse ci-dessous permet une appréhension des enjeux environnementaux du territoire (Natura 2000, arrêtés préfectoraux de biotope, ZNIEFF, inventaires des zones humides, réserves naturelles...).

Le territoire du PER présente des enjeux sur les zones Natura 2000 et zones Z.I.C.O. identifiées (notamment l'Étang des Landes). Quelques ZNIEFF sont présentes, mais ne représentent quelques km². L'Étang des Landes est une Zone Humide remarquable, et d'autres zones potentiellement humides sont proches de cet étang et des cours d'eaux (les abords). Le SAGE Cher Amont est présent sur la majeure partie du territoire. L'Étang des Landes est une réserve naturelle. Il n'y a pas d'Arrêté Préfectoral de Protection de Biotope, et aucun terrain du Conservatoire d'Espaces Naturels sur le territoire, aucun parc naturel régional, ni parc national. Les aléas inondations et sismiques sont faibles.

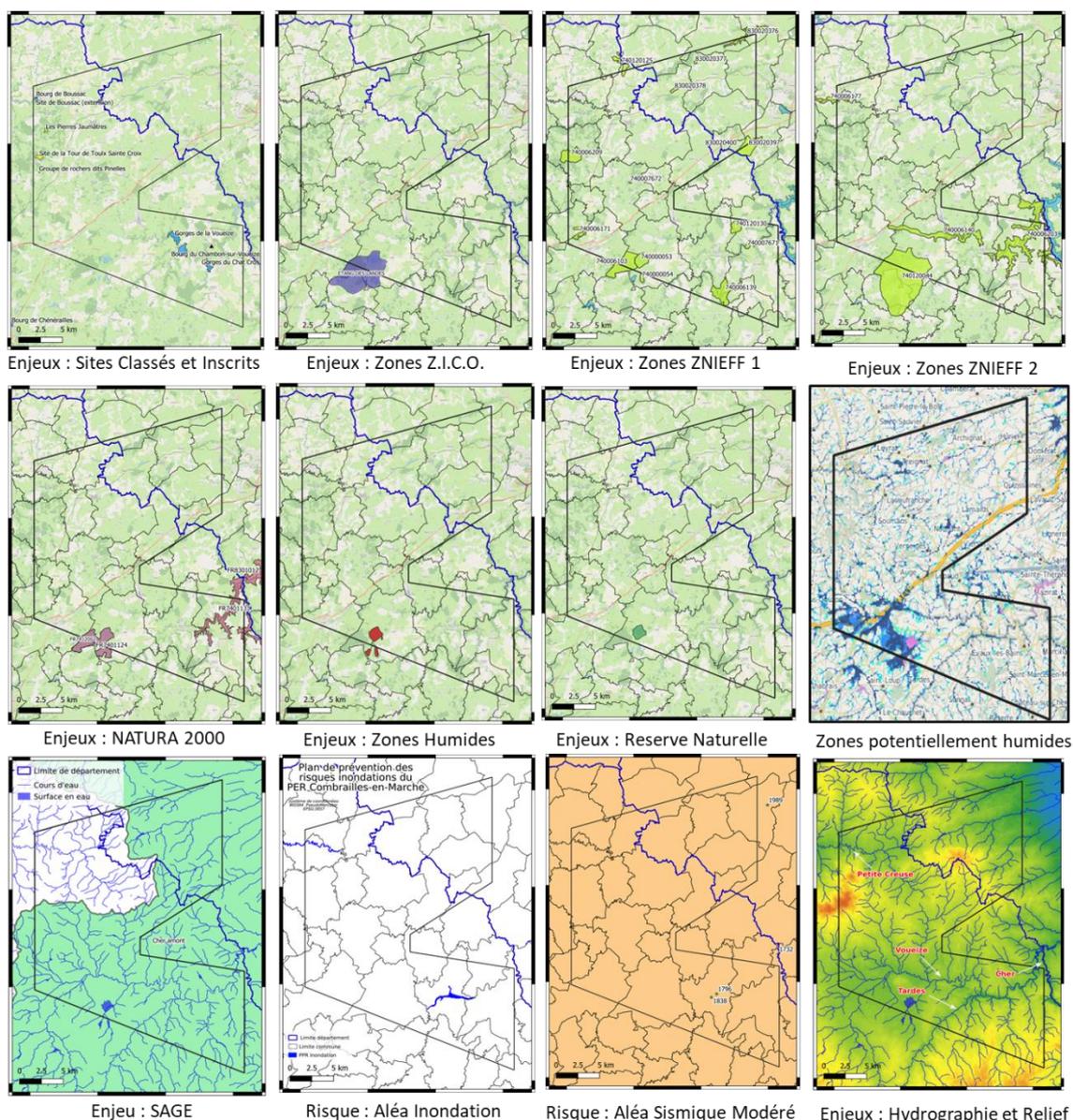


Figure 5 : Cartographies de synthèse présentant les enjeux principaux sur le territoire

2.3. Hydrogéologie

L'eau est très présente dans le Massif Central, et notamment dans le sous-sol : nappes et aquifères, eaux thermales, eaux de sources sous-basaltiques... Cette diversité est en relation avec le contexte physique que sont les reliefs, le climat et bien évidemment aussi la géologie. En ex-Auvergne et en ex-Limousin, les principaux traits caractérisant l'hydrogéologie sont un réseau hydrographique dense et ramifié avec des cours d'eau à la morphologie variée et aux régimes hydrologiques divers, un patrimoine aquifère riche mais inégalement réparti, et une qualité des eaux superficielles globalement plutôt bonne.

Une présentation des aquifères régionaux, des masses d'eaux de surfaces et souterraines, des systèmes aquifères et de leurs suivis, la qualité écologique et chimique des eaux, ainsi qu'une présentation des documents de planification au regard de l'enjeu de l'eau (SDAGE et SAGE), sont dans la Notice d'Impact. La compatibilité du projet avec les documents du SDAGE et SAGE est également étudiée.

2.4. Impacts potentiels du projet

Un tableau de synthèse des enjeux, impacts et mesures à considérer sur le territoire du permis sollicité figure en annexe 2 de la Notice d'Impact et reprend les thématiques liés aux impacts potentiels du projet.

La première phase du projet d'exploration en seconde période va consister en la poursuite des études géosciences approfondies pour identifier les zones les plus pertinentes pour les travaux de recherche et de prospection. **Ces phases d'investigations géologiques et géophysiques n'ont pas d'impact** (cf Annexe 2). Les méthodes employées en acquisitions géophysiques sont des méthodes dites passives qui consiste à enregistrer les signaux naturels puis les traiter informatiquement pour en créer des modèles numériques 3D.

C'est le forage qui a le plus d'impact sur les milieux naturels et humains. Les travaux liés au forage s'enchaînent en trois étapes résumées ci-dessous :

- Etape n°1, les travaux de génie civil préparatoires :
 - les plates-formes des puits sont conçues pour recevoir l'ensemble des équipements et permettre la circulation des engins de transport et de manutention par toutes conditions climatiques, ces travaux permettent de préparer le terrain à accueillir la machine de forage et ses modules.
 - La réalisation d'un avant trou de quelques dizaines de mètres est en général effectué pendant cette phase par une entreprise spécialisée et sous le contrôle de STORENGY, c'est une étape nécessaire avant l'installation de l'appareil de forage.
- Etape n°2, le forage_: il sera réalisé à l'aide d'une machine de forage (ou rig de forage) qui sera sélectionnée en fonction de la profondeur et de l'architecture du forage.
 - Montage de la machine ;
 - Réalisation du forage : construction de l'ouvrage et réalisation des mesures (diagraphies, tests, prélèvement d'eau, éventuellement carottage) ;
 - Démontage de la machine.
- Etape n°3, les travaux de génie civil de fin de chantier_: pour remettre en conformité la chaussée de la plate-forme.

Le fluide de forage est en général constitué d'un mélange d'eau et de bentonite (argile naturelle) et utilisé en circuit fermé et injecté par une pompe. Il assure la remontée des déblais produits par l'action des dents l'outil de forage.

Il contribue au soutien des parois du puits et maintient en place, par pression hydrostatique, les fluides présents dans les terrains perméables.

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

La machine est constituée de plusieurs modules, l'ensemble est démontable et transportable par la route sur des semi-remorques, d'un site à l'autre, en une cinquantaine de colis de quelques dizaines de tonnes pour les plus lourds. Des grues automotrices sont utilisées pour les opérations de montage et de démontage, et épisodiquement pendant la durée du chantier.



Figure 6 : Machine de forage installée en 2014 sur le puits d'Arcueil (94)

On notera que le forage ne sera réalisé qu'en cas de conclusions positives des études de géosciences et géophysiques préalables.

Le cas échéant, la réalisation du forage sera conditionnée à l'obtention d'une Autorisation d'Ouverture de Travaux conformément au **Code Minier**, au **décret n°2006-649 du 2 juin 2006** (art.3, art. 6 notamment), et au **décret n° 2016-1303 du 4 octobre 2016 relatif aux travaux de recherches par forage et d'exploitation par puits de substances minières, et abrogeant l'annexe intitulée « Titre Recherche par forage, exploitation de fluides par puits et traitement de ces fluides » du décret n° 80-331 du 7 mai 1980 portant règlement général des industries extractives** ; c'est une procédure instruite par les services de l'Etat (Préfecture et DREAL). Cette procédure comprend une étude d'impact qui fait partie intégrante du dossier de demande d'Autorisation d'Ouverture de Travaux et d'une étude d'incidence sur la ressource en eau.

Globalement en France, les opérations de forage sont très strictement encadrées et suivi par les DREAL (police des mines) et les préfetures. Une étude d'impact au titre du code de l'environnement est réalisée avant la demande d'autorisation. Lors de l'instruction de la demande d'autorisation de forage, une enquête publique est mise en œuvre permettant d'entendre et prendre en compte les questions des citoyens autour du projet.

Une étude des impacts sur le **milieu physique** (biens et patrimoine culturel, réglementations, implantation), le **milieu naturel** (paysage, écosystèmes, sols, circulation, air et climat), le **milieu humain** (bruit, circulation et flux,

traitements, économie locale), et les **autres milieu et usages** (microsismicité, radioactivité naturelle) est faites dans la Notide d'Impact. Un volet d'étude des risques vis-à-vis de la santé humaine est également dans ce document.

2.5. Impact sur la ressource en eau

Les mesures de réduction des incidences sur l'eau seront développées dans un dossier de demande d'autorisation d'ouverture de travaux par forage, le cas échéant. L'Annexe 2 de la Notice d'Impact donne certaines orientations de mesures d'évitement, réduction et compensation (ERC).

Les Plans de Prévention des Risques (inondation, mouvements de terrain, technologique) seront systématiquement pris en compte dans l'élaboration des dossiers de demande d'ouverture de travaux miniers par forage et dans l'application des mesures ERC.

Les travaux se dérouleront strictement en dehors des périmètres de protection immédiate et rapprochée des captages et les prescriptions de périmètres de protection éloignés seront respectées.

2.5.1. Eaux superficielles

Identification des effluents bruts

Pendant la phase de forage, les effluents suivants peuvent présenter un risque pour l'environnement, notamment en cas de déversement accidentel :

- ✓ les boues de forage,
- ✓ les déblais de forage ou cuttings des terrains traversés entraînés par la boue utilisée,
- ✓ les eaux de lavage de l'appareil de forage,
- ✓ les carburants ou lubrifiants utilisés pour le fonctionnement des moteurs thermiques,
- ✓ les effluents des installations sanitaires,
- ✓ les eaux pluviales ayant transité sur les aires techniques.

Mesures prises pour la protection des eaux superficielles

En phase de forage, les précautions suivantes seront prises :

- ✓ A l'entrée en terre du forage, un tube métallique sera mis en place depuis la surface jusqu'à environ 35 m de profondeur ainsi qu'une cave étanche bétonnée isolant les terrains de surface de la boue de forage.
- ✓ En cours de forage, les eaux issues de l'activité de forage seront recyclées en circuit fermé et donc isolées des eaux de surface. En fin de chantier, les eaux de forage restantes seront envoyées dans des unités de traitement spécialisées.
- ✓ Les phases de forage seront réalisées avec une boue à base d'eau.
- ✓ Les déblais seront acheminés vers une benne étanche au départ du tamis vibrant et d'une centrifugeuse à l'aide d'une bande transporteuse, l'ensemble placé sur des bâches plastiques pour récupérer les égouttures.
- ✓ Les effluents liquides ou solides seront acheminés vers des filières de traitement adaptées, par des moyens de transport appropriés.
- ✓ La cuve à gasoil sera du type double paroi et posée sur rétention étanche et la zone de manipulation et de déchargement du gasoil spécialement aménagée pour éviter toute contamination.
- ✓ Les toilettes du chantier seront équipées d'une fosse étanche et vidangée périodiquement.

2.5.2. Eaux souterraines

Identification des risques éventuels :

Le territoire du permis fait l'objet d'un certain nombre de forages pour l'alimentation en eau potable. Les incidences potentielles des opérations d'un forage d'exploration sur la qualité des eaux souterraines sont les suivantes :

Contamination par la boue de forage,

- ✓ Mise en communication des aquifères sensibles avec la surface,
- ✓ Mise en communication des aquifères sensibles avec l'intérieur du puits par percement des cuvelages (contamination par cheminement d'eau salée ou autre).

Mesures prises pour la protection des eaux souterraines (éviter et réduire) :

En premier lieu, on soulignera qu'aucuns travaux ne seront effectués au sein des périmètres de protection rapprochés des captages destinés à l'Alimentation en Eau Potable.

L'eau utilisée pour les opérations de tests sera au maximum recyclée et prélevée dans un puits dédié ou dans une nappe salifère non potable.

Au cours du forage, la protection des nappes d'eaux souterraines sera assurée par la pose successive de cuvelages cimentés, empêchant toute communication entre les couches rencontrées au cours du forage et l'intérieur du puits. De plus, le métal des tubages sera sélectionné de manière à offrir la protection anticorrosion la plus adaptée aux aquifères traversés. De cette manière, les cuvelages seront protégés à la fois contre la corrosion :

- ✓ externe (agression par les eaux des aquifères traversés), car elle sera fortement ralentie par la cimentation des tubages jusqu'en surface,
- ✓ interne, car les cuvelages des forages à l'intérieur du puits seront en contact uniquement avec le fluide géothermique.

Enfin, lors de l'abandon éventuel du puits, les bouchons de ciment seront mis en place à des cotes permettant d'assurer l'isolement des différents aquifères traversés. Le programme de bouchage sera préalablement soumis à l'approbation de la DREAL.

2.6. Incidence sur le contexte réglementaire

La Notice d'Impact présente les documents du SDAGE Loire-Bretagne 2016-2021. Il comporte 66 orientations fondamentales regroupées en 14 chapitres qui seront pris en compte dans le cadre de ce projet.

Ces orientations sont regroupées en 7 macro-orientations (enjeux ou questions importantes) pour le SDAGE Loire-Bretagne. Un tableau présente les mesures qui seront adoptées pour répondre à ces objectifs.

Deux autres tableaux présentent quant à eux la compatibilité du projet avec le SDAGE Loire-Bretagne et le SAGE Cher Amont.

3. GEOLOGIE DU PER

Le PER couvre une zone composée principalement de roches magmatiques carbonifères (Granite, Microgranite, Tufs et Rhyolites) et de roches métamorphiques (migmatites et gneiss) riches en inclusions de péridotites plus ou moins serpentinisées. Enfin, un petit bassin sédimentaire cénozoïque peu épais (< 200m vraisemblablement) existe à Gouzon (Figure 7).

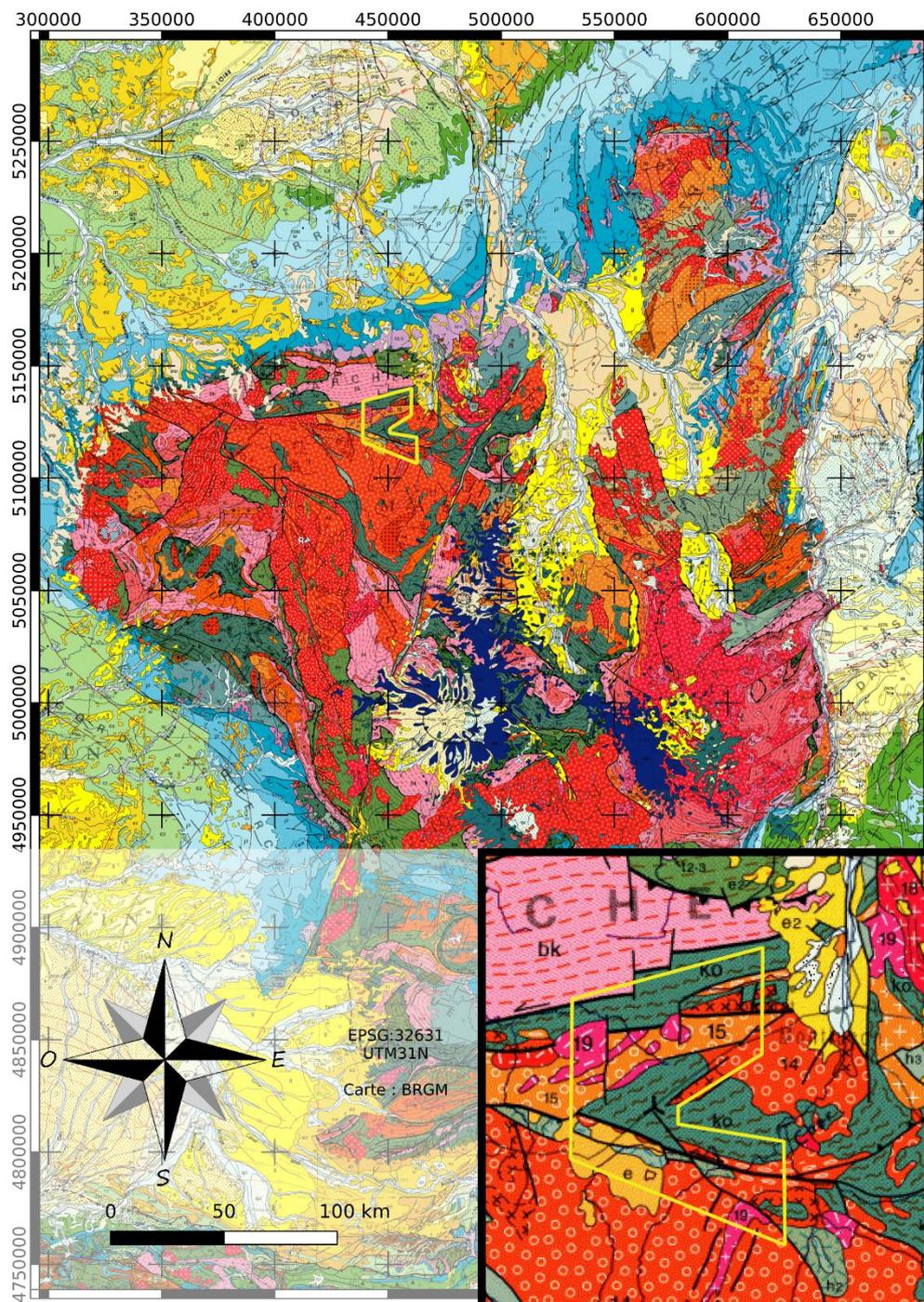


Figure 7 : Localisation du PER sur fond de carte géologique au 1/1000000ème éditée par le BRGM

Deux grands réseaux de failles traversent le PER : la branche méridionale de la faille de la Marche au nord, la zone de faille de Chambon-sur-Voueize au sud. Les ressources géothermiques attendues se localisent à l'intersection entre ces grandes failles et des failles secondaires.

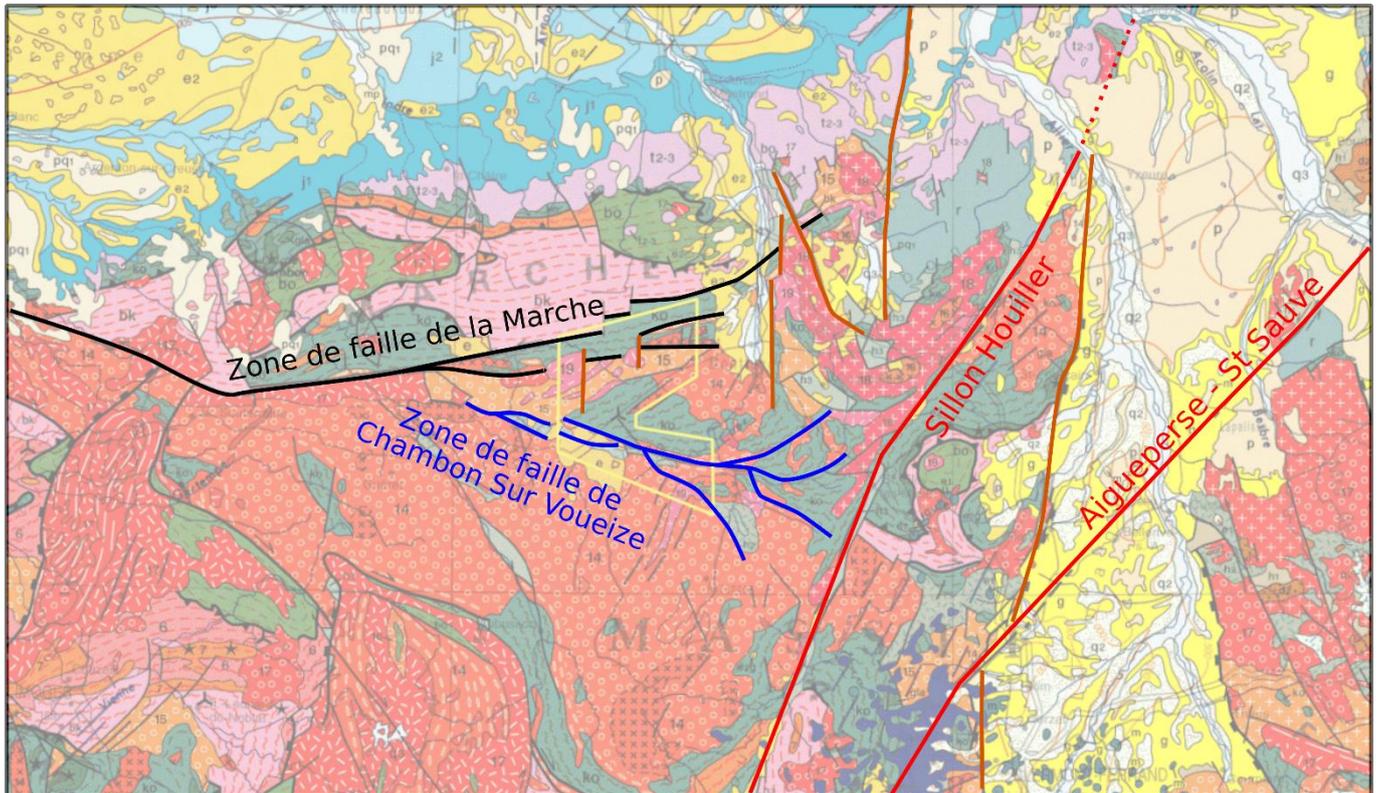


Figure 8: Zones de failles crustales du PER.

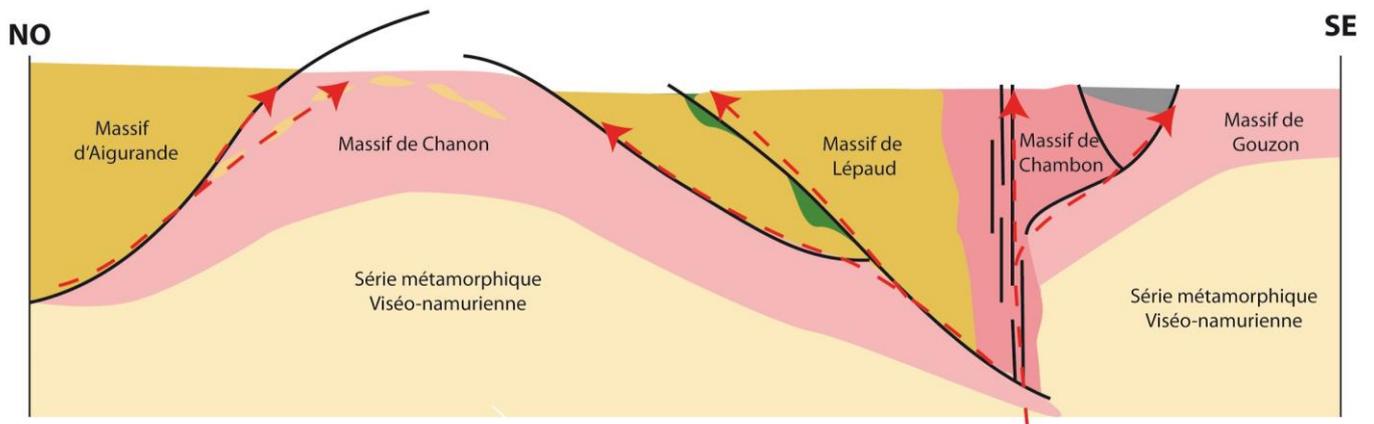


Figure 9: Zones de failles crustales vues en coupe. Les flèches rouges soulignent les conduits géothermaux possibles.

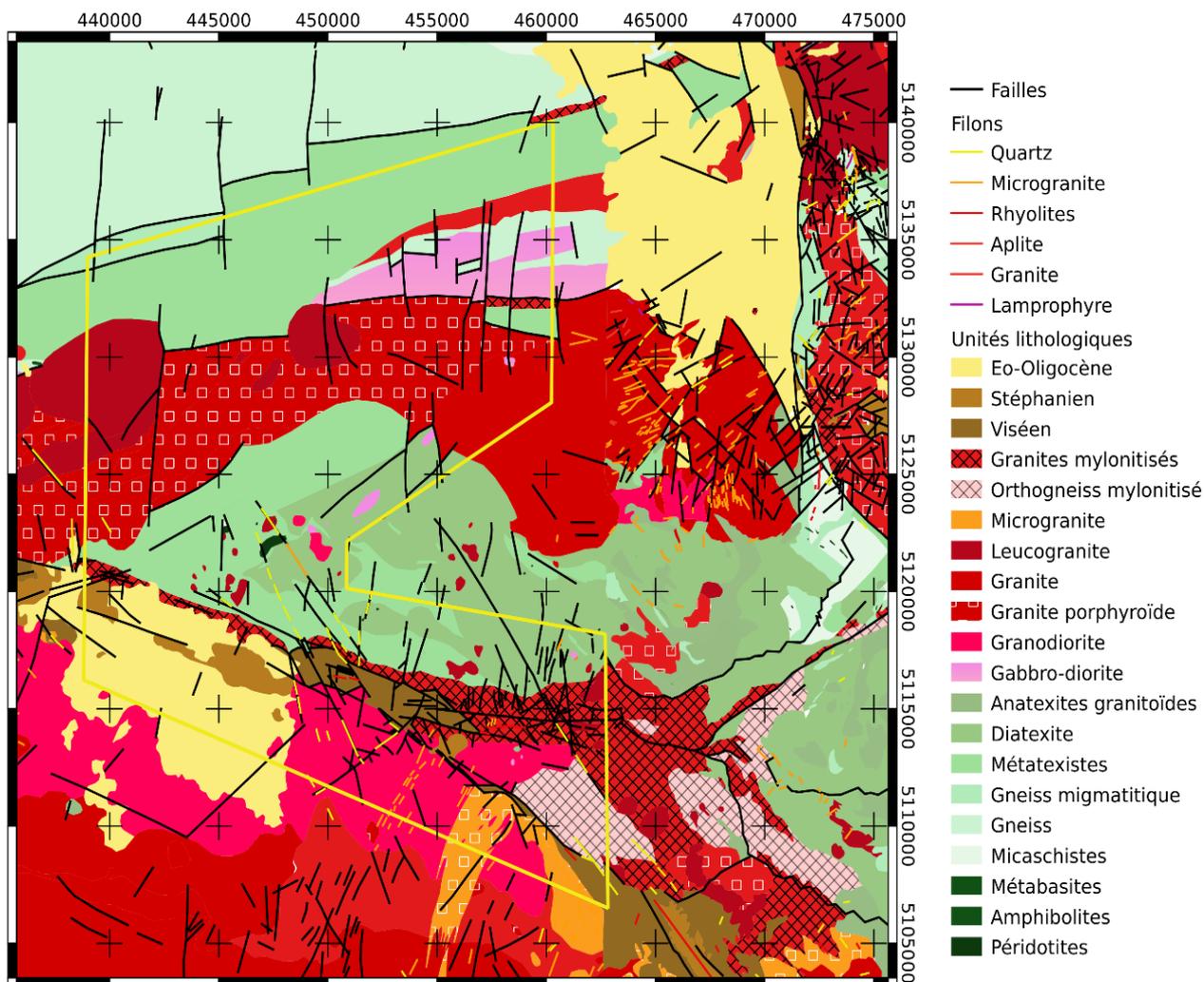


Figure 10: Carte géologique au 1/50000ème du permis « Combrailles-en-Marche » seconde période

4. BILAN DE L'EXPLORATION SUR LA PERIODE PRECEDENTE (2016-2020)

4.1. Recherche et développement contribuant à l'exploration du PER

Parallèlement à l'exploration du PER Combrailles-en-Marche, TLS Geothermics a mené et continue de mener des actions de Recherche et Développement sur plusieurs fronts en interne et en consortium :

1. le concept de zones de failles crustales et son exploration (Bellanger et al., 2019),
2. le développement d'algorithmes d'inversion conjointe géophysique (JIPASS3D, Ars et al., 2019),
3. le développement d'algorithmes de couplages géophysiques-géochimiques-géologiques,
4. la détermination de modèles structuraux 3D par combinaison de données de terrain et satellitaire,
5. la caractérisation des anomalies thermiques autour des zones de failles crustales par thermo-chronologie (Milési et al., 2019)
6. la simulation des transferts de matières et d'énergie dans les zones de failles (Duwiquet et al., 2019)

4.1.1. Méthode l'exploration

Une difficulté rencontrée sur de nombreux champs géothermiques est l'absence de manifestation de surface (Bellanger et al., 2019). Il convient donc de déployer une méthodologie d'exploration qui puisse s'affranchir au maximum de connaissances directes telles celles acquises sur les résurgences thermo-minérales ou les forages (pétroliers, minier, etc...). Pour mener à bien l'exploration sans ces données, il convient d'avoir une idée déjà défini du concept géothermique que l'on cherche (au moins sur le plan théorique), trouver de potentielles occurrences à partir de marqueurs de surface secondaires (pétrologie, géomorphologie, histoire géodynamique...) puis mener à bien une exploration en échelle incrémentale (depuis la lithosphère jusqu'à la zone de forage) avec l'ensemble des outils nécessaires à la caractérisation 3D (modélisation statique) puis 4D (simulation dynamique) de la zone.

4.1.2. Géosciences

Le concept géothermique de Zones de Failles Crustales a été défini (Bellanger et al., 2019). Ce « play » géothermique est complémentaire des propositions de la littérature (Moek, 2014) et potentiellement bien plus universel. Son potentiel européen est évalué, selon notre modélisation, à plus de 6,8GWe (> 2GWe pour le seul territoire Français). Afin de parfaire la définition de ce nouveau « play » et préciser son potentiel européen, un projet ANR a été lancé (GERESFAULT, 9 partenaires français, 2 M€ dont 0.8M€ financé, coordonné par le BRGM).

Une méthode thermo-chronologique a été déployé pour caractériser d'éventuelle anomalies thermiques (négative ou positive) dans l'environnement des Zones de Failles Crustales (Milési et al., 2019). Ces travaux ont été cofinancé par TLS Geothermics et la région Occitanie.

Une caractérisation des circulations fluides dans les zones de failles crustales, et une étude du cas de Pontgibaud ont été conduite (Duwiquet et al. 2019), financé par TLS Geothermics.

Une méthode capable de déterminer l'architecture 3D des Zones de Failles Crustales sur la base d'une reconnaissance automatique de linéaments altimétriques et de mesures microstructurale de terrain a été développé. Cette technologie est propre à TLS Geothermics.

Une méthode de reconnaissance des contextes structuraux à partir de considérations géomorphologiques sur la base d'algorithmes de deep learning est en cours de développement interne chez TLS Geothermics.

TLS Geothermics participe en outre à un projet de formation d'une génération de doctorant autour de la thématique de l'exploration géothermique (EDGE0, 8 bénéficiaires, 17 partenaires, 7 nationalités). Ce projet est porté par l'université de Toulouse en étroite collaboration avec TLS Geothermics.

4.2. Connaissances nouvelles

4.2.1. Liste des acquisitions de données

- (Source : numérique) Synthèse et vectorisation des données de la littérature (géologique, géochimiques et géophysiques),
- (Source : Terrain, Laboratoire) Acquisition de données structurales pour qualifier et quantifier la géométrie de la déformation,
- (Source : Numérique SIG) Acquisition de données linéamentaires pour qualifier les structures sur l'ensemble de la surface topographique,
- (Source : Terrain) Acquisition de données gravimétriques pour qualifier et quantifier les contrastes de densité,
- (Source : Terrain) Acquisition de données magnétotelluriques pour qualifier et quantifier les contrastes de résistivité.

4.2.2. Chronologie des acquisitions de données

- 2015 Q2 : géologie de terrain, cartographie
- 2016 Q1 : géologie de terrain, cartographie
- 2016 Q4 : 52 stations MT (TLS-UBO-IMAGIR)
- 2016 Q4 : 150 points gravimétriques (TLS-UBO-IMAGIR)
- 2017 Q4 et 2018 Q1-2 : analyse linéamentaire

4.2.3. Chronologie des traitements & modèles produits

- 2015-2018 : SIG CeM ; Cartographie géologique, géophysique, géochimique
- 2015 Q3 : Modèle structurale et coupes géologiques
- 2017 Q1 : MT 3Dv1
- 2017 Q1 : MT Coupe v1
- 2017 Q3 : MT 3Dv2
- 2017 Q3 : MT Coupe v2
- 2017 Q4 : MT 3Dv3
- 2017 Q4 : MT Coupe v3
- 2019 Q3 : Anomalie de Bouguer
- 2019 Q4 : Modèle 3D de température
- 2020 Q1 : Interprétation MT et géologique

5. LES RESSOURCES GÉOTHERMIQUES ATTENDUES

5.1. Type de ressource thermique attendu

La température régionale actuellement attendue à 5 km de profondeur est de l'ordre de 130 à 140°C. Néanmoins, d'après nos simulations, l'existence de zones de failles perméables est à même de générer des ressources de l'ordre de 150°C à 3.5km de profondeur voir même de 100°C à moins de 1km de profondeur (Figure 11). Cette seconde ressource peut permettre un usage direct de la chaleur.

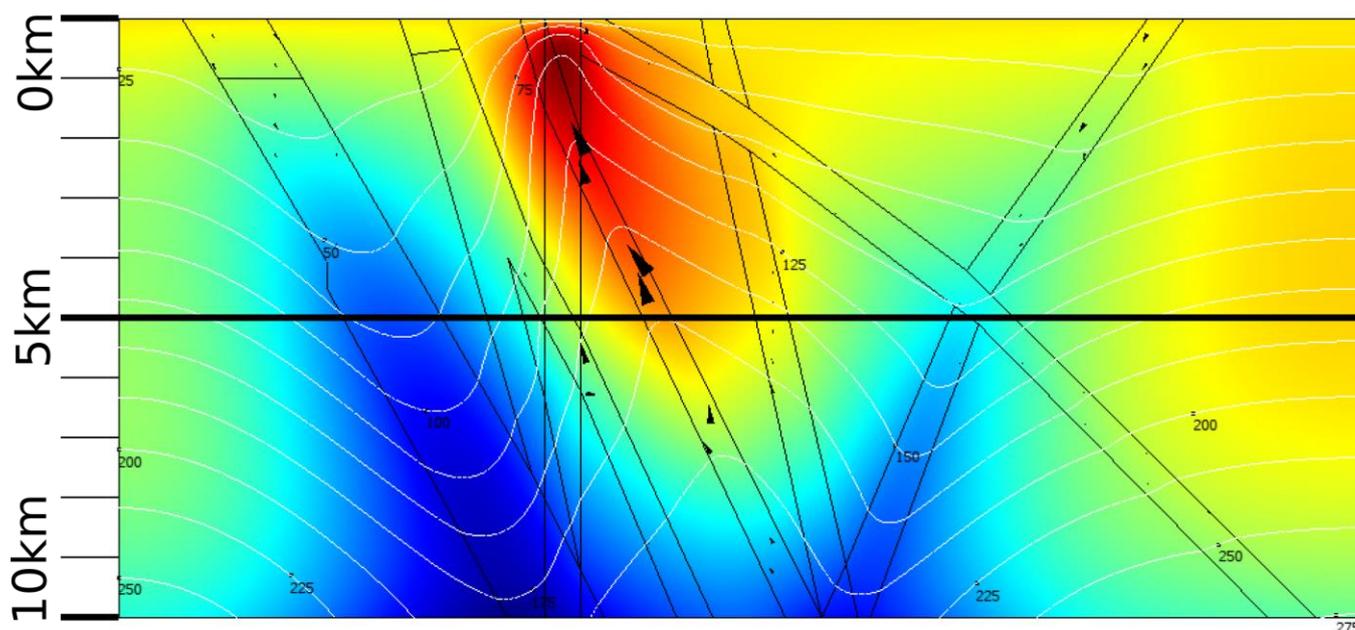


Figure 11: Simulation de circulation fluide et transferts thermiques dans une zone de faille particulière pour une croûte normalement chaude du même type que celle du PER.

5.2. Une ressource thermique possiblement identifiée

Le modèle 3D de résistivité électrique produit lors de la première période de validité a permis d'imager une zone semblable à celle d'Evaux-les-Bains au sud-ouest de Chambon-sur-Voueize. La cartographie géologique de surface révèle que cette zone a été le siège d'intenses circulations hydrothermales par le passé. Il est donc possible que cette zone soit actuellement le siège de circulations fluides.

5.3. Des ressources minérales dans les fluides géothermiques

La zone d'étude est une zone potentiellement riche en lithium. Il est très vraisemblable que le lithium se trouve concentré dans les fluides géothermaux (c'est un élément hydrophile) dans des proportions économiquement intéressantes, à la suite de processus de lixiviation naturelle par les eaux d'infiltration. Sous certaines conditions de température, pression et chimie, l'élément Or pourrait également se trouver dans les eaux géothermales. Des processus d'extraction du lithium sont en cours de développement pour soustraire ces éléments aux fluides géothermaux. En outre, comme ces éléments sont en solutions, le coût énergétique et environnemental pour les extraire sera très faible.

5.4. Travaux envisagés pour cette seconde période (2020-2025)

Les études qui seront menées pour la seconde période par TLS Geothermics et son partenaire Storengy s'appuieront sur les études déjà commencées, grâce aux bases de données publiques ayant été centralisées, ainsi que sur les campagnes de terrain déjà réalisées sur ce secteur, notamment sur celui de la faille de Chambon. La thématique des ressources connexes (lithium) associées à la géothermie profonde sera intégré au travail.

Ce volet ajoute un intérêt économique important à la poursuite de l'exploration sur ce PER et la création de nouveaux modèles économiques intégrant production d'énergie (chaleur et/ou électricité) et de matières premières critiques ou stratégiques pour la transition énergétique et sociétale en France et en Europe.

L'exploration géothermique se déroulera en trois temps :

1. Complétude d'acquisitions géologiques, géochimiques et géophysiques sur le secteur de la faille de Chambon sur Voueize (au sud du PER). Possible extension des acquisitions MT et gravimétrie vers l'Ouest, production des modèles géologiques 3D de ce secteur.
2. Acquisition des connaissances sur le secteur de la faille de la Marche, au nord du PER, acquisitions géologiques, géochimiques et géophysiques, production des modèles 3D géologiques 3D de ce secteur.
3. Analyse et choix sur ces deux secteurs pour la poursuite du développement des projets.