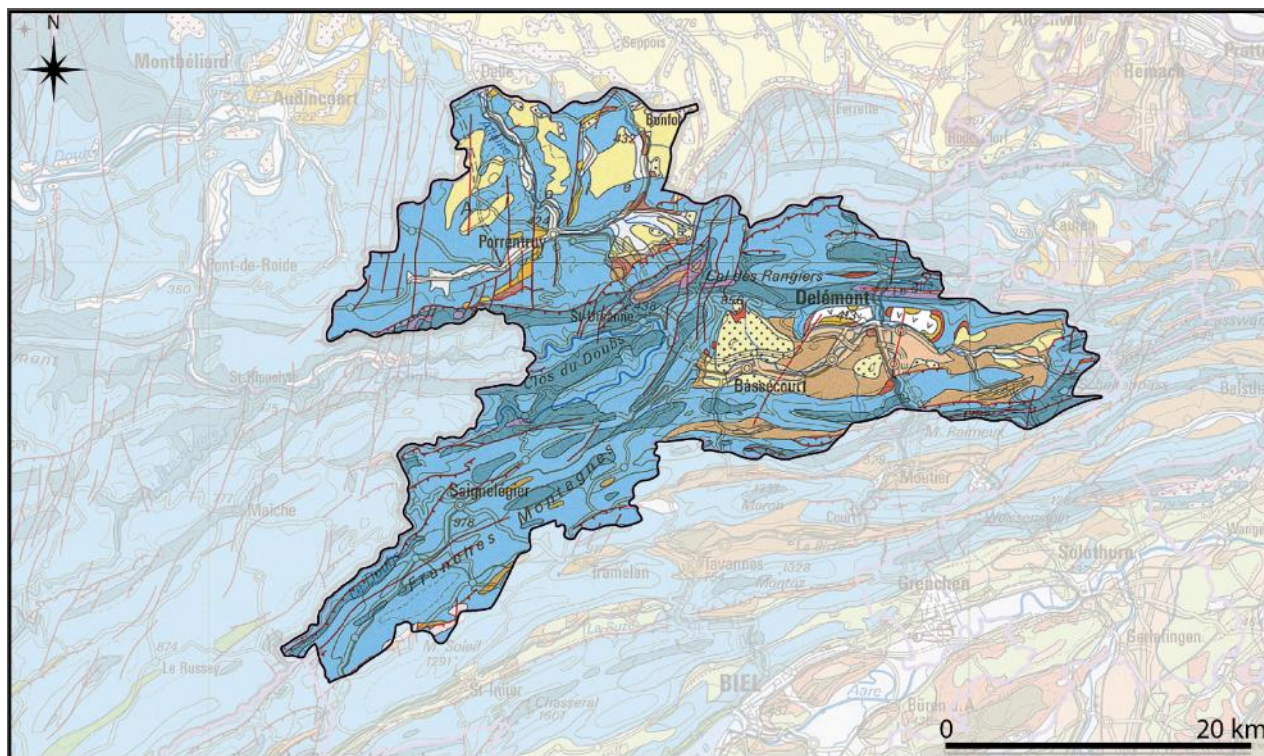


Potentiel géothermique hydrothermal du Canton du Jura



Synthèse du potentiel & Pistes de développement pour une prospection des ressources dans le Canton

-
Service du développement territorial
du Canton du Jura

Préparé par
Hydro-Géo Environnement Sàrl
Version 2.0 – Décembre 2022

Coordination de projet	Dr. Jérôme Chablais , Hydro-Géo Environnement Sàrl à Genève Dr. Antoine Haddad , Hydro-Géo Environnement Sàrl à Genève
Rédaction	Dr. Antoine Haddad , Hydro-Géo Environnement Sàrl à Genève Dr. Jérôme Chablais , Hydro-Géo Environnement Sàrl à Genève Dr. Marius Gruber , Hydro-Géo Environnement Sàrl à Genève
Approbation	Dr. Jérôme Chablais, Hydro-Géo Environnement Sàrl à Genève Dr. Ludovic Savoy, Hydro-Géo Environnement Sàrl à Genève
2ème version	Février 2023
Remarques	<ul style="list-style-type: none"> Le rapport comprend une synthèse du potentiel géothermique hydrothermal du Canton du Jura et indique les pistes de développement pour une prospection des ressources
Figures 1 ^{ère} page	Carte Géologique du Canton du Jura (Source : Swisstopo, map.geo.admin.ch)
Distribution	Service du développement territorial du Jura – Pierre Brulhart , Chef de la Section de l'énergie, chef de service. Office de l'environnement – Christophe Badertscher , Responsable Domaine Installations et Activités humaines

Hydro-Géo Environnement Sàrl

Jérôme Chablais

Directeur Associé



Antoine Haddad

Géologue-Géophysicien



Table des matières

Table des matières.....	4
1 Introduction	5
1.1 Objectifs de l'étude.....	6
1.2 Zones géographiques clefs.....	7
2 Synthèse des données existantes pour la prospection	8
2.1 Profils sismiques de réflexion	8
2.2 Forages profonds	9
2.3 Géologie de surface	12
2.4 Données requises à considérer pour une prospection du Canton	13
3 Cadre géologique pour la prospection géothermique.....	14
3.1 Contexte général.....	14
3.2 Contexte lithostratigraphique.....	15
3.3 Contexte tectonique	17
3.3.1 Contexte tectonique de la ZONE A, vallée de Delémont – Pays Vadais.	17
3.3.2 Contexte tectonique de la ZONE B, Saignelégier – Franches-Montagnes.	18
3.3.3 Contexte tectonique de la ZONE C, Porrentruy – Plaines d'Ajoie.	19
3.3.4 Aléas sismiques (état des lieux)	21
4 Synthèse des Ressources géothermales cibles	23
4.1 ZONE A : Vallée de Delémont	29
4.2 ZONE B : Franches-Montagnes	30
4.3 ZONE C : Porrentruy.....	30
5 Potentiel géothermique hydrothermal du Canton du Jura : zones préférentielles	32
6 Recommandation pour un programme de prospection de réservoirs géothermiques	36
6.1 Proposition d'un programme de prospection prévisionnel.....	37
6.1.1 Objectifs du programme et stratégie	37
6.1.2 Programme de travaux de prospection adéquats au Canton du Jura	39
6.1.3 Budget prospection	42
6.2 Subvention OFEN pour la prospection de réservoirs géothermiques	43
7 Réflexions techniques préliminaires pour la réalisation de forages exploratoires	44
Références	47

1 Introduction

Le Canton du Jura possède un potentiel géothermique hydrothermal de moyenne profondeur par la présence dans son sous-sol de réservoirs fracturés. Il s'agit des unités carbonatées cibles du Jurassique supérieur (Malm), du Jurassique moyen (Dogger) et du Trias (Muschelkalk). Ces formations réservoirs peuvent abriter des ressources hydrothermales dont la recharge est facilitée par des roches affleurantes en surface où les eaux météoriques s'infiltrent préférentiellement (particulièrement applicable pour les niveaux d'âge Jurassique). A plus grande profondeur, le sommet du socle (si fracturé) ainsi que des dépôts permo-carbonifères pourraient également représenter des intervalles réservoirs pertinents à condition que leur présence soit avérée.

A l'échelle du Canton, les grandes inconnues résident dans la localisation exacte des zones présentant des systèmes structuraux favorables à la circulation d'eaux géothermales, soit la présence de failles en profondeur. Les failles de type décrochant (d'orientations N-S à NNE-SSW dans le canton) en particulier doivent être ciblées car ces dernières sont perpendiculaires à la contrainte majeure subverticale (210/70) (source : Rapport de projet pilote de géothermie profonde en Haute Sorne – 2014) et devraient représenter des zones de circulations d'eaux géothermales préférentielles (zones de dégâts) et.

Pour identifier ces failles, il est nécessaire pour le Canton de voir naître des campagnes de prospection mettant principalement en œuvre des mesures d'acquisitions géophysiques 2D et/ou 3D. En effet, ces données manquent à ce jour cruellement à travers le Canton pour identifier des sites où implanter des forages de prospection de moyenne profondeur, et ainsi d'augmenter les chances de succès de tels forages.

Une analyse spécifique de l'histoire thermique et d'enfouissement des unités réservoirs potentielles pourrait également être menée afin de caractériser plus en détails les propriétés réservoirs de ces roches cibles. Les études du Mont-Terri et une synthèse bibliographie dédiée pourraient offrir une première base de connaissance dans cette optique.

La caractérisation des unités réservoirs propices à la géothermie a en revanche été bien investiguée ces dix dernières années. Des études clefs ont été menées fournissant les éléments géologiques et techniques en lien avec ces ressources géothermales. Il peut être cité les deux rapports ci-dessous :

- République et Canton du Jura – **Géothermie profonde – Etude du potentiel cantonal**. Rapport Groupement d'Etude Géothermie Profonde Jura, Mai 2012.
- Office de l'environnement du canton du Jura - **Roches et aquifères moyennement profonds dans la Vallée de Delémont et en Ajoie - Évaluation du potentiel d'exploitation géothermique**. Rapport CSD Ingénieurs SA, Octobre 2021.

La présente étude a pour objectif tout d'abord de résumer les caractérisations géologiques réalisées dans ces rapports préalables, d'en extraire l'essentiel et d'amener les pistes de réflexions minimales à suivre pour initier une ou des futures campagnes de prospection à travers le Canton. Les stratégies de prospection et les phasages techniques associés y sont discutés.

1.1 Objectifs de l'étude

En juin 2022, le Canton du Jura a mandaté Hydro-Géo Environnement Sàrl (HGE) pour réaliser une synthèse sur le potentiel géothermique hydrothermal du Canton et les moyens de prospection à mettre en œuvre pour développer les ressources hydrothermales identifiées. Ce rapport a pour objectif de servir de base documentaire au Canton pour faciliter des échanges futurs avec des porteurs de projets intéressés par le développement de la géothermie sur le territoire jurassien.

Ce projet s'inscrit dans la stratégie énergétique 2050 du Conseil Fédéral et de la stratégie énergétique du Canton du Jura. Le but du Canton est d'assurer l'intégration de la géothermie de moyenne profondeur dans les réflexions de réseaux de chaleur où la géothermie hydrothermale peut fournir une ressource renouvelable en tant qu'énergie de bande (Figure 1). Cette énergie peut compléter des systèmes de réseaux de chaleur fonctionnant au bois (centrale à bois), permettant de pérenniser les ressources bois sur le long terme.

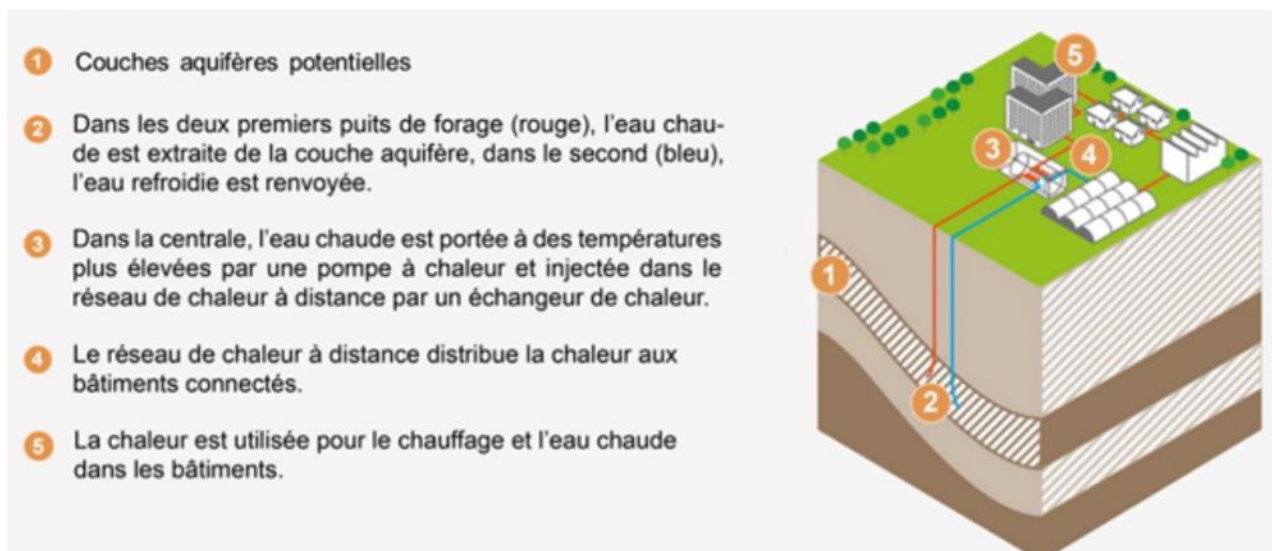


Figure 1 : Fonctionnement de la géothermie à moyenne profondeur simplifié (source : Géothermie-Suisse)

Le rapport est construit avec les objectifs suivants :

- Fournir une introduction présentant les secteurs géographiques considérés pour l'étude ainsi que les données existantes ;
- Résumer le contexte lithostratigraphique, tectonique et hydrogéologique de la région ainsi que les ressources hydrothermales associées ;
- Déterminer des secteurs en fonction de leur potentiel géothermique et établir un « ranking » ;
- Définir un programme de prospection minimum à mettre en œuvre pour le développement des ressources hydrothermales ;
- Recommander un phasage cohérent pour la réalisation des travaux de prospection ;
- Décrire les outils de subvention de la confédération (OFEN) à la géothermie de moyenne profondeur.

1.2 Zones géographiques clefs

L'intégralité du Canton du Jura est considérée dans cette synthèse. La surface totale de ce canton est de 838,5km². Pour en faciliter l'analyse géothermique, un découpage en 3 grandes zones géographiques a été réalisé, fonction de leurs contextes géologique (Figure 2) :

- **ZONE A**, articulée autour de la vallée de Delémont, est affectée par plusieurs plissements et chevauchements jurassiens mais aussi par des bassins comblés par des dépôts de molasse tertiaire.
- **ZONE B**, comprenant le plateau des Franches-Montagnes et le Clos du Doubs, est également affectée par de nombreux plissements et chevauchements cependant sans dépôt et bassin tertiaire notoire.
- **ZONE C**, située au Nord du canton du Jura et correspondant à la région de l'Ajoie, est caractérisée par des formations tabulaires subhorizontales et quelques plissements mineurs de la Chaîne du Jura.

Cette étude a pour but de résumer le potentiel géothermique de chacune de ces zones. Les facteurs principaux pris en compte étant leurs contextes tectonique (présence et typologie des failles), lithostratigraphique (présence des niveaux réservoirs, critères lithologiques pour la détermination des limites de section en forage) et hydrogéologique ainsi que la densité de la population pour des aspects énergétiques (besoins en surface).

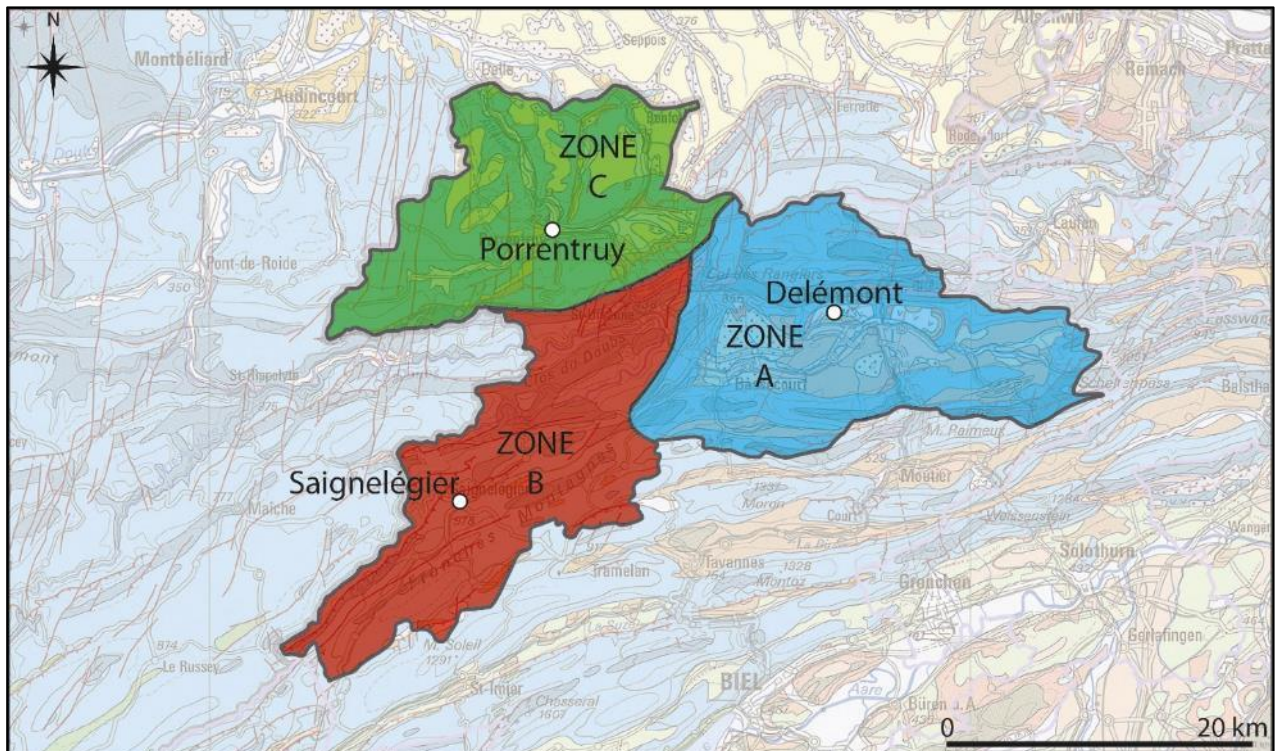


Figure 2 : Carte détaillant les zones considérées pour la synthèse du potentiel géothermique hydrothermal du Canton du Jura.

2 Synthèse des données existantes pour la prospection

Le chapitre suivant a pour objectif de décrire les données existantes dans le Canton du Jura. La synthèse suivante est basée sur les documents disponibles sur les sites publics du Canton du Jura et fédéral (map.geo.admin.ch, geo.jura.ch) ainsi que sur une recherche bibliographique d'études menées sur le Canton.

2.1 Profils sismiques de réflexion

La sismique de réflexion est une méthode géophysique qui permet de visualiser les structures géologiques du sous-sol (limites de couches et failles). Les ondes sismiques sont générées en surface (à l'aide principalement d'un camion vibreur), traversent le sous-sol où elles sont réfléchies vers la surface où elles sont enregistrées par des capteurs (géophones).

Plusieurs profils sismiques de réflexion 2D ont été acquis par le passé dans le Jura présentant une qualité faible à moyenne :

- **Secteur Delémont:** 73BE2, 73BE4, 73BE5, 74BE10, 74BE12, 78BE20 et 78BLBE21.
- **Secteur Ajoie:** 73BE5, 80JU1EXT, 73BE8, 80JU2, 73BE9, 80JU3, 80JU4, 73BE6 et 73BE7.
- **Secteur Franches-Montagnes:** 73BE3.

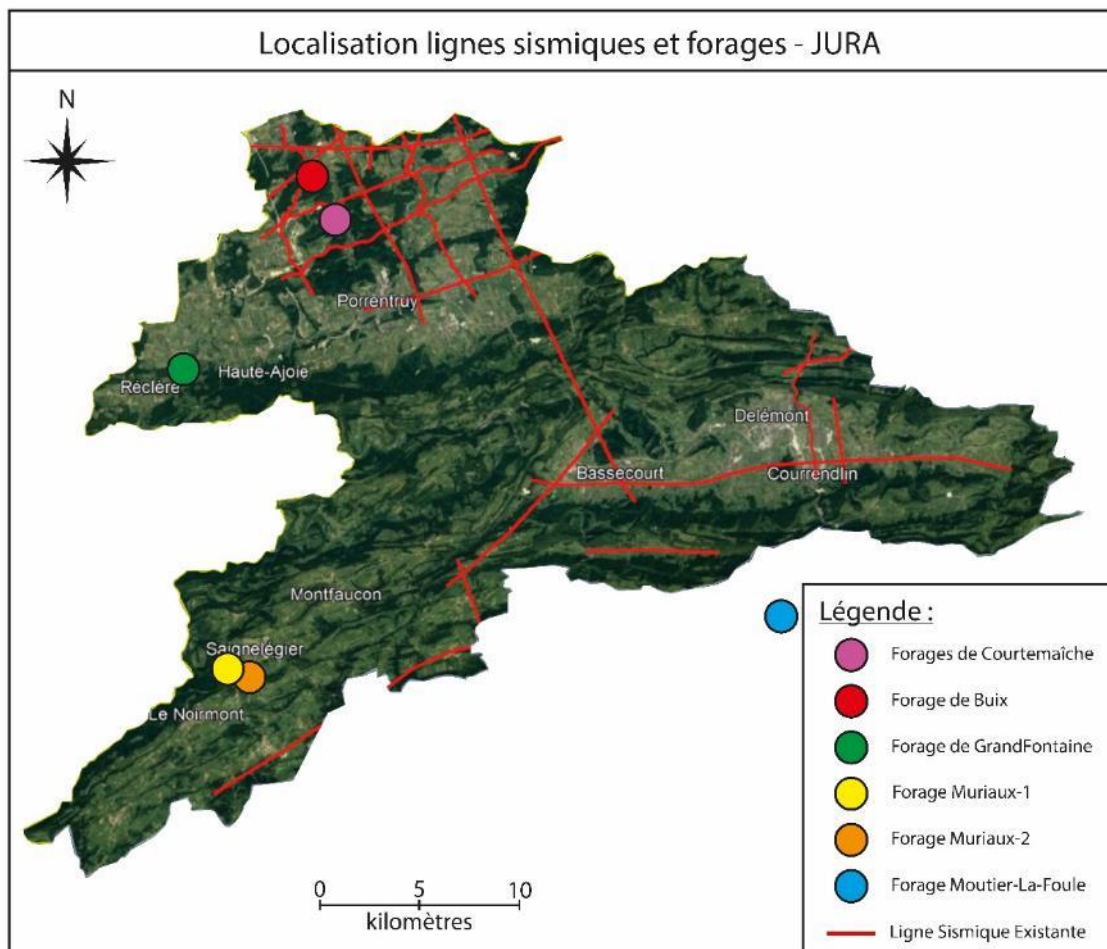


Figure 3 : Carte des profils sismiques et forages profonds existants.

Ces profils peuvent exister sous format papier ou sous format digital (type scan image) ainsi que sous format vectoriel (type SEG-Y). Dans l'optique d'une prospection géothermique, il est recommandé de procéder à la recherche de ces données et de retraiter ces lignes sismiques pour en améliorer la qualité (réalisable si les données brutes sont disponibles).

Cependant, les trois zones définies dans cette synthèse ne sont pas couvertes de manière optimale par des données sismiques 2D. Les observations suivantes peuvent être amenées :

- **Delémont, couverture faible** : Un long profil le long de la vallée peut permettre la reconnaissance de failles décrochantes (74BE10). Un court profil existe à l'Est de Delémont (74BE11) avec une direction Nord-Sud mais ce dernier ne s'étend que dans la vallée et ne permettra pas d'identifier les failles chevauchantes. Les autres profils sont principalement situés à l'Ouest du secteur et restent clairsemés.
- **Saignelégier couverture très faible** : Un unique profil sismique 2D existe pour cette région (75BE3). Son orientation ESE-ONO ne permettra pas de reconnaître des failles décrochantes. De plus, ce profil ne traverse pas des zones urbaines où un intérêt pour la géothermie est marqué.
- **Porrentruy, couverture moyenne** : 9 profils sismiques existent, tous situés dans la partie Est/Nord-Est de la zone. Certaines agglomérations sont couvertes par ces profils, cependant la ville de Porrentruy est située 'en bout de ligne' (ligne 73BE9) limitant grandement la qualité du profil et son interprétation à cet endroit (effet de migration de bord).

La qualité des profils sismiques dépend des paramètres d'acquisition et de traitement ainsi que des profondeurs des horizons géologiques investigués. L'imagerie sous les unités profondes évaporitiques du Trias par exemple est complexe et nécessite des paramètres d'acquisition dédiés. La qualité des données exerce une influence directe sur la fiabilité de l'interprétation sismique et donc sur la fiabilité du modèle géologique qui en résultera (position des limites de couches et des failles en profondeur).

Globalement, la couverture sismique au droit des trois zones est jugée insuffisante pour une caractérisation précise du sous-sol et de son potentiel géothermique hydrothermal. Une acquisition de nouvelles données sismiques 2D et/ou 3D sera nécessaire pour la cartographie de cibles géothermiques (confirmation de la profondeur des unités réservoirs cibles et de la présence de failles).

2.2 Forages profonds

Les forages proches jouent un rôle clef dans la phase de prospection géothermique. En effet, ils permettent de déterminer par exemple :

- Le cadre lithostratigraphique (type de roche et position des limites stratigraphiques).
- Les évidences de fracturation / porosité / perméabilité des unités réservoirs cibles.
- Des paramètres géophysiques et pétrophysiques (p.ex. Sonic log, Gamma Ray, Densité etc.)
- Des mesures de vitesses (Vertical Seismic Profile - VSP), indispensables pour la conversion temps - profondeur des interprétations sismiques 2D/3D.

Aucun forage profond n'a été exécuté à ce jour dans le canton du Jura dans le domaine de la géothermie profonde. Plusieurs forages d'eaux ont en revanche été réalisés avec différents objectifs. Sept Forages profonds (≥ 400 m) sont ainsi répertoriés dans le Canton du Jura (source : map.geo.admin.ch - Figure 3) :

Nom Forage	Profondeur (TD)	Année forage	But	Coord. E	Coord. N
Buix	1052.75 m (MD)	1917	Charbon	2568787	1258620
GrandFontaine	1200 m (MD)	2016	Salines	2562121	1248367
Muriaux-1	615 m (MD)	1999	Eau souterraine	2564484	1232571
Muriaux-2	635 m (MD)	1999	Eau souterraine	2565682	1232156
Courtemaîche N1 « Petites Echiousses »	389 m (MD)	2000	Eau souterraine	Lieu-dit « Petites Echiousses »	
Courtemaîche N2 « Ancienne Carrière »	~387 m (MD)	2000	Eau souterraine	Lieu-dit « Ancienne Carrière »	
Courtemaîche N3 « Basse Fin »	~600 m (MD) ~416m (TVD)	2000	Eau souterraine	Lieu-dit « Basse Fin »	

Le forage le plus proche de Delémont, se situe à Moutier (Figure 3). Ce dernier a atteint la profondeur de 558.7m :

Nom Forage	Profondeur (TD)	Année forage	But	Coord. E	Coord. N
Moutier-La-Foule	558.7 m (MD)	1966	Eau souterraine	2593558	1235346

Ces forages associés à ceux plus profonds (hors Canton) sont clefs pour l'analyse du potentiel géothermique et hydraulique du Canton du Jura.

Les résultats des forages de Courtemaîche dans le Jura Tabulaire de la Zone C sont bien décrits et discutés dans le travail de Boem et al. 2006 (voir référence).

En Suisse et en France voisine, plusieurs forages profonds ont été effectués à des fins géothermiques, pétrolières ou pour le stockage de déchets radioactifs. Ces forages ont permis d'identifier plusieurs réservoirs géothermiques potentiels notamment dans le Malm, le Dogger et le Muschelkalk. Le Tableau 1 permet d'obtenir une synthèse des lithologies, des réservoirs et des profondeurs de formation pour les puits profonds les plus proches des zones concernées par la synthèse. Le puits de Buix est détaillé ainsi que celui de Montbouton.

Identification Géologique		Lithologie	Réservoirs	Bux		Montbouton		Knoeringue		Bâle	
				Profondeur	Epaisseur	Profondeur	Epaisseur	Profondeur	Epaisseur	Profondeur	Epaisseur
Quaternaire		Alluvions et produits de l'altération		-	0 m	-	0 m	0-38 m	38 m	0-21 m	21 m
Tertiaire	OSM OMM USM	Molasse : marnes, sables fins et grès.		0-13 m	13 m	-	0 m	38-276 m	234 m	21-597 m	576 m
	Malm	Malm sup. : Calcaires. Malm inf. : Marnes.	Aquifère calcaire du Malm	13-103 m	90 m	0-130 m	130 m	276-535 m	259 m	597-827 m	230 m
Jurassique	Dogger	Dogger sup. : Calcaires. Dogger inf. : Calcaires marneux et marnes.	Aquifère calcaire du Dogger (Grande Oolithe)	103-456 m	454 m	130-523 m	393 m	535-942 m	407 m	827-1060 m	233 m
	Lias	Marnes, gypses et calcaires.		456-562 m	106 m	523-600 m	77 m	942-999 m	57 m	1060-1108 m	48 m
	Keuper	Anhydrites et calcaires marneux.		562-753 m	191 m	600-788 m	188 m	999-1176 m	177 m	1108-1278 m	170 m
Trias	Muschelkalk	Dolomites, gypses et calcaires marneux.	Aquifère calcaire du Muschelkalk supérieur	753-992 m	239 m	788-974 m	186 m	1176-1392 m	216 m	1278-1590 m	312 m
	Buntsandstein	Grès sableux.	Aquifère du Buntsandstein	992-1043 m	51 m	974-1040 m	66 m	1392-1514 m	122 m	1590-1645 m	55 m
	Permien, Carbonifère	Conglomérats et grès détritiques.	???	>1043 m	?	>1040 m	?	1514-2123 m	609 m	1645-2426 m	781 m
Socle cristallin		Granite, Gneiss		?	?	?	>2123 m		>2426 m		

Tableau 1 - Tableau de synthèse comprenant les lithologies, réservoirs et profondeurs des puits profonds dans, ou à proximité du canton du Jura. Localisation des forages : Figure 3 (extrait du rapport de mai 2012 sur l'étude géothermique profonde du Jura).

2.3 Géologie de surface

La totalité du périmètre du canton du Jura est couverte par des cartes géologiques qui proviennent de l’atlas géologique de la Suisse à différentes échelles.

La Figure 4 présente les formations affleurantes dans le canton du Jura. Ce dernier est dominé par des formations mésozoïques en surface provenant en grande majorité du Malm et du Dogger. Dans la vallée de Delémont, on trouve des formations plus récentes datant de l’Oligocène et du Miocène. Des dépôts quaternaires de faible épaisseur sont également présents dans la vallée de Delémont ainsi qu’au Nord/Nord-Est de Porrentruy.

La carte de géologie de surface est un bon indicateur pour la projection en profondeur des réservoirs géologiques cibles pour une prospection hydrothermale. Ainsi, la zone de Delémont, par la présence d’un bassin sédimentaire (synclinal) avec dépôts Oligocènes recouvrant les unités calcaires du Jurassique, permet de retrouver ces dernières à des profondeurs dépassant les 1000m. En contrepartie, il peut être attendu des zones où les unités du Malm et Dogger affleurent déjà en surface, que les profondeurs des réservoirs cibles soient inférieures à 1000m, excepté dans des contextes tectoniques spécifiques avec existence de duplex tectonique causant un dédoublement des séries stratigraphiques.

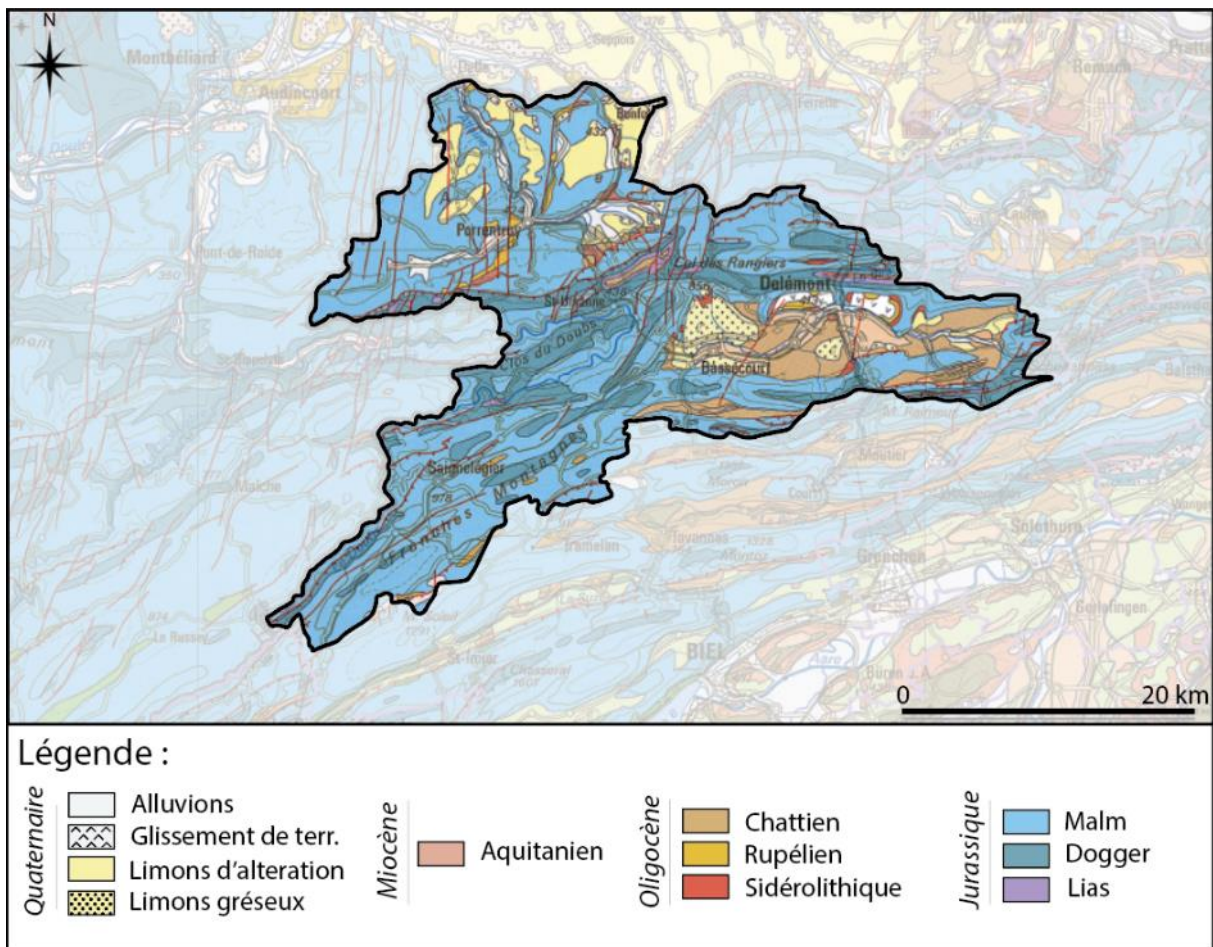


Figure 4 : Carte géologique du Jura au 1 :500'000 (GK500-Geol – map.geo.admin.ch).

De manière générale, **le Canton du Jura est riche en informations de géologie de surface** qui permettront de contraindre et caler toutes futures interprétations sismiques et modélisations géologiques du sous-sol de moyenne profondeur.

2.4 Données requises à considérer pour une prospection du Canton

Le Tableau 2 ci-dessous synthétise les données existantes du sous-sol requises pour mener un projet de prospection géothermique dans le Canton :

Type de données	Propriétaire
Forages profonds Muriaux (Muriaux-1, Muriaux-2)	Syndicat pour l'alimentation des Franches-Montagnes en eau potable (SEF)
Forage profond Moutier (Moutier-La-Foule)	Ville de Moutier
Forage Profond Buix	Schweizerische Geotechnische Kommission (SGTK)
Forage profond GrandFontaine	Salines Suisse SA
Forages de Courtemaîche	Canton du Jura
Profils sismiques	A déterminer – Archive Cantonales du Jura et/ou de Berne
Sources & captages	Canton du Jura
Sondes géothermiques	Canton du Jura
Cartes géologiques GeoCover 3	swisstopo
Profils géologiques	swisstopo
Tous les Forages profonds régionaux avec cibles au Muschelkalk	swisstopo

Tableau 2 : Synthèse des données du sous-sol requises pour le projet.

L'accessibilité à ces données est clef dans le cadre de la prospection géothermique. Une des premières tâches de toute prospection consistera donc à obtenir ces données auprès des différents acteurs afin de les analyser et les valoriser. Elles seront utilisées entre autres pour établir et confirmer les cibles géologiques prioritaires ainsi que le design sismique des campagnes de mesures géophysiques éventuelles.

3 Cadre géologique pour la prospection géothermique

3.1 Contexte général

Le Canton du Jura fait partie principalement du domaine géologique de la Haute-Chaîne du Jura d'orientation OSO-ENE (voir Figure 5). La partie nord du Canton représente le sous-domaine des Avants-Monts du Jura, partie externe du Jura caractérisée par le Jura tabulaire en termes de modèle structural.

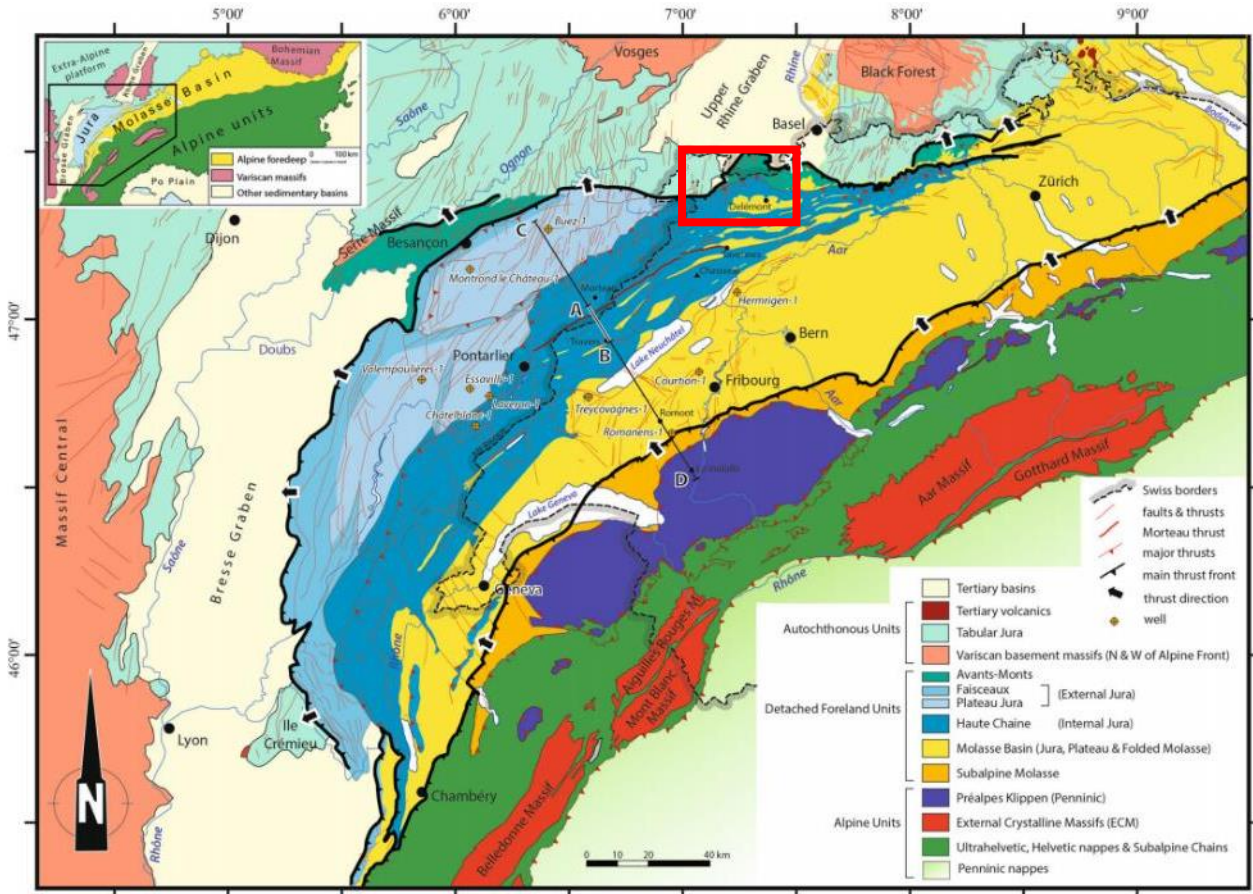


Figure 5 : Carte montrant le contexte structural à large échelle du canton du Jura (indiqué en rouge ; extrait de Rime et al. 2019).

3.2 Contexte lithostratigraphique

Dans les montagnes du Jura, une vision complète de l'empilement lithostratigraphique est disponible au droit des synclinaux profonds comme celui de la vallée de Delémont. Du bas vers le haut, soit du plus vieux au plus jeune, les unités géologiques suivantes sont attendues (résumé simplifié d'après Gruber, 2017) :

- Le « **SOCLE** » d'âge pré-Mésozoïque » :
 - Constitué essentiellement de roches cristallines d'âge pré-Mésozoïque (gneiss et granites) ;
 - Les roches cristallines sont localement affectées par des grabens ou demi-grabens partiellement comblés de sédiments siliciclastiques d'origine marine à deltaïque d'âge Permo-Carbonifères (grès, argiles, conglomérats, charbon). Ces **dépôts Permo-Carbonifères** peuvent varier de quelques dizaines à des centaines de mètres en fonction du contexte tectonique et plus précisément, de la présence de graben.

- Les roches d'âge **Mésozoïque** ;
 - **Série du TRIAS** incluant une **épaisse couche de roches évaporitiques d'âge Triasique** (anhydrites et sels, localement aussi grès, argiles et calcaires / dolomies). Un niveau spécifique calcaire dolomitique, riche en bioclastes, forme une unité réservoir cible pour le Jura. Il s'agit du **Muschelkalk**
 - **Série du JURASSIQUE** caractérisée par des roches carbonatées alternant avec des niveaux de marnes et argiles (dans le Lias, Dogger inférieur et Malm inférieur) : Dogger supérieur et Malm supérieur. Ces roches carbonatées, lorsque fracturées, forment d'excellents réservoirs, susceptibles d'abriter des aquifères géothermiques potentiels (à profondeur suffisante).

A noter que le sommet de la série Mésozoïque est caractérisé par une surface érosive importante. Les calcaires du top du Mésozoïque sont souvent karstifiés et couverts, voir remplis, par des sédiments peu consolidés de type Sidérolitique et Gompholite. **Dans le Canton du Jura, les calcaires du Crétacés ne sont pas présents (érodés).**

- Les roches d'âge **TERTIAIRE (Molasse)** :
 - Des roches détritiques (grès, argiles, marnes) d'âge tertiaire (ou Cénozoïque) subdivisées en différents types de Molasse d'après leur milieu de dépôt : Molasse marine inférieure (UMM), Molasse d'eau douce inférieure (USM) et Molasse marine supérieure (OMM).

En surface des dépôts quaternaires récents (alluvions, dépôts de pente, moraines, etc.) avec une épaisseur limitée peuvent recouvrir localement la série Tertiaire ou Mésozoïque.

La Figure 6 résume cette série lithostratigraphique complète qui peut être attendue dans les zones les plus complètes, comme la vallée de Delémont.

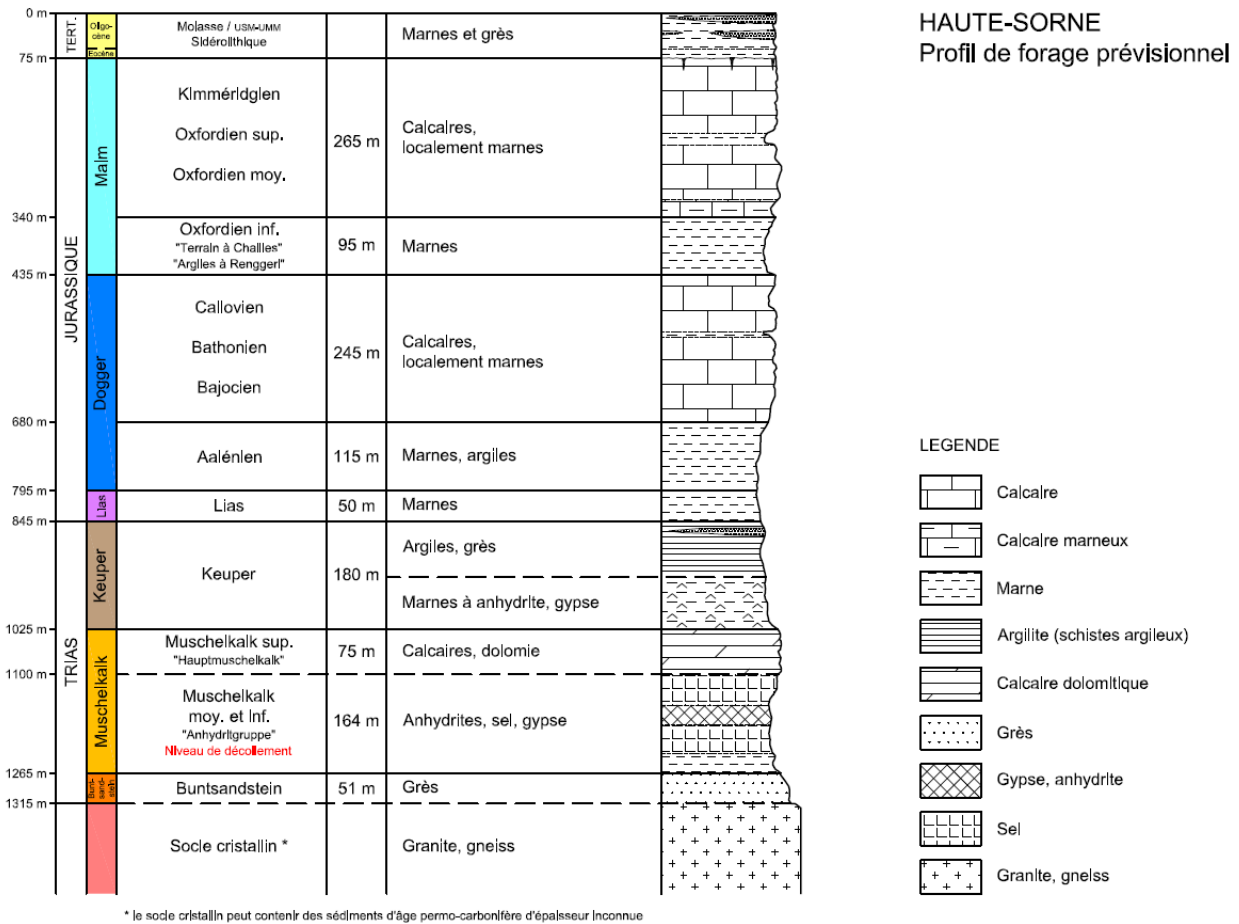


Figure 6 : Colonne lithostratigraphique type, extrait du profil prévisionnel d'Haute-Sorne (source : Rapport de projet pilote de géothermie profonde en Haute Sorne – 2014).

3.3 Contexte tectonique

Les chapitres suivants détaillent le contexte tectonique des divers domaines structuraux présents à travers le Canton du Jura (failles et fractures ou plissement).

De manière générale le Canton du Jura peut être séparé en deux parties correspondant au Jura plissé au Sud (ZONES A et B) et au Jura tabulaire formant l’Ajoie au Nord (ZONE C).

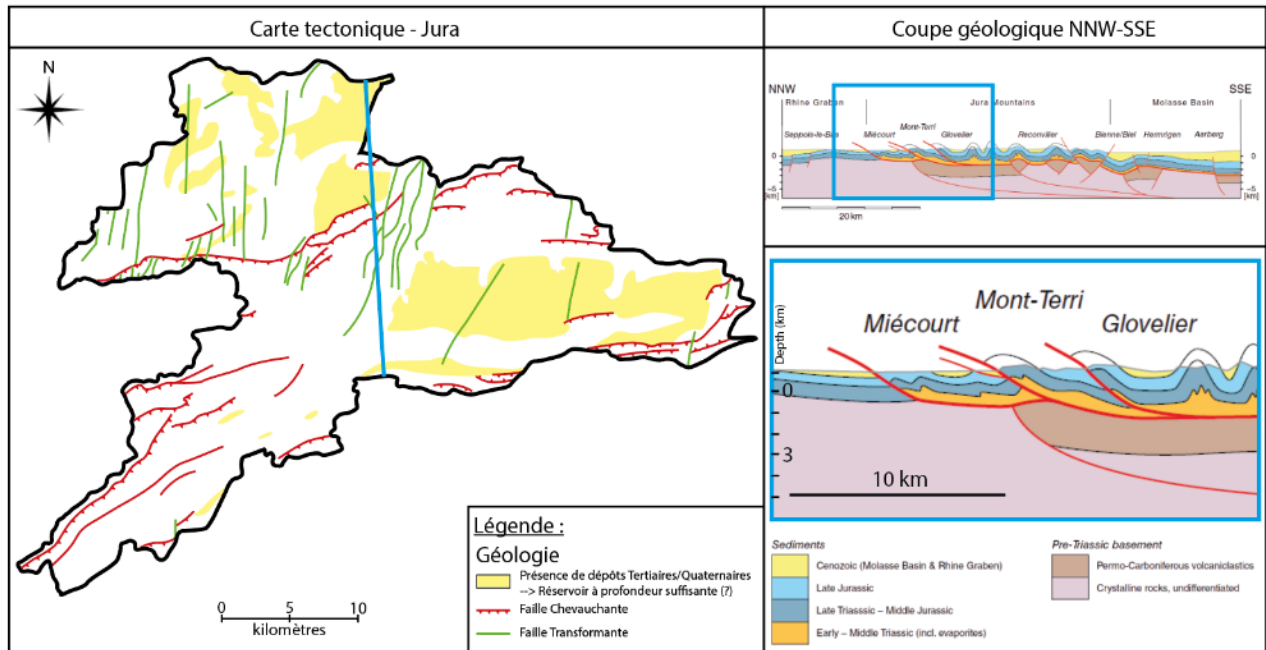


Figure 7 : Schéma structural du périmètre du Jura basé sur geo.admin.ch (gauche) et coupe géologique associée (Pfiffner, 2009).

3.3.1 Contexte tectonique de la ZONE A, vallée de Delémont – Pays Vadais.

La vallée de Delémont est constituée par un synclinal orienté Est-Ouest situé entre l’anticlinal de Vellerat-Tiergarten au Sud et Vorbourg au Nord. Ce synclinal est composé d’une couche tertiaire d’un maximum de 300 mètres d’épaisseur (Liniger et al. 1925, Figure 8), recouvrant les séries sédimentaires Mésozoïque Jurassique (Malm et Dogger) et du Trias (Muschelkalk).

Bordé à l’Est et à l’Ouest par les anticlinaux de Trobberg-Rotmatt et Caquerelle respectivement, ce synclinal est également traversé par plusieurs failles d’orientation NNE-SSO affectant l’ensemble de la série Cénozoïque et Mésozoïque. Ces failles héritées d’une période d’extension du fossé rhénan ont ensuite été réactivées en failles décrochantes sénestres lors de la mise en place du Jura durant le Miocène supérieur. On compte parmi elles, la faille de Develier, la faille de Courrendlin et la faille de Vicques.

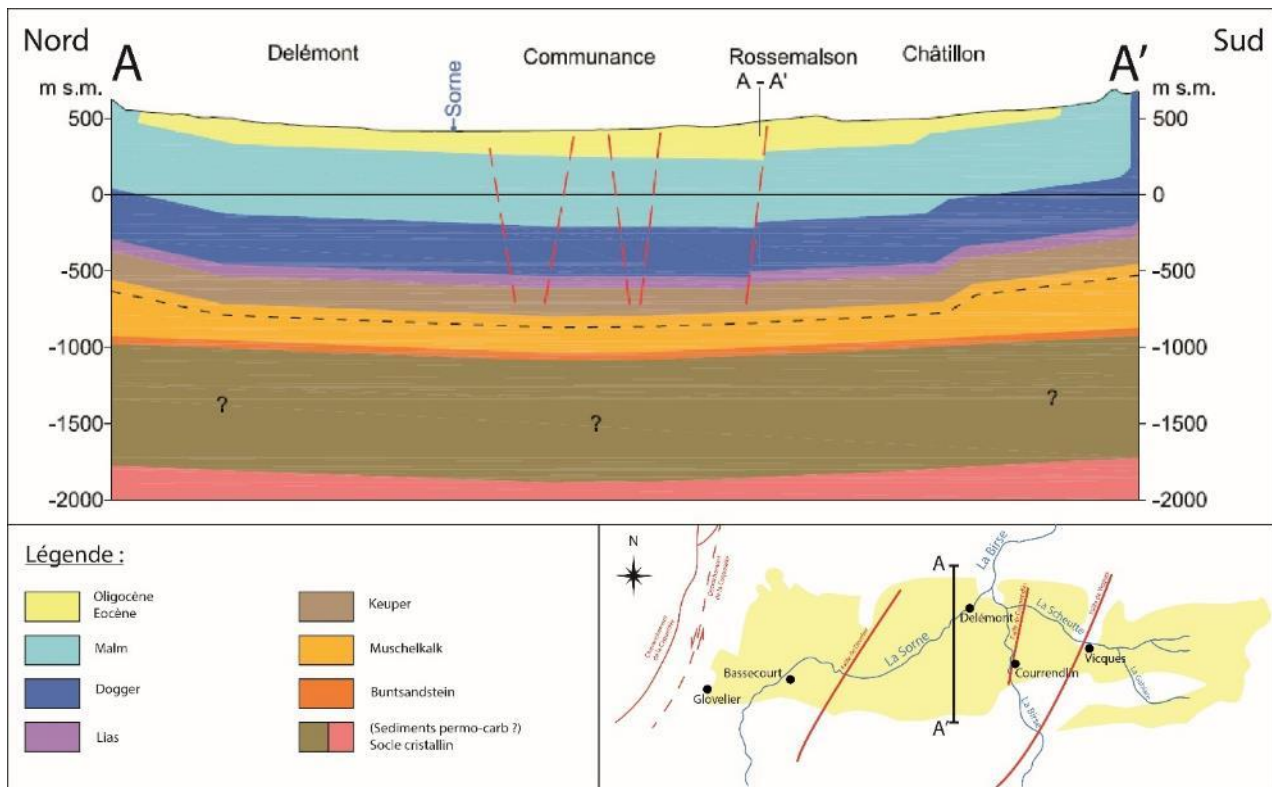


Figure 8 - Coupe tectonique Nord-Sud de la vallée de Delémont (d'après Rapport technique projet pilote de géothermie profonde Haute-Sorne – 2014)

En termes de prospection géothermique, une acquisition de données sismique 2D ou 3D devra permettre de confirmer la présence de ces failles régionales et locales, de déterminer précisément leurs géométries et éventuellement d'identifier de nouvelles structures non cartographiées à ce jour. Une orientation de profils O-E doit être privilégiée pour cette zone A.

La présence de ces failles d'orientation NNE-SSO est clef, car elles offriraient un lien hydraulique direct entre la recharge en surface (affleurement) et les unités réservoirs en profondeur, ce qui fait de cette ZONE A un secteur à fort potentiel pour la géothermie hydrothermale. En revanche, la nature exacte des champs de contraintes locaux agissant le long de ces structures est peu connue à ce jour et il est difficile de statuer sur le potentiel hydraulique de ces structures. Une analyse détaillée des linéaments tectoniques du secteur de Delémont sur la base des images de LIDAR, MNT ou mesures de terrain permettrait déjà de compléter la cartographie structurale du secteur et d'en étudier le réseau de fractures. Ce type d'analyse est indispensable avant de pouvoir mener une caractérisation des types de décrochements tectoniques favorables ou non à une circulation hydrothermale. Des mesures en puits comme l'imagerie de puits, les diagraphies de vitesse (SONIC), ainsi que des tests de contraintes entre packers font partie également des mesures indispensables pour caractériser la nature des failles et leur potentiel en termes de productivité.

3.3.2 Contexte tectonique de la ZONE B, Saignelégier – Franches-Montagnes.

La ZONE B inclut les Franches Montagnes et le Clos du Doubs et présente principalement à l'affleurement des dépôts calcaires Jurassiques du Malm et du Dogger. Elle est affectée par des plis et chevauchements d'orientation OSO-ENE (Anticlinaux de Sommètres, Saignelégier, Fuesse, Epiquerez...) et par l'ouverture du Fossé Rhéan avec des failles d'orientation SSO-NNE (faille de Gipou-Soubey, faille de la Ferrière).

Les effets de compressions ont créé de nombreux systèmes de thrust/back-thrust avec une géométrie complexe. Ces failles chevauchantes affectent la totalité de la séquence Mésozoïque et s'entérinent en profondeur sur un niveau de décollement profond, le Muschelkalk (Rime et al. 2019). La présence de graben Permo-Carbonifères n'est confirmée par aucune donnée dans la région, seule une prospection géophysique peut montrer l'existence de ces structures.

La ville de Saignelégier est située sur des dépôts Jurassique très affectés par un système de failles chevauchantes (Figure 9).

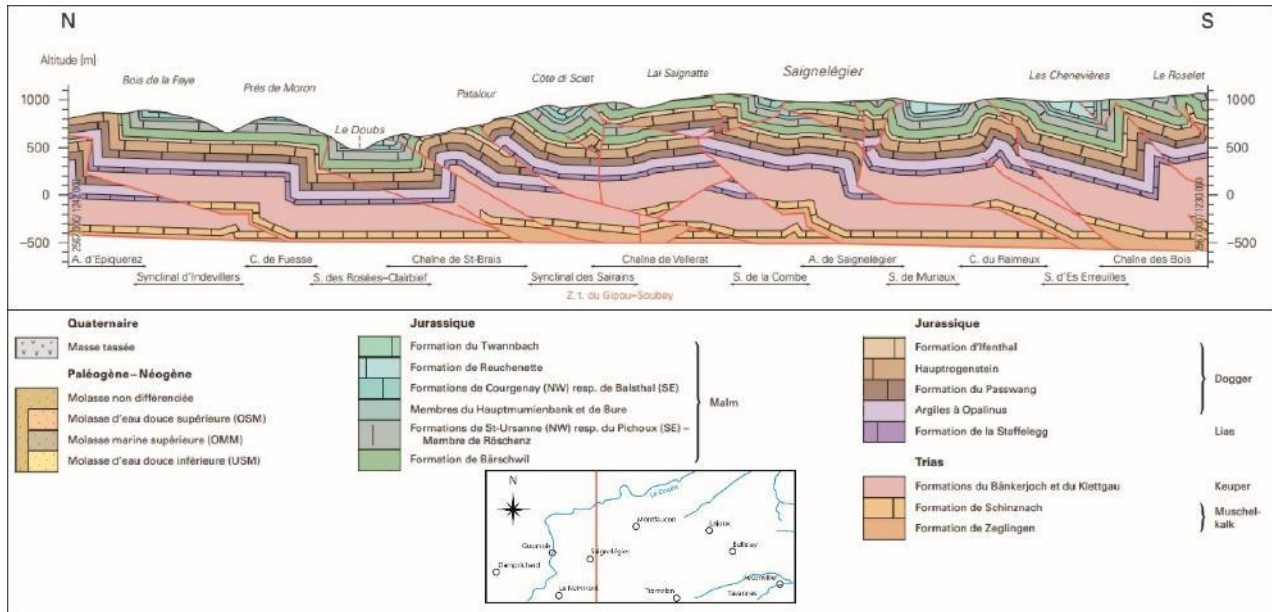


Figure 9 - Coupe Nord-Sud secteur Saignelégier - Source: Office fédéral de la topographie swisstopo Atlas Géologique de la Suisse.

Peu de sédiments Oligocène sont présents dans les dépressions entre les anticlinaux avec une épaisseur très limitée.

Ainsi, les réservoirs du Jurassique sont à relativement faible profondeur en général, cependant, la présence de duplex tectoniques et de failles chevauchantes peut permettre la présence de ces roches à des profondeurs plus importantes, ce qui formerait des cibles réservoirs pour de la géothermie hydrothermale. Une acquisition sismique est néanmoins nécessaire pour comprendre et localiser précisément ces duplex et leur extension verticale. Les profils géologiques comme celui indiqué dans la Figure 9 ont été construits sur la base d'équilibrages stratigraphiques, mais ne sont pas contraints par une imagerie 2D ou 3D.

3.3.3 Contexte tectonique de la ZONE C, Porrentruy – Plaines d'Ajoie.

La ZONE C se situe dans un contexte tectonique singulièrement différent des deux autres. En effet, au Nord du Mont Terri la déformation chevauchante est limitée. Ainsi, on trouve un anticlinal de faible pendage (Anticlinal du Banné) au Nord de celui du Mont Terri puis, plus au Nord, les Plaines d'Ajoie sont caractérisées par des dépôts subhorizontaux du Mésozoïque (Malm, Dogger, Muschelkalk) entre le Jura plissé au sud et le fossé rhénan au nord. Il s'agit du Jura Tabulaire (Figure 10 et Figure 11), composé donc principalement en son sommet de calcaires karstifiés du Malm (Jurassique supérieur). Quelques failles décrochantes d'orientation Nord-Sud senestres impactent cette série (Nussbaum et al. 2011). Ce contexte tectonique caractérise les unités réservoirs cibles comme un système captif où des principes de circulations profondes

peuvent toutefois exister comme l'a prouvé le forage de Courtemaîche N3 Basse Fin (voir Boem et al. 2006). Un gradient géothermique anormalement haut a montré l'existence de circulations hydrothermales profondes permettant d'avoir des eaux chaudes à une profondeur inférieure à 400m. Des circulations peu profondes et froides dans les interfaces karstiques proches de la surface sont également attendues et connues (sources et résurgences). Ces circulations présentent un intérêt pour les problématiques d'approvisionnement en eau.

De manière générale, la profondeur des roches réservoirs Jurassiques (Malm et Dogger) et Triasiques (Muschelkalk) est donc limitée au sein du secteur Porrentruy, mais fonction du gradient géothermique ces cibles pourraient représenter une ressource hydrothermale non négligeable.

Il est à noter que la région est peut-être affectée par des failles décrochantes d'orientations Nord-Sud, associées au Fossé Rhénan (Figure 7). Ceci reste incertain.

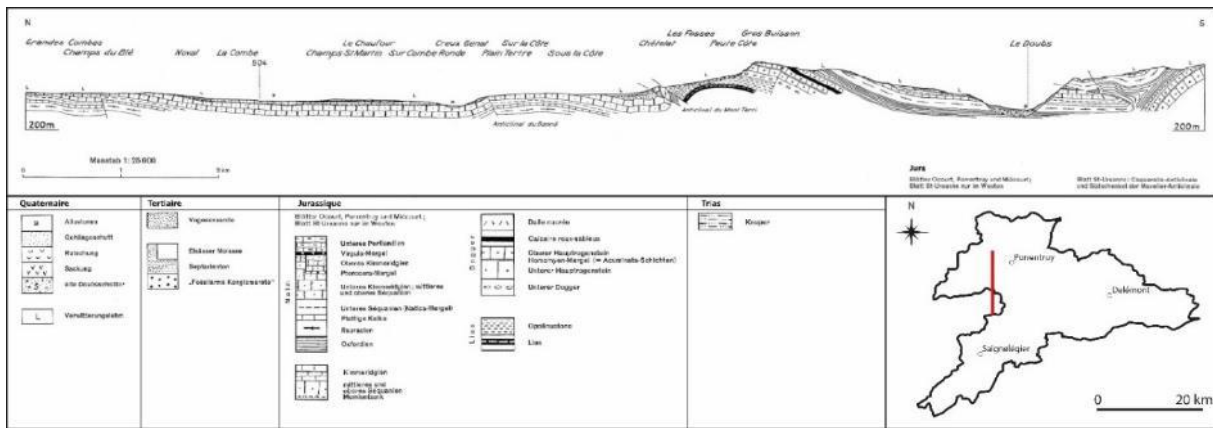


Figure 10 - Coupe géologique orientée Nord-Sud de faible profondeur dans la Zone C de Porrentruy. (source : data.geo.admin.ch).

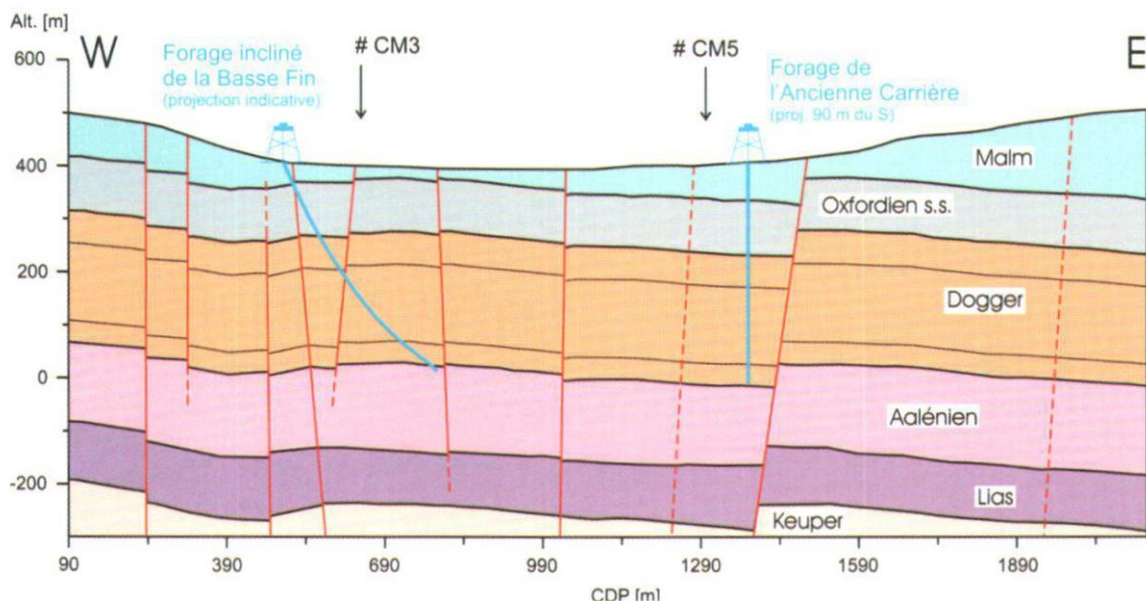


Figure 11 : Coupe géologique interprétée (profil CM4) avec projection des forages de Courtemaîche « Bassin Fin » et « Ancienne Carrière » (Boem et al. 2006).

3.3.4 Aléas sismiques (état des lieux)

L'activité sismique en Suisse est surveillée par le Service Sismologique Suisse (SED). Les stations de mesures du SED sont réparties dans tout le pays, formant un réseau sismique de surveillance. Deux types de stations de mesures sont distingués :

- *Sismomètres à large bande et sismomètres à courte période* : stations ultrasensibles qui enregistrent même les plus faibles mouvements du sol.
- *Accéléromètres* : stations de mesures capables de mesurer des secousses modérées à fortes.

Dans le canton du Jura, on trouve 6 stations sismiques réparties de manière très hétérogènes. En effet, 5 stations sont présentes au centre du Canton (région Haute Sorne) et une dans la Zone B (les Sairains Dessus). Par ailleurs, une station a été récemment installée à Moutier (Canton de Berne) au Sud du Canton du Jura dans le cadre du projet GEOBEST20+.

Cette situation mène aux commentaires suivants pour la compréhension des séismes au droit du Canton :

- L'activité sismique régionale et l'existence de failles sismiquement actives sont mal connues.
- Historiquement, la position des hypocentres (point de départ de la rupture sismique en profondeur) est mal contrainte.

Dans le cadre d'un futur projet de géothermie de moyenne profondeur, il sera important de continuer à améliorer les connaissances sur la sismicité naturelle avant le début d'un forage. Continuer le travail d'installation de stations de mesures complémentaires, type sismomètres à large bande, semble donc indispensable. Ces installations complémentaires devraient pouvoir faire l'objet d'une considération du projet fédéral GEOBEST20+, soutenu financièrement par l'OFEN qui prend en charge les frais d'installation, de traitement et de maintenance.

GEOBEST20+ est piloté par le SED et permet d'offrir aux cantons une haute surveillance de la sismicité dans le cadre de projets géothermiques.

A ce jour, il peut être statué que l'activité sismique naturelle est la plus élevée dans le centre du canton (entre Glovelier et Porrentruy). Cependant, l'aléa sismique reste faible dans le canton Figure 12 et Figure 13 (pas de séisme de magnitude supérieure à 4.5 documenté).

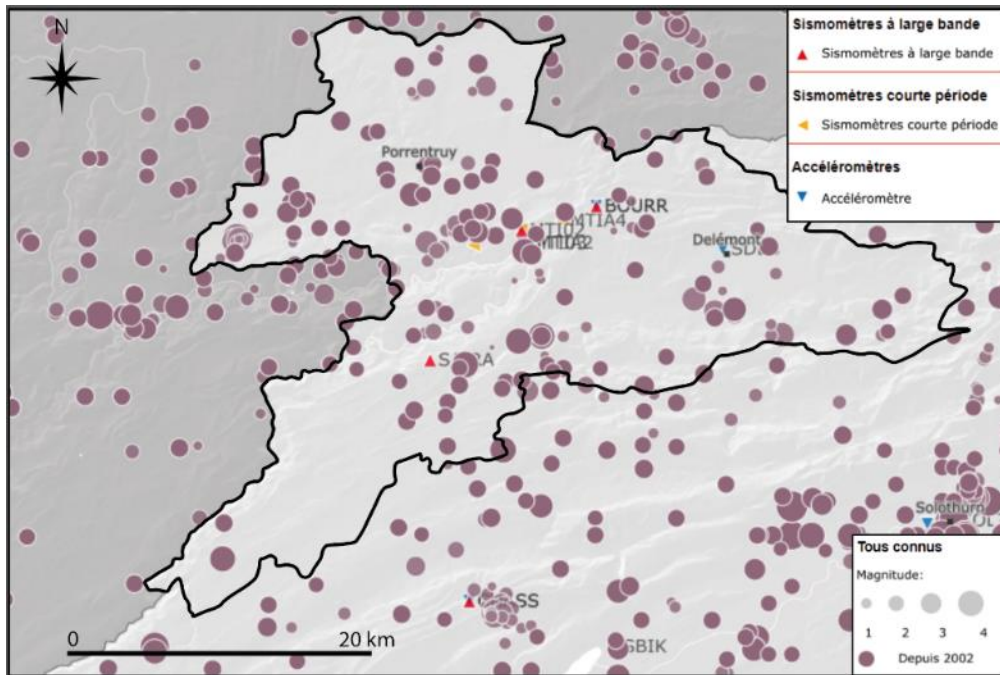


Figure 12 : Carte montrant les stations de mesures du Service Sismologique Suisse (SED) ainsi que les séismes enregistrés et historiques dans le périmètre de prospection préliminaire du Canton du Jura.

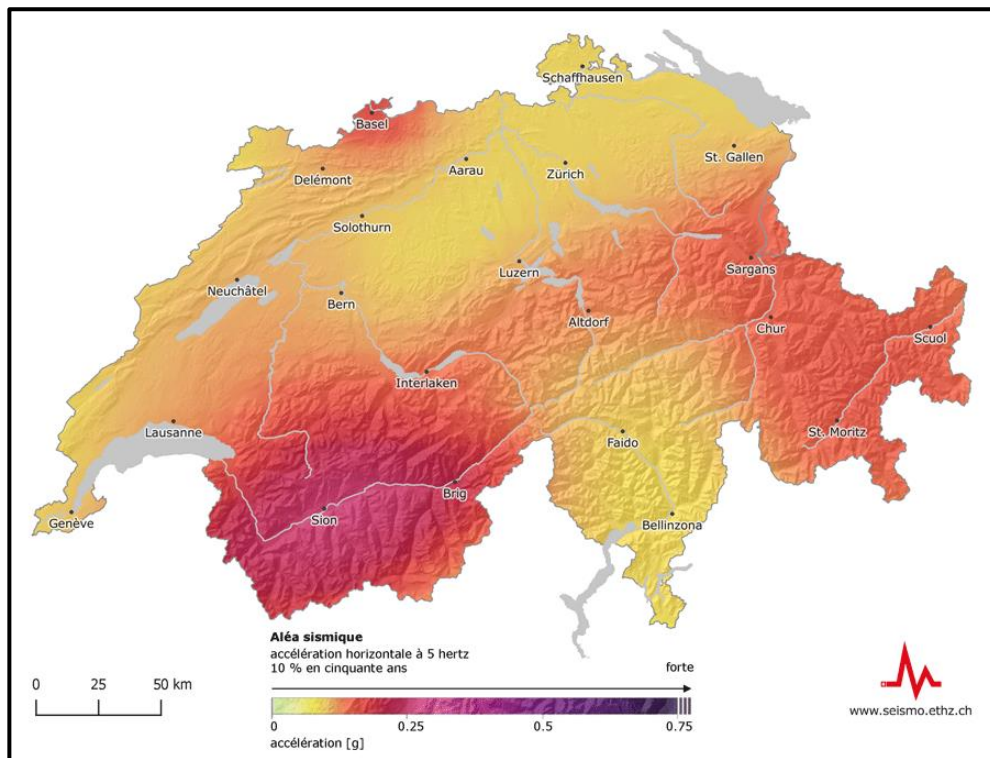


Figure 13: Carte de l'Aléa sismique en Suisse. Le canton du Jura est situé dans une région à faible risque sismique.

4 Synthèse des Ressources géothermales cibles

Une ressource géothermale correspond à un aquifère géothermique profond localisé dans une unité de roche réservoir suffisamment poreuse et perméable pour permettre la présence et l'écoulement d'une nappe souterraine. La présence de failles au droit des unités réservoirs est avantageuse pour assurer le caractère perméable de ces derniers et permettre la création d'un système d'exploitation géothermique viable. Les zones de dommages aux abords des failles peuvent être visées par les forages exploratoires (voir Figure 14). La porosité et la perméabilité des réservoirs peut également être assurée par des phénomènes de diagénèse (porosité secondaire) permettant l'exploitation d'un réservoir.

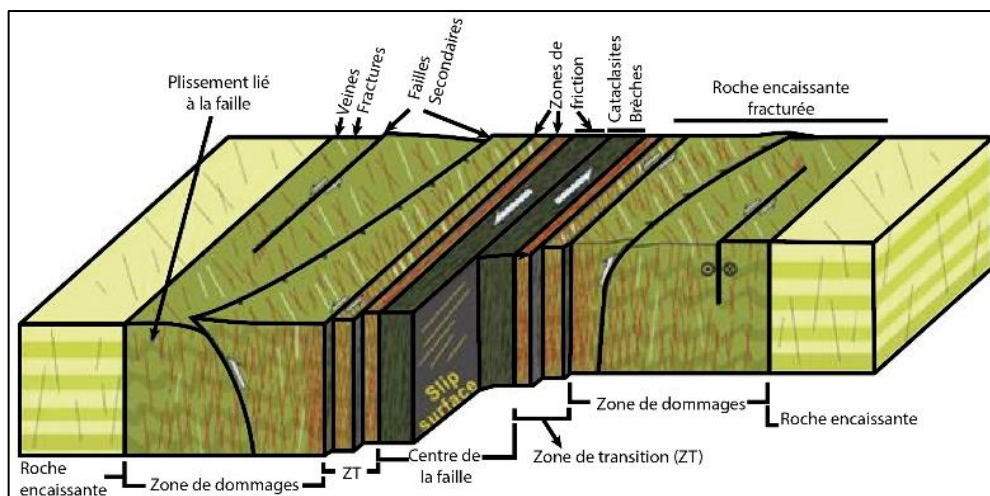


Figure 14 - Schéma détaillant la zone de dégâts associée à une faille décrochante (Choi et al., 2016).

Les informations géologiques résumées dans les chapitres précédents, ainsi que les résultats des études de 2012 et 2021 sur le potentiel géothermique du Canton, permettent de pointer à l'échelle du Canton du Jura cinq unités géologiques réservoirs pouvant abriter une ressource géothermale (aquifère profond) à prospector et à exploiter :

- 1) Les calcaires fracturés du **Malm** (Malm supérieur principalement : Oxfordien moyen-Kimméridgien)
- 2) Les calcaires fracturés du **Dogger** (Bajocien-Callovien)
- 3) Les calcaires dolomitiques fracturés du **Muschelkalk** (Trias)
- 4) La série détritique du **Buntsandstein** du Trias inférieur et du **Permo-Carbonifère**
- 5) **Le sommet du socle altéré et fracturé.**

Le contexte tectonique du Canton (Jura plissé et Jura tabulaire) fait que l'aquifère du Muschelkalk représente la ressource géothermale principale qui devrait être prospectée en premier lieu pour des questions de profondeur et de chaleur attendue. Les retours d'expérience des forages de Riehen-1 et -2 à Bâle sont aussi positifs (forages géothermiques exploitant le Muschelkalk depuis 1994).

Cet aquifère du Muschelkalk, ainsi que le Buntsandstein, le Permo-Carbonifère et le sommet du socle fracturé, possèdent toutefois une incertitude plus marquée concernant leur recharge hydraulique au droit du Canton du fait d'absence de lien direct entre la roche réservoir et les infiltrations à l'affleurement en surface. Ceci n'est pas le cas pour les aquifères du Malm et du Dogger. Dans le cas des réservoirs profonds

(Muschelkalk, Bunstandstein et socle altéré), il faut considérer un système hydrothermal ancien contenu dans les niveaux fracturés. Dans un contexte de perméabilité suffisante au sein de ces réservoirs (zone de faille) et avec une saturation en eau avérée, la mise en place d'un doublet géothermique à ces niveaux reste valable. Une étude dédiée sur l'histoire thermique et l'enfouissement de ces roches réservoirs profondes pourrait être menée afin d'améliorer la caractérisation de ces unités.

La ressource hydrothermale potentielle qui est associée aux **grès profonds du Trias (Buntsandstein) et du Permo-Carbonifère**, à l'interface socle et couverture sédimentaire Mésozoïque - préférentiellement au droit de graben permo-carbonifère ou demi-graben, est très incertaine. Cette ressource est mal cartographiée et délimitée à ce jour à cause du manque de données profondes (géophysiques et forages). De plus, il existe un risque de présence de gaz sous-pression associé à ces niveaux réservoirs triasique et permo-carbonifère du fait de la présence de roches mères dans le Permien et le Carbonifère (Do Couto et al., 2021). Des mesures existent cependant au cours de foration pour palier à ce risque associé au gaz sous pression (forage sous Blow-out Preventer, utilisation d'un programme boue adapté).

Dans ce contexte, le Muschelkalk reste la cible géologique principale pour le Canton du Jura pour des raisons de température et de perméabilité attendue. La Figure 15 repositionne ces niveaux aquifères dans la série stratigraphique du Canton.

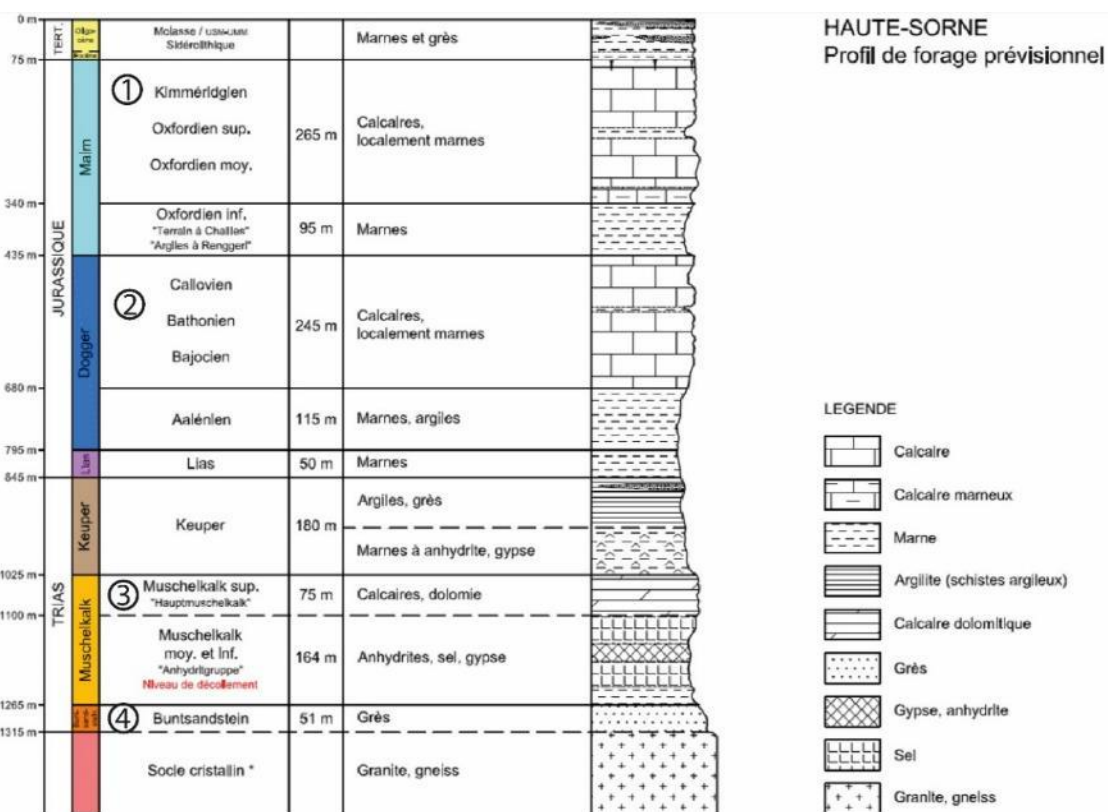


Figure 15 : Profil synthétique de la région Haute-Sorne. Les numéros indiquent les différents aquifères. Pour la légende des numéros voir Figure 16 (Source : Rapport de projet pilote de géothermie profonde en Haute Sorne - 2014).

Les **concepts** hydrodynamiques du fonctionnement des aquifères du Malm, Dogger et Muschelkalk doivent être encore investigués de manière précise, mais les généralités suivantes peuvent être résumées (voir Figure 15) :

1. Infiltration des eaux de pluie dans les roches carbonatées du Malm et Dogger affleurantes dans la région du Jura plissé.
2. Infiltration et écoulement des eaux météoriques à travers des systèmes karstiques en surface et en profondeur en partie en direction des vallées (synclinaux).
3. Infiltration et écoulement le long des zones de failles décrochantes potentiellement perméables et formant des couloirs d'écoulement préférentiels en direction des dépressions (synclinaux, bassins).

Ce principe d'infiltration est particulièrement attendu pour la ZONE A dans le secteur de Delémont où des systèmes de failles décrochantes NNE-SSO sont observés et pourraient alimenter les réservoirs profonds situés dans le synclinal/vallée de Delémont.

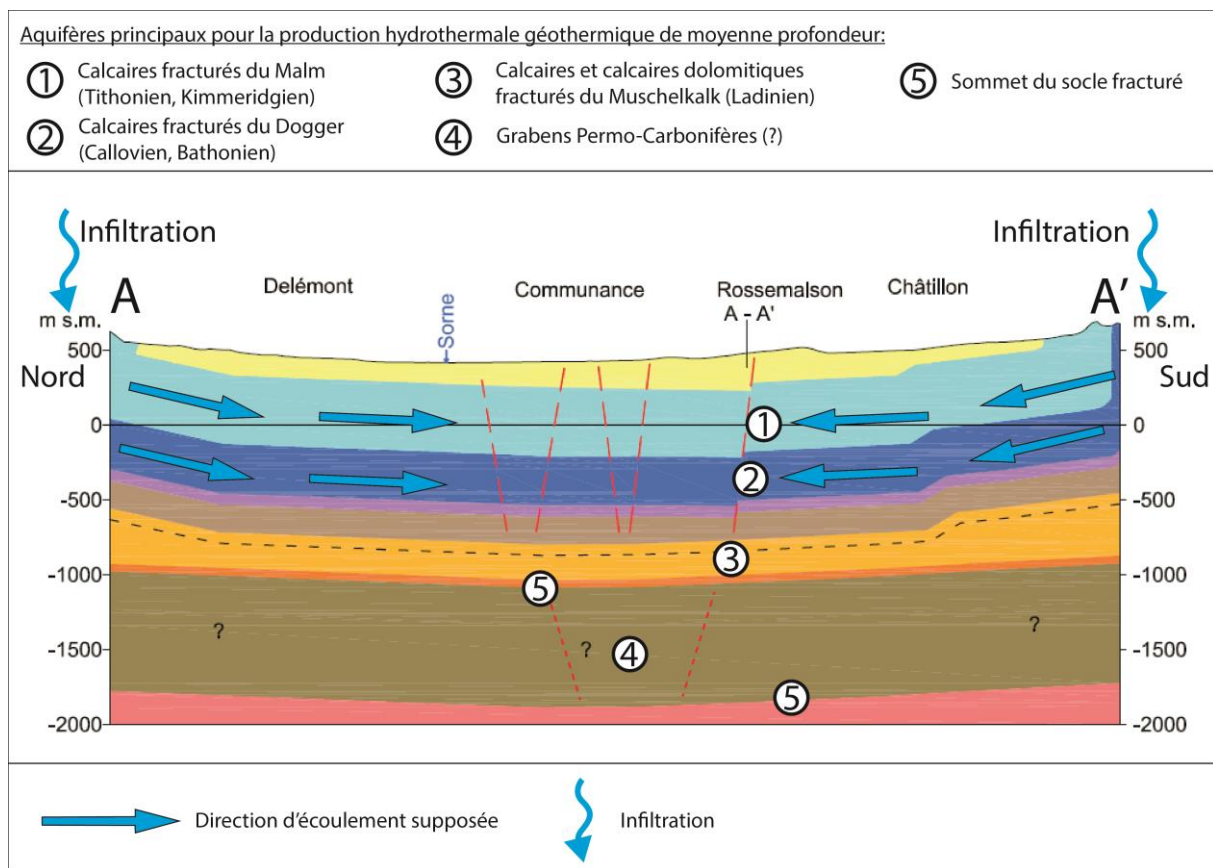


Figure 16 - Coupe géologique montrant les aquifères géothermiques principaux ainsi que les écoulements supposés, exemple de la vallée de Delémont. (modifiée d'après le rapport technique projet pilote de géothermie profonde Haute-Sorne – 2014).

En termes de températures et de manière régionale dans la zone prospectée, un gradient géothermique conservateur variant entre 30°C à 35°C/km est attendu pour les ressources géothermiques.

Le flux de chaleur géothermale est inégalement réparti dans le canton (voir Figure 17). La partie Nord de la ZONE B de Saignelégier semble être caractérisée par un flux de chaleur limité (<60mW/m²). En revanche, la ZONE C présente un flux plus important (environ 100mW/m²) que les deux autres secteurs (50-80mW/m²). Cette observation est confirmée par les résultats du forage de Bassin Fin à Courtemaîche (voir Boem et al. 2006 ; Figure 18) où une température anormalement haute a été mesurée pour une profondeur de 400m (mTVD). Cette anomalie positive est rattachée au gradient géothermique élevée du fossé rhénan.

Peu de données sont néanmoins disponibles dans l'ensemble dans le canton pour évaluer le gradient géothermique de manière fiable. En effet, les deux forages de Muriaux par exemple, présentent des valeurs difficilement interprétables (Hessenauer et al. 2001).

Dans le bassin molassique Suisse le gradient géothermique varie également entre 30 et 40°C par kilomètre. La Figure 19 décrit les profils de température du Canton de Vaud à titre d'exemple.

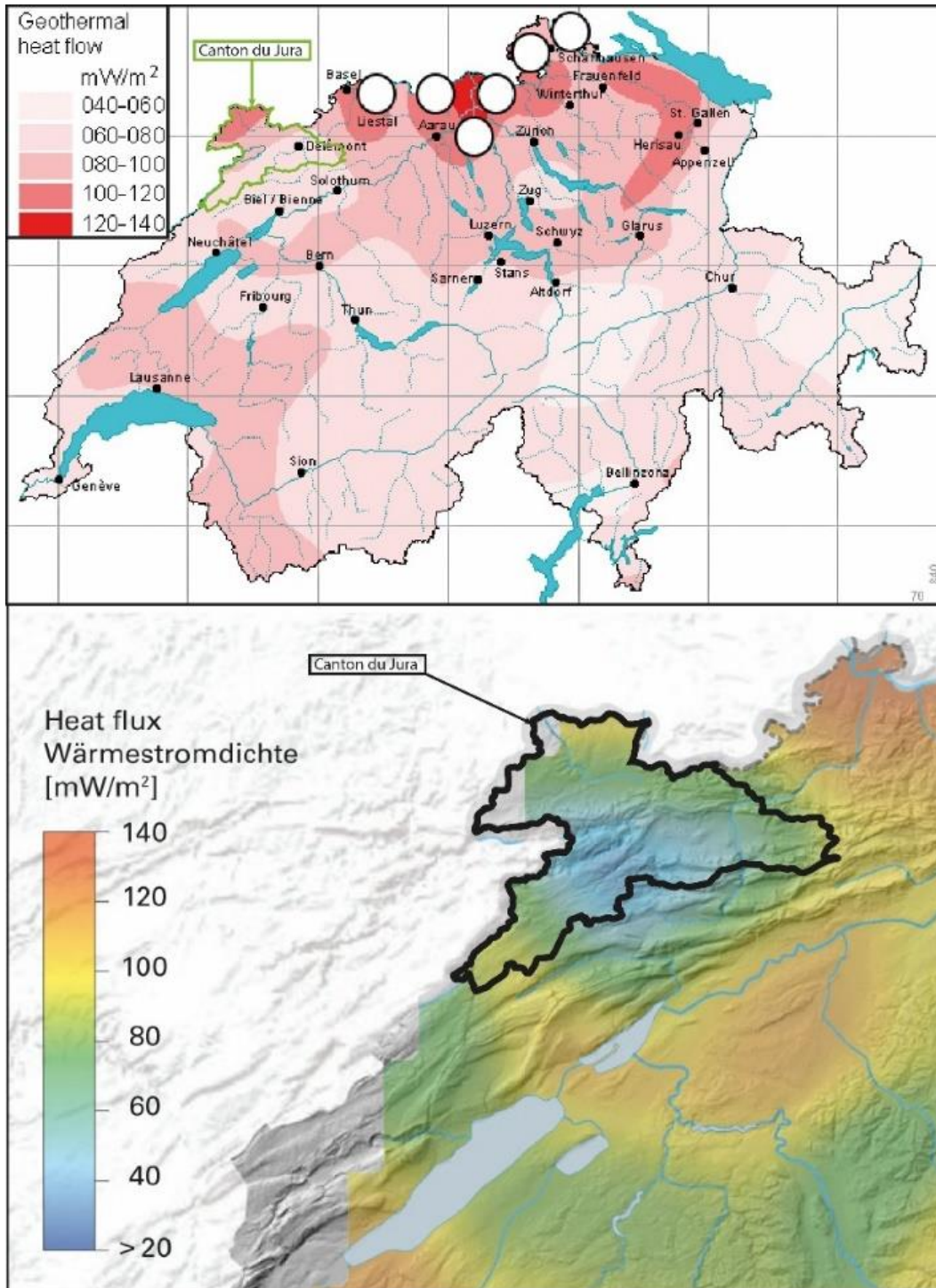


Figure 17 : Gradient géothermique du Canton du Jura provenant de deux études basées sur les données de puits profonds (jusque 2km de profondeur) existants en Suisse. (Sources : Carte du haut : Vitaller et al. (2019). En bas : <https://georessourcen.ethz.ch/en/heat-flow-map-swiss-molasse-basin/>.)

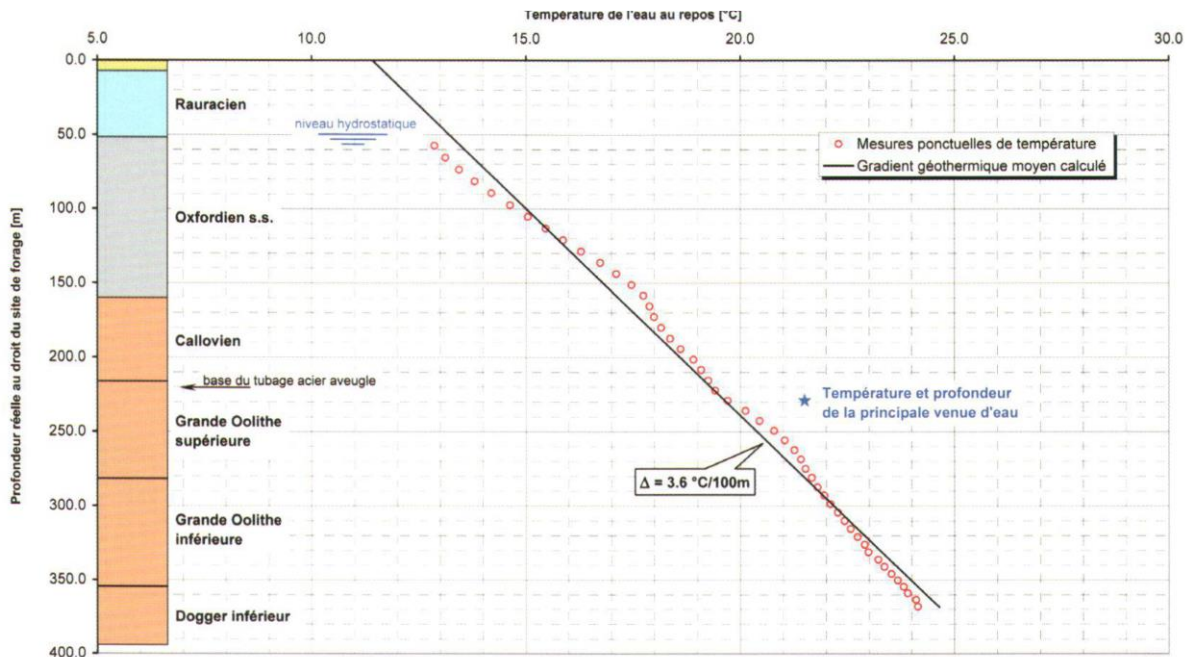


Figure 18 : Gradient géothermique mesuré dans le puits de Bassin Fin à Courtemaître (source : Boem et al. 2006)

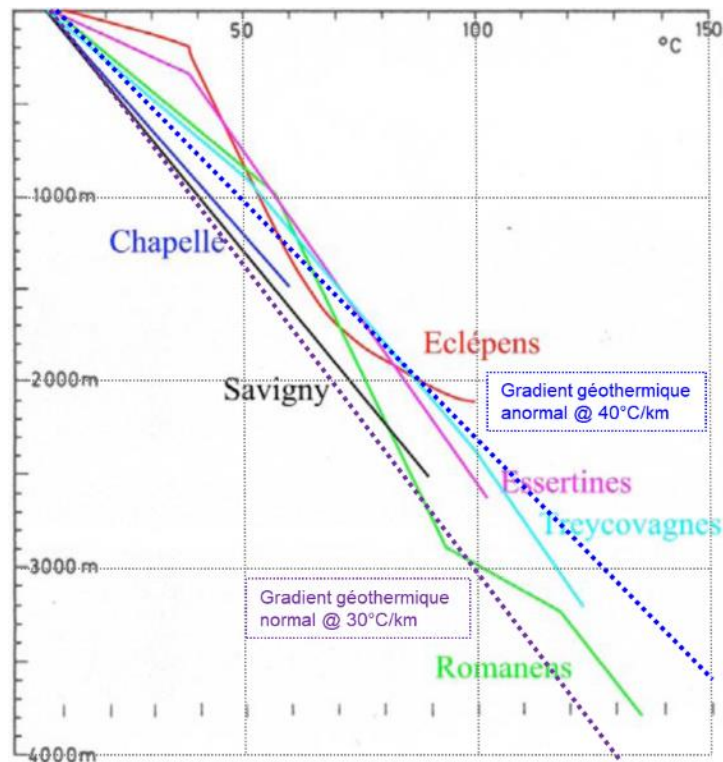


Figure 19 : Synthèse des profils de température issus des forages pétroliers du Canton de Vaud et régions limitrophes (modifié de Vollmayr, 1983).

Les ressources géothermales pour les trois ZONE A, B et C sont reprises et détaillées ci-dessous

4.1 ZONE A : Vallée de Delémont

Dans le cas de la vallée de Delémont, des écoulements préférentiels depuis l'Anticlinal du Vorbourg au Nord et les anticlinaux de Vellerat et Tiergarten au Sud ont été décrits, notamment pour les calcaires du Malm (Flury et al. 1983) le long de réseaux karstiques.

Ainsi, le sous-sol du bassin de Delémont (synclinal) est composé des trois formations aquifères calcaires citées préalablement (Malm, Dogger et Muschelkalk). Ces dernières sont séparées par des bancs marneux imperméables. Un niveau évaporitique (anhydrite) est également situé au-dessus du Muschelkalk (Flury et al. 1991).

- **Les calcaires aquifères du Malm supérieur** et moyen présentent une épaisseur totale de 250m. Les températures et conductivités de ces aquifères sont détaillées dans le tableau ci-dessous (Flury et al. 1991). Elles sont basées sur les venues d'eau de trois forages dans le bassin :

Forage et Profondeur (m – MD)	Formation	Température [°C]	Conductivité à 20°C [uScm-1]
S1 / 208-225	Séquanien (Malm)	16.8 – 17.8	350-370
S1 / 231	Séquanien (Malm)	21.1	350
S1 / 262	Séquanien (Malm)	21.3	350
S1 / 311	Rauracien (Malm)	22.0	360
S1 / 348-352	Rauracien (Malm)	22.3	365
S2 / 246	Séquanien (Malm)	21.0	380
S2 / 380	Rauracien (Malm)	23.2	360
S3 / 268-275	Séquanien (Malm)	22.3	365
S3 / 388-400	Rauracien (Malm)	22.6	370

Tableau 3 - Caractéristiques des venues d'eau dans les aquifères du Malm basées sur différents forages.

Les paramètres hydrauliques généraux du Malm sont décrits dans le tableau ci-dessous (Flury et al. 1991) :

Transmissivité $T = K \cdot D$ [m ² /s]	0.5 à 1×10^{-4}
Epaisseur D [m]	255
Perméabilité K [m/s]	2 à 4×10^{-7}
Coefficient d'emmagasinement S	0.7 à $3,1 \times 10^{-4}$

Ainsi, les aquifères du Malm présentent un débit important mais une température limitée (environ 20°) dans le bassin. Une géothermie de type basse enthalpie peut être envisagée dans le Malm pour son ensemble (les puits présentés par Flury et al. 1991 ne couvrent que la partie supérieure).

- **L'aquifère du Dogger** est situé à une profondeur de 650 à 750 m approximativement dans le centre du bassin de Delémont. En utilisant un gradient de 32°C/km (conservateur) on peut estimer une température avoisinant les 30 à 34°C. Ces aquifères ont montré des propriétés réservoirs intéressantes dans le bassin

molassique Suisse et peuvent permettre également une exploitation géothermique de basse enthalpie.

- **L'aquifère du Muschelkalk**, quant à lui est estimé à une profondeur de 1200 à 1500m, avec une température de 48-58°C/km (gradient conservateur de 32°C/km). Ce dernier pourrait cependant présenter une température plus importante comme dans le cas du forage de Riehen où la ressource extraite du même réservoir présente une température de 65°C pour une profondeur de 1547m (et un débit de 1200l/min). Il existe cependant peu d'informations sur ce gradient pour expliquer le phénomène. La présence de roches évaporitiques proches, la proximité du socle et le contexte du graben du Rhin pourraient en être la raison.

4.2 ZONE B : Franches-Montagnes

Peu de données sont disponibles dans le secteur des Franches-Montagne, de plus la complexité géologique ne permet pas de dresser un modèle hydrodynamique conceptuel sans étude préalable.

Les aquifères du Malm, Dogger et Muschelkalk présentent des profondeurs très hétérogènes du fait de la complexité structurale de cette zone que ce soit dans une direction Nord-Sud ou Est-Ouest.

A titre d'exemple, sous la ville de Saignelégier, les formations du Malm se trouvent entre 0 et 150m de profondeur mais également entre 250 à 400m de profondeur (basé sur la Figure 9) en raison de failles inverses. De la même manière, cette duplication affecte les réservoirs du Dogger.

Le Trias est également affecté par la compression permettant aux toits des formations du Muschelkalk supérieur d'atteindre les 750m et jusqu'à 1300m de profondeur sous Saignelégier. La présence de duplex (dédoublément de la série stratigraphique) pourrait permettre de retrouver ce réservoir du Muschelkalk à une profondeur proche de 1'500 m avec des températures aux alentours des 55 à 60°C dans le reste de la Zone B.

Une prospection géophysique et l'interprétation des données pourraient confirmer de manière précise la présence de ces duplexes profonds ainsi que des grabens Permo-Carbonifères.

4.3 ZONE C : Porrentruy

Dans cette zone, les roches réservoirs hôtes pour un aquifère sont également les calcaires du Dogger et du Muschelkalk. D'un point de vue stratigraphique, seul le réservoir du Muschelkalk offrirait une profondeur intéressante dans ce secteur pour viser des objectifs chaleurs. Ceci dépend toutefois du gradient géothermique, qui peut s'avérer élevé dans cette zone.

Des écoulements préférentiels peuvent être estimés au Sud depuis l'anticlinal du Mont Terri et sa prolongation Est-Ouest. Depuis le Nord, et la zone de Grand Combe (Figure 10), un léger pendage du Jura Tabulaire vers le Sud a été identifié laissant présager des écoulements vers Porrentruy. Malgré cela, une analyse hydrogéologique précise semble être nécessaire pour évaluer les écoulements préférentiels dans toutes les directions ainsi que les principes de recharge des aquifères de cette zone C. Selon Boem et al., les écoulements naturels et les vitesses de circulation des eaux souterraines dans le Dogger sont faibles dans secteur de Courtemaîche. Il serait important tout d'abord de caractériser les systèmes d'écoulement peu profonds caractérisant les niveaux karstiques de la proche surface. Toutes anomalies thermiques qui seraient enregistrées au droit de sources karstiques pourraient indiquer un phénomène de circulation hydrothermale plus profond.

Les résultats des forages de Courtemaîche (voir Boem et al. 2006) ont confirmé la présence d'eaux souterraines dans les unités du Dogger, mais avec débits relativement faibles du fait de la faible fracturation

de ces derniers. Aucune porosité et perméabilité matricielle n'a été mesurée. Dans des secteurs ayant subis une diagénèse marquée, des propriétés matricielles ne peuvent toutefois pas être exclues pour ce réservoir. Les eaux du Dogger analysées dans les forages de Courtemaîche ont montré une forte minéralisation (eaux saumâtres), d'origine profonde et probablement associées au Trias.

Des mesures dans le forage de Buix en 1921 ont permis de calculer un gradient élevé de 40°C/km dans le Mésozoïque. Bien qu'encourageantes, ces données doivent être traitées avec précaution du fait de leur année d'acquisition. Cependant, elles sont similaires à celles du puits de Basel-1 pour le Tertiaire et le Mésozoïque (40°C/km entre 0 et 1650m de profondeur).

Le réservoir du Muschelkalk, pourrait ainsi présenter une cible potentielle et intéressante pour une géothermie de moyenne profondeur dans cette zone. L'incertitude réside dans le degré de fracturation de cette unité et la confirmation d'une charge hydraulique suffisante (saturation du massif calcaire du Muschelkalk), afin d'obtenir une circulation d'eaux souterraines profondes exploitables par un système de doublet

La présence de fossés Permo-Carbonifères peut également prouver un potentiel intéressant. Une étude géophysique dédiée est nécessaire pour déterminer leur existence et répartition au sein du secteur. Abdelfettah et al. (2014), en s'appuyant sur des données gravimétriques, montre un prolongement du 'North Swiss through' vers l'Ouest en direction de Porrentruy. Moins profond que dans les cantons de Bâle ou d'Argovie, ce dernier peut tout de même atteindre 1 à 3 kilomètres d'épaisseur (Abdelfettah et al. 2014). Comme indiqué précédemment (Chap. 4), il existe un risque marqué de présence de gaz dans ces niveaux et ses propriétés réservoirs restent à confirmer.

5 Potentiel géothermique hydrothermal du Canton du Jura : zones préférentielles

Basé sur les éléments présentés précédemment, il est possible de définir des secteurs préférentiels pour le développement de la géothermie hydrothermale dans le Canton du Jura.

Cela peut être réalisé en prenant en compte le contexte géologique mais aussi le contexte de surface dont notamment la densité de population, marqueur des besoins énergétiques (chaleur). En effet, la géothermie de moyenne profondeur pour la production de chaleur nécessite une distribution locale via des réseaux de chaleur à distance (CAD). Dans ce contexte de surface, les villes de Delémont et Porrentruy sont de bons candidats car elles présentent une densité importante de population et de nombreuses infrastructures qui peuvent bénéficier d'apport de chaleur par des réseaux CAD.

D'un point de vue géologique, plusieurs éléments doivent être pris en compte pour une évaluation et un classement de zones préférentielles :

- La profondeur des réservoirs : les différents réservoirs identifiés du Jurassique (Malm & Dogger) et du Trias (Muschelkalk) présentent des profondeurs variables au sein du Canton :
 - La vallée de Delémont (Zone A) présente les profondeurs les plus importantes pour ces formations (avec une série continue) et qui conviendrait à la production géothermique de moyenne profondeur.
 - La possibilité de duplex permettant des profondeurs plus importantes pour ces formations réservoirs dans la région de Saignelégier (Zone B) rend cette zone attractive, mais nécessite des investigations géophysiques poussées pour confirmer leur présence et géométrie.
 - Pour le secteur de Porrentruy (Zone C), les gammes de profondeurs pour le Muschelkalk sont comprises entre 750 et 1000m. Les aquifères du Malm et du Dogger restent trop peu profond pour envisager une géothermie de moyenne profondeur. Il est cependant possible d'investiguer des cibles plus anciennes et plus profondes pour atteindre des températures suffisantes (base Trias/Buntsandstein, Permo-Carbonifère si présent et sommet du socle fracturé (non sédimentaire)), mais ces dernières présentent des risques géologiques plus élevés.
- La présence de failles décrochantes (sur la base d'analyses détaillées comme mentionné dans le chapitre 3.3.2) : les réservoirs cibles pour la géothermie hydrothermale correspondent tous à des intervalles calcaires fracturés. En effet, aucune porosité et perméabilité matricielle suffisantes n'est connue dans les unités du Malm, Dogger et Muschelkalk pour créer un aquifère exploitable par la géothermie.

Afin d'obtenir une porosité et perméabilité suffisantes, il faut des fractures naturellement en place. Ainsi, les failles décrochantes sont un milieu préférentiellement ciblé, elles créent des zones de dégâts (Figure 14). Ce type de failles est présent dans le Canton du Jura et **plus particulièrement dans les zones A (Delémont) et C (Ajoie)**.

Bien que des évidences nettes existent en surface, l'analyse de sismique réflexion 2D et/ou 3D permettra de confirmer ces structures tectoniques ainsi que les zones de dégâts associées. Un focus devrait être donné à Delémont et sa région, situé au pied d'un axe anticlinal où des failles décrochantes pourraient être identifiées à l'affleurement et sur LIDAR (travail à réaliser dans une phase de prospection par un porteur de projet).

- La présence de failles chevauchantes : Bien que les zones de dégâts et le type de cisaillement associé à une faille chevauchante sont moins favorables que dans le cas d'une faille décrochante, il est possible, par le biais de forages déviés, d'exploiter ces dernières pour un contexte géothermique. Les secteurs A et B présentent ce type de failles dans les formations réservoirs cibles (Malm, Dogger et Muschelkalk).
- Hydrogéologie et recharge : Des systèmes d'écoulements profonds régionaux peuvent être estimés à travers le Canton du Jura.
 - La vallée de Delémont bénéficie d'une recharge théorique idéale depuis les anticlinaux Nord et Sud la délimitant. Les concepts d'écoulements sont analogues aux systèmes d'écoulements observés le long de la Haute-Chaîne du Jura entre Genève et Yverdon-les-Bains (Rapport final – Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud – Juillet 2003).
 - Le secteur de Saignelégier est complexe et nécessiterait une modélisation appropriée afin de comprendre les systèmes de recharges le long de plans de chevauchements principaux. Une recharge des unités réservoirs du Trias reste à ce stade incertaine.
 - Le secteur de Porrentruy est caractérisé par le gradient géothermique le plus intéressant du Canton et des dépôts Mésozoïques tabulaires dont les écoulements nécessitent également une évaluation dédiée pour comprendre leurs directions. Cependant, le caractère tabulaire de cette zone n'implique pas l'absence d'écoulement et des écoulements en milieu captif (limité par deux formations imperméables) sont envisageables. Les forages de Courtemaîche ont prouvé la présence d'un aquifère karstique captif dans le Dogger, caractérisé par des eaux saumâtres d'origine profonde et avec un débit faible (après 20 jours de pompage et deux phases d'acidification, régime d'équilibre atteint avec un débit de 475 l/min pour un abaissement du niveau d'eau de 140 m). Cet aquifère Dogger capté est karstique et est isolé de la surface par des formations géologiques aquicludes, dont en particulier les marnes de l'Oxfordien. L'étendue de l'aquifère est importante (plurikilométrique) et la ressource hydrogéologique, en termes de volume, est conséquente comme l'a résumé Boem et al. 2006. Concernant le Muschelkalk, il peut être statué qu'une ressource existe, d'où viendraient les eaux du Dogger testées sur Courtemaîche. Cette observation peut motiver à une phase de prospection plus approfondie sur le Trias, malgré les résultats négatifs du projet de Courtemaîche sur le Dogger.

Il est à noter qu'un système de recharge actif n'est pas une condition sine qua non pour la géothermie hydrothermale. Un réservoir saturé ancien présentant de bonnes propriétés réservoir (perméabilité) peut également être exploité à l'aide d'un doublet géothermique sans recharge active.

- Complexité géologique : Une importante complexité tectonique et des incertitudes sur les dépôts en profondeur nécessitent obligatoirement des études plus poussées pour tenter une modélisation géologique.
 - Le secteur de Porrentruy et la vallée de Delémont présentent un contexte relativement simple même si l'acquisition de données géophysiques reste indispensable.
 - Le sous-sol du secteur de Saignelégier est affecté par une importante déformation tectonique et l'interprétation actuelle est soumise à de nombreuses incertitudes quant à la profondeur des formations et la présence et position de failles.

En croisant ces éléments géologiques avec les informations sur la densité de la population et les besoins d'énergie (chaleur) en surface, **il est possible de confirmer rapidement que la ZONE A de Delémont représente la zone préférentielle pour initier une première campagne de prospection de ressources géothermiques pour des besoins de chaleur.**

La ZONE C de Porrentruy montre également un potentiel possible via des systèmes hydrothermaux profonds rattachés au Trias. Les résultats des forages de Courtemaîche (voir Boem et al. 2006) ne doivent pas fermer la porte à de la prospection profonde ciblée sur le Muschelkalk.

Le Tableau 4 résume ce croisement.

Critères	ZONE A Delémont	ZONE B Saignelégier	ZONE C Porrentruy
Densité de population	Moyenne	Faible	Moyenne
Profondeur des réservoirs Jurassiques (température suffisante)	Haute	Moyenne	Faible
Profondeur des réservoirs Triasiques (Muschelkalk) (température suffisante)	Haute	Moyenne	Moyenne
Profondeur des réservoirs Permo-Carbonifères (température suffisante)	Haute	Haute	Haute
Fracturation naturelle décrochante	Haute	Faible	Haute
Fracturation naturelle chevauchante	Haute	Haute	Faible
Recharge hydraulique & saturation des intervalles réservoirs	Haute	Faible (inconnue)	Moyenne
Complexité géologique	Moyenne	Haute	Faible

Tableau 4 - Tableau récapitulatif du potentiel géothermique hydrothermal par ZONE dans le canton du Jura

En conclusion, il peut être statué que :

- **La vallée de Delémont présente la situation la plus favorable à la géothermie hydrothermale.** Cette situation est principalement due à la présence en plus grande profondeur des unités réservoirs du Jurassique et du Muschelkalk et une recharge hydraulique probablement meilleure. Le rapport sur le potentiel géothermique du Jura de 2012 pointait également les mêmes conclusions et précisait les quartiers d'intérêt au sein de la ville de Delémont pour l'exploitation géothermique.
- Le secteur B de Saignelégier ne semble pas permettre une mise en œuvre simple de la géothermie de moyenne profondeur. En effet, la faible densité de population associée à la complexité géologique rend le développement de la géothermie hydrothermale plus complexe et risqué en terme de chance de succès. Des mesures géophysiques importantes seraient nécessaires pour imager les structures profondes (duplexes) dans un contexte géographique où les contraintes d'accès à de telles mesures sont fortes (topographie complexe et contraintes environnementales marquées)
- Le secteur C de Porrentruy présente un intérêt énergétique en surface. Les gammes de profondeurs pour le Muschelkalk sont comprises entre 750 et 1000m. Le fort gradient géothermique mis en évidence dans le forage de Buix (40°C/km) permet d'envisager des températures de production de l'ordre de 40-45° qui pourraient être valorisées. Il serait également nécessaire d'investiguer des cibles plus anciennes et plus profondes pour atteindre des températures plus importantes (base Trias/Buntsandstein, Permo-Carbonifère et sommet du socle fracturé), mais présentant des risques géologiques plus élevés.

Ainsi, le Jura possède certainement un potentiel hydrothermal fort cependant, il ne peut à ce jour pas être confirmé sur la base des données existantes. Une cartographie géologique du sous-sol profond doit être mise en place à l'échelle du Canton pour localiser les zones d'intérêts et confirmer les profondeurs des objectifs géologiques cibles qui pourraient abriter des ressources.

En partant sur une hypothèse de prospection dans le secteur de Delémont, le paragraphe suivant dresse les étapes et travaux minimums à considérer pour une campagne de prospection de réservoirs géothermiques.

6 Recommandation pour un programme de prospection de réservoirs géothermiques

L'objectif de ce chapitre est d'adresser un cadre type pour un programme de prospection en géothermie hydrothermale avec des objectifs de moyenne profondeur. Le phasage présenté ci-dessous a ainsi pour but d'aiguiller des porteurs de projet à initier de tels travaux de prospection.

De manière générale, un programme de prospection géothermique pour la recherche et la mise en valeur de réservoirs géothermiques peut suivre 2 grandes étapes résumées dans la Figure 20. Chaque phase est composée de travaux d'acquisition de données et d'analyses, ainsi que de préparation à l'acquisition de nouvelles données (géophysiques et ou forages).

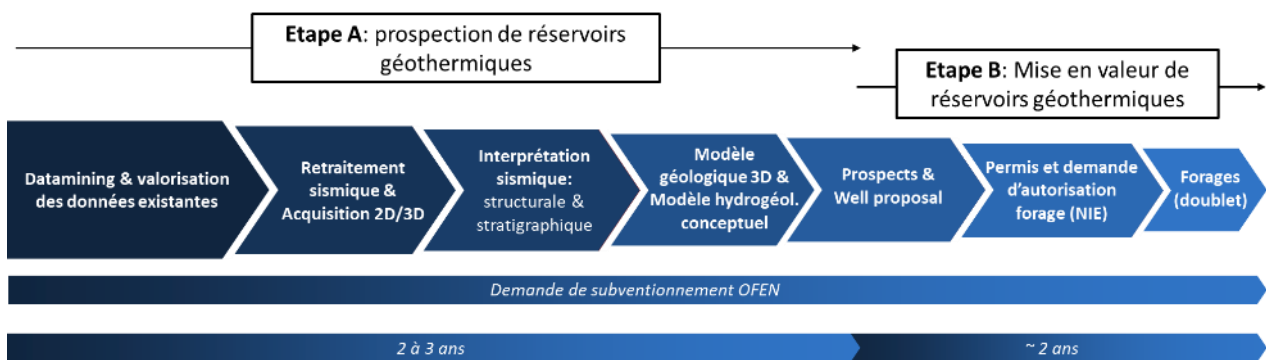


Figure 20 : Exemple de phasage pour un projet de prospection géothermique (Source : Hydro-Géo Environnement).

Une troisième étape (Etape C) pourra voir le jour en cas de succès d'un forage géothermique exploratoire et le lancement d'une exploitation géothermique par doublet. Il s'agira d'une phase d'exploitation nécessitant une demande de concession auprès du Canton.

En ce qui concerne le potentiel géothermique hydrothermal, les résultats de la synthèse présentée dans les chapitres précédents pointent l'intérêt premier d'une prospection dans le secteur de Delémont. Mais chaque Zone A, B et C nécessite indéniablement une phase de prospection détaillée complémentaire afin de lever les incertitudes géologiques quant aux caractéristiques réservoirs cibles et leur potentiel géothermique (localisation précise en surface, profondeur des objectifs géologiques, présence de failles et géométrie et autres structures tectoniques favorables à une exploitation géothermique, etc.).

Cette phase de prospection de détail doit inclure entre autres une campagne d'acquisition géophysique ciblée au droit des zones propices, ainsi que la réalisation éventuelle de forages de reconnaissance.

Ces travaux dits de prospection de réservoirs géothermiques devraient normalement se faire sous le cadre d'un permis de recherche en surface (permis d'exploration) octroyé préalablement par le Canton ou à minima dans un secteur où le Canton reconnaît une exclusivité au porteur de projet qui initierait ces travaux. Le cadre légal sur la gestion et l'exploitation des ressources naturelles du sous-sol du Canton du Jura doit faire foi.

De plus, de tels travaux de prospection pour des objectifs chaleurs peuvent actuellement faire l'objet d'une contribution financière à hauteur maximum de 60% de la part de la confédération via son service de l'Energie (OFEN) et en vertu de l'ordonnance sur le CO₂. Ces options de subvention sont résumées dans le Chapitre 6.2.

6.1 Proposition d'un programme de prospection prévisionnel

Le présent chapitre propose de manière succincte un programme de travaux de prospection qui pourra être repris et affiné par tous porteurs de projets intéressés à mettre en œuvre une telle démarche.

Ce programme type présenté ci-après a été construit également selon des postes reconnus comme éligibles à une demande de contribution OFEN pour la prospection de réservoirs géothermiques en vertu de l'ordonnance sur le CO₂.

6.1.1 Objectifs du programme et stratégie

Les objectifs visés lors de la mise en œuvre d'un programme de prospection géothermique sont les suivants :

- Améliorer les connaissances du sous-sol au droit de zones propices préalablement identifiées ;
- Investiguer de manière globale tous les play-concepts géothermiques potentiels à l'échelle d'un périmètre de prospection. Cette démarche peut se faire via la valorisation des données existantes, un retraitement sismique des lignes publiques, et par l'acquisition et le traitement de nouveaux profils sismiques 2D, voir de sismique 3D ;
- Apporter les compléments géologiques (mesures sur le terrain) et hydrogéologiques (monitoring des sources et captages d'origine karstique) nécessaires pour la mise à jour d'un modèle géologique 3D à l'échelle du périmètre de prospection, mais également pour la réalisation d'un modèle de réservoir ;
- Réaliser un portefeuille complet de prospects géothermiques à l'échelle du périmètre de prospection ;
- Identifier les sites des futurs forages d'exploration (parcelles) après croisement entre les cibles géologiques en profondeur et les contraintes énergétiques et les incidences environnementales en surface ;
- Fournir des propositions de puits (Well proposals & Basis of design) pour le lancement des programmes de forages et des démarches d'autorisation de construire/forer auprès des instances cantonales et communales.

Pour mener à bien ces objectifs, une stratégie de prospection doit être définie en amont par le porteur de projet afin de confirmer les cibles réservoirs du projet.

Cette stratégie de prospection fixera les règles en termes d'objectifs et de priorisation des travaux de prospection qui formera le contenu final du programme de travail du projet pour lequel une demande de permis de recherche en surface pourrait être déposée auprès du Canton, et/ou pour lequel une demande de contribution à la prospection de réservoirs géothermiques pourrait être soumise à l'OFEN.

En fonction de la taille (surface) des secteurs retenus pour une prospection géothermique, il conviendra de réfléchir à une stratégie à 2 échelles :

- a) **Approche régionale** à plus large échelle au moyen d'une campagne géophysique 2D éparse, afin de cibler/confirmer les sites d'intérêts (exemple : vallée de Delémont). Ce type d'acquisition a pour but de scanner de manière régionale les zones prospectives et de confirmer les géométries principales des failles présentes dans le périmètre de prospection du porteur de projet. Cette approche est judicieuse dans des secteurs exempts de profils sismiques historiques. Des profils 2D permettent en effet de pouvoir couvrir de plus grandes régions en

une seule campagne avant de cibler éventuellement une zone où un bloc sismique 3D serait judicieux (= approche locale ci-dessous).

- b) **Approche « locale »** au moyen soit d'une sismique 3D (ou pseudo 3D) ou d'une densification de profils 2D au droit d'un secteur cible (exemple ville de Delémont et alentours direct). Cette approche cible un secteur propice préalablement identifié comme zone prospective, soit sur la base de l'acquisition régionale précédente (ci-dessus), soit sur la base d'une analyse géologique spécifique des données existantes (cartes géologiques, profils sismiques 2D existants, données de forages profonds, écorché tectonique et coupes géologiques).
Ce type d'acquisition « locale » a pour but de contraindre directement la planification d'un futur doublet géothermique (définition des meilleures trajectoires de puits et mitigations des risques géologiques pour le forage).

Le choix du concept d'acquisition dépend donc directement de l'étendue de la zone d'étude, de son cadre géologique et des données du sous-sol profond éventuellement préexistantes.

Pour rappel, les trois zones de Delémont, Saignelégier et Porrentruy ne sont pas couvertes par des données sismiques optimales (voir chapitre 2.1). La majeure partie des profils 2D existants ne présentent pas une qualité suffisante pour une interprétation correcte des failles et des limites de couches en profondeur. Il en ressort qu'une acquisition de nouvelles données sismiques est impérative.

En cas de sismique 2D, les critères de positionnement des profils 2D doivent respecter les éléments suivants :

- Couper perpendiculairement les failles préalablement connues ;
- Favoriser l'acquisition le long des routes existantes (= réduction des contraintes environnementales et réduction des besoins en permitting privé)
- Eviter les topographies trop complexes et importantes ;
- Croiser les nouvelles lignes avec les anciens profils existants ;
- Passer au droit de forages profonds existants pour permettre un calage lithostratigraphique (« well tie »).
- Implanter des lignes perpendiculaires entre elles pour augmenter les chances d'identifier des failles avec une orientation non connue.

Après chaque acquisition géophysique, régionale et/ou locale, un cycle d'interprétation des données et de modélisation géologique doit être réalisé. Ces analyses doivent permettre d'aboutir à la détermination de prospectifs géothermiques et à accompagner la planification de forages exploratoires (design et programme de forage).

La Figure 21 résume cette stratégie de manière globale et illustre les travaux principaux qui doivent être entrepris dans un programme de prospection. Ces travaux sont énumérés plus en détails ci-après.

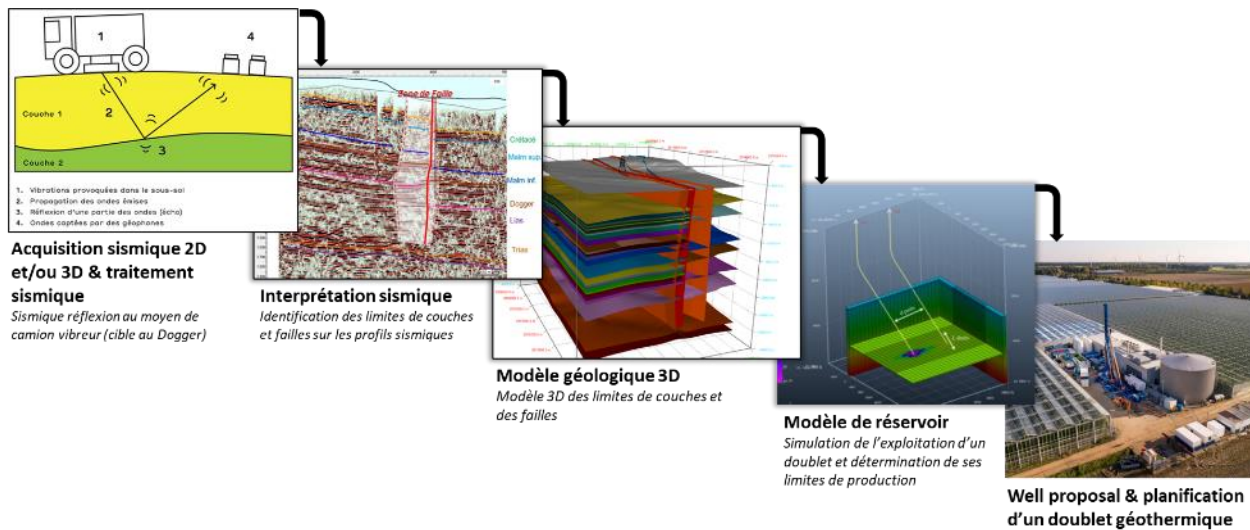


Figure 21 : Stratégie d'acquisition et d'interprétation dans le cadre d'un programme de prospection géothermique (Source : Hydro-Géo Environnement).

6.1.2 Programme de travaux de prospection adéquats au Canton du Jura

Un listing non exhaustif des travaux de prospection potentiels requis pour un projet de géothermie hydrothermale est soumis ci-dessous. Il reprend les grandes lignes illustrées par la Figure 21. Un programme de prospection doit être discuté en détail avec le porteur de projet afin de contraindre les limites technico-économiques du projet et caler les investigations géoscientifiques aux objectifs chaleurs afin de rester dans un business plan cohérent.

La majeure partie de ces positions sont considérées comme éligibles à une demande de contribution OFEN pour la prospection de réservoirs géothermiques en vertu de l'ordonnance sur le CO₂.

- **Datamining et valorisation** de toutes les **données existantes** (sous-sol et surface) pour contraindre le modèle géologique de base et aider à la planification de futures mesures géophysiques (= support au survey design sismique). Sont concernés :
 - Les anciens profils géophysiques 2D issus de campagnes d'exploration pétrolières et d'exploration pour les gisements de sels ;
 - Les données et rapports de forages de faible à grande profondeur ayant atteints et/ou traversés les roches réservoirs calcaires du Mésozoïques (Malm, Dogger et Muschelkalk).
- **Retraitement sismique** d'anciennes campagnes géophysiques pour lesquelles les données brutes sont disponibles. L'objectif ici est de concentrer le traitement sismique sur les objectifs géothermiques hydrothermaux du Canton du Jura (Malm, Dogger et Muschelkalk principalement). Il s'agira de retravailler également les zones de failles et en améliorer leur résolution sur les profils 2D.

Cette tâche a aussi pour but d'extraire des profils existants les informations géophysiques clefs pour dimensionner correctement les futures nouvelles campagnes de mesures sismiques.

- **Acquisition sismiques 2D et/ou 3D** pour confirmer des structures tectoniques, les zones de failles et les horizons réservoirs cibles. Des variantes avec approche régionale et/ou locale sont donc possibles, fonction du secteur de prospection retenu par le porteur de projet, mais fonction également des contraintes technico-économiques du projet.

Cette phase d'acquisition comprend au préalable :

- Un survey design opérationnel des mesures géophysiques
 - Une procédure d'appels d'offres aux entreprises spécialisées (acquisition et traitement sismique)
 - Une procédure de demande d'autorisation d'acquisition sismique auprès des instances cantonales (selon cadre légal en vigueur dans le Canton)
 - Une procédure de Permitting auprès des propriétaires privés et/ou publics des parcelles concernées par les mesures géophysiques (points de vibrations et/ou pose de capteurs-géophones).
- **Modèle Structural** (yc modèle cinématique) et **contrôle à l'affleurement** des séquences lithostratigraphiques cibles : directement en lien avec toute future acquisition sismique. Il s'agit ici de définir la stratégie/cadre de l'interprétation structurale à suivre pour l'interprétation sismique sur la 2D et/ou 3D. La valorisation des données géologiques existantes fait également partie de cette tâche, tout comme une analyse de LIDAR/MNT dans le but de contraindre et comprendre la tendance des linéaments structuraux à l'affleurement et en appliquer ces tendances à l'interprétation sismique

Lors de cette étape, une analyse de l'histoire thermique et d'enfouissement pourrait être menée afin de caractériser les réservoirs hydrothermaux cibles

- **Interprétation sismique 2D et/ou 3D** des données géophysiques existantes (lignes retraitées) et des nouvelles acquisitions (2D et/ou 3D).

L'interprétation sismique a pour but de :

- Interpréter de manière fine les horizons sismiques majeurs formant les objectifs géologiques cibles ;
- Interpréter les accidents tectoniques principaux et secondaires (failles) à l'échelle de la zone d'étude et ses alentours ;
- Corréler les accidents tectoniques cartographiés aux accidents tectoniques à l'affleurement et évaluer les structures d'un point de vue potentiel géothermique ;
- Contraindre un modèle de vitesse pour la conversion temps-profondeur des données sismiques
- Réaliser des cartes structurales en profondeur des horizons sismiques interprétés y inclut des cartes d'épaisseur (isopaques) ;
- Evaluer les zones les plus propices pour la géothermie
- Extraire toutes les informations géologiques pertinentes pour l'établissement de proposition de forages profonds (« well proposal »)

Ces travaux d'interprétation sismique doivent être menés via des logiciels professionnels de traitement et interprétation géophysique (exemple : Kingdom Suite, Petrel, OpendTect).

- **Réalisation d'un modèle géologique 3D** sur la base des interprétations sismiques (intégration des grilles d'interprétation en profondeur et des polygones de failles).

Le modèle géologique 3D permettra entre autres d'évaluer les différentes variantes de trajectoires de puits en cas de forages déviés.

- **Analyse de la sensibilité des failles** sur la base du modèle 3D préalablement construit. Cette analyse permet d'évaluer le degré de criticité d'un système de faille visé par un projet de géothermie par rapport à la sismicité et par rapport à sa perméabilité théorique.
- **Portefeuille de prospects géothermiques** avec analyse parcellaire en surface pour le choix des futurs sites de forages (plateforme).
- **Réalisation d'un Well Proposal** accompagné d'un document technique de type Basis of Design (BOD) qui « clôturera » en quelque sorte les travaux de prospection. Un BOD résumera tous les paramètres d'ingénierie forage contraints selon la géologie, l'hydrogéologie, l'ingénierie réservoir et l'ingénierie de production qui devront être respectés pour tout développement d'un doublet géothermique dans une zone d'étude.
- Réalisation de **modèles hydrogéologiques conceptuels** et de **modèles de réservoirs** préliminaires sur la base du modèle géologique 3D (simulation du potentiel doublet). Cette phase permet tout d'abord de revoir les potentiels hydrauliques des ressources cibles sur la base des données de forages profonds existants et de l'analyse des compartiments hydrogéologiques issus du modèle 3D.

Un modèle de réservoir préliminaire permettra ensuite de simuler l'exploitation d'un doublet géothermique selon des propriétés réservoirs prédéfinies et les limites du modèle géologique 3D.

En parallèle à ces travaux de prospection, axés « sous-sol », il convient de développer en amont les problématiques de surface, risques sur les eaux souterraines et risques en lien avec la sismicité. Pour ce faire, les travaux suivants peuvent être considérés :

- **Scanning des incidences environnementales** au droit de chaque site préliminaire retenu pour la réalisation de forages géothermiques.
- Mise en place d'une **surveillance de sources et captages** d'origine karstique et/ou captages majeurs pour la compréhension du réseau d'eaux souterraines.

La mise en place d'un tel réseau devrait se faire à minima 6 mois avant la réalisation de forages d'exploration afin d'obtenir une image de référence saine avant travaux et d'en avoir interprété les événements correctement. Le choix des sources doit être contraint selon le modèle géologique pour éviter des mesures inutiles.

- Mise en place d'un **réseau de surveillance de la sismicité** complémentaire au réseau national SED si la couverture nationale s'avère insuffisante.

Avant de confirmer la nécessité d'une extension d'un réseau sismique au réseau national, il conviendra de prendre contact avec le Service Sismologique Suisse (SED) pour définir l'état du réseau au droit de la zone d'étude. Cette démarche peut s'inscrire dans le cadre du projet GEOBEST20+ subventionné par l'OFEN.

Comme pour le réseau de surveillance des sources et captages, un monitoring et interprétation des données doit se faire à minima 6 mois avant la réalisation d'un forage afin d'obtenir une image de référence avant travaux.

Le programme des travaux de prospection ci-dessus ne doit pas être considéré comme exhaustif. Il représente une variante possible d'expertises à mener dans le cadre de la prospection de ressources

géothermiques hydrothermales. Un programme final dépend de la typologie des objectifs géologiques visés et du contexte géographique de la zone de prospection. Il reviendra aux porteurs de projets et aux bureaux d'études mandatés d'évaluer la stratégie de prospection et d'acquisition.

6.1.3 Budget prospection

En termes de coûts, ces travaux de prospection sont importants, dépendant une fois encore du type d'acquisition de géodonnées mis en œuvre. Un estimatif « brut » de coûts d'acquisition au km ou au km² est donné dans le Tableau 5. Ces coûts se basent sur les prix du marché actuel en termes d'acquisition sismique 2D et ou 3D.

Tableau 5 : Coûts d'acquisition sismique 2D et 3D

Travaux	Coûts min (CHF)	Coûts max (CHF)	Remarques
Acquisition sismique 2D	6'500.-	12'000.-	Prix au km ; fonction des paramètres d'acquisition (nombre de points vibrés, espacement entre points vibrés, espacement entre géophones, nbre de sweeps, durée du sweep, nbre de camions engagés, etc.)
Acquisition sismique 3D	25'000	45'000	Prix au km² ; fonction des paramètres d'acquisition (nombre de points vibrés, espacement entre points vibrés, espacement entre géophones, nbre de sweeps, durée du sweep, nbre de camions engagés, etc.)

Au coût d'acquisition sismique s'ajoutent également les coûts de permitting, soit les honoraires des démarches pour obtenir le droit de passage des camions vibreurs ainsi que la dépose des géophones sur des parcelles privées et publiques. Les coûts de permitting peuvent osciller entre 10 kCHF and > 100 kCHF lors d'acquisition sismique 3D importante

A noter également que les honoraires de planification de ces mesures (y inclut les éventuels dossiers d'autorisation) doivent être rajoutés à ces frais d'acquisition et de permitting.

Une fois l'acquisition terminée, les données enregistrées sont transmises à des sociétés spécialisées dans le traitement sismique. Ces coûts de processing varient également entre quelques 10 kCHF pour un traitement sismique de profils 2D ne dépassant pas les 50 km à plus de 100 kCHF en cas de sismique 3D d'environ 40 à 50 km².

Les travaux d'interprétation sont quant à eux également importants car ils permettent de valoriser les nouvelles géodonnées. Ces travaux, principalement l'interprétation sismique 2D/3D et la modélisation géologique 3D, ont pour but d'arriver à la proposition d'un forage d'exploration et son design préliminaire. Il faut compter entre 100 kCHF et 200 kCHF pour couvrir ces phases analytiques, fonction encore une fois du type de données acquises (2D ou 3D) et de leur quantité (quelques km de profils 2D à plusieurs km² de sismique 3D).

Ainsi, considérant uniquement une campagne d'acquisition sismique 2D de quelques 50 km, un coût total d'environ 1.5 Mio CHF semble raisonnable pour un projet de prospection géothermique dans le canton du Jura.

Si une approche régionale (2D) puis locale (3D) devait être suivie, un budget global d'environ 3 à 4 Mio pourrait facilement être atteint, fonction de la surface d'étude visée par le projet.

6.2 Subvention OFEN pour la prospection de réservoirs géothermiques

Ces travaux de prospection étant importants d'un point de vue financier avec un risque à la clef de ne pas confirmer de cibles géothermiques forables, il faut rappeler la possibilité de faire appel aux outils de contribution financière de l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) en vertu de l'ordonnance sur le CO₂ pour des objectifs de chaleur. La contribution possible de l'OFEN peut se monter à hauteur maximum de 60% et a pour but de couvrir une partie des risques d'investissement consentis par un porteur de projet.

Les coûts éligibles selon une contribution OFEN sont ceux se rapportant aux 3 phases ci-dessous définies par l'OFEN :

- **L'acquisition de nouvelles géodonnées** dans la zone de prospection
- **Les travaux destinés à l'acquisition** de nouvelles géodonnées
- **L'analyse et l'interprétation**

Hormis les études environnementales (études d'impacts) et énergétiques (étude de faisabilité CAD/), quasiment tous les travaux de prospection listés dans le Chapitre 6.1.2 sont considérés comme éligibles par l'OFEN. Seuls les travaux de datamining et retraitement sismique peuvent être jugés comme faisant partie des devoirs du porteur de projet (« Homework » selon les termes de l'OFEN). A ceci s'ajoutent tous les coûts de gestion de projet du porteur de projet et/ou de ses bureaux mandataires.

Deux types de subventions pour la prospection de réservoirs géothermiques existent au sein de l'OFEN :

(<https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/mesures-d-encouragement/energies-renouvelables/promotion-de-la-geothermie.html>)

- 1) Demande de contribution à la prospection de réservoirs géothermiques **en vertu de la loi et de l'ordonnance sur le CO₂** (voir Annexe 6 = extrait de l'Annexe 12 de l'Ordonnance sur la réduction des émissions de CO₂).
- 2) Demande de contribution à la recherche de ressources géothermiques : prospection **en vertu de la loi sur l'énergie (LEne) et de l'ordonnance sur l'énergie (OEne)** (voir Annexe 7 = extrait de l'Annexe 1 de l'Ordonnance OEne).

Dans le cas d'une prospection de réservoirs géothermiques hydrothermaux, seuls des objectifs chaleurs sont visés. **Il s'agira donc d'activer une demande de contribution en vertu de la loi et de l'ordonnance sur le CO₂.**

Une fois les travaux de prospection réalisés menant à la confirmation d'une cible forable, il conviendra d'activer la seconde demande de contribution pour couvrir les coûts du développement d'une ressource géothermale par l'exécution d'un doublet géothermique (= coûts forage) :

- Demande de contribution **à la mise en valeur** de réservoirs géothermiques **en vertu de la loi et de l'ordonnance sur le CO₂** (voir Annexe 6 = extrait de l'Annexe 12 de l'Ordonnance sur la réduction des émissions de CO₂).

7 Réflexions techniques préliminaires pour la réalisation de forages exploratoires

Une fois les phases de prospection terminées, la planification de forages exploratoires doit voir le jour.

Le chapitre suivant a pour but de résumer les bases conceptuelles pour l'exécution de forages géothermiques selon les différentes cibles identifiées dans les 3 grandes zones A, B et C du Canton du Jura et définies en Figure 2.

Quatre types de forages en fonction de la profondeur du prospect géothermique ont été identifiés.



Comme discuté précédemment, la profondeur des prospects est différente pour les divers domaines structuraux dans chaque zone. La profondeur est le facteur qui détermine la durée des travaux, leur prix, les installations en surface ainsi que la structure du puits. Une comparaison des différents types de forages est résumée dans le Tableau 6.



Les durées des travaux données dans ce tableau sont des estimations approximatives et correspondent seulement à l'exécution d'un seul puits. **En cas de système de doublet, un deuxième puits sera indispensable et imposera un doublement du temps et du prix.**

Une analyse technico-économique approfondie d'un puits géothermique ne pourra être faite qu'en fin de prospection détaillée, sur la base de toutes les contraintes géologiques et hydrogéologiques identifiées dans la proposition de puits. C'est lors de cette étape qu'une architecture précise de puits devra être établie sur la base d'un modèle géologique 3D. Les limites de sections (détermination des assises de tubage) devront y être déterminées.

Il faut noter que la réalisation d'un forage de reconnaissance peut également faire partie de travaux de prospection, en lieu et place des mesures géophysiques ou en complément direct. De tels forages de reconnaissance peuvent être considérés comme éligibles pour l'OFEN selon certaines conditions à préciser avec l'OFEN et ses experts.

Tableau 6 Comparaison des quatre types de forages en fonction de la profondeur des prospect géothermiques.

Type forage	Cibles potentielles	Profondeur	Installation en surface	Structure du puits	Durée des travaux
<p>Foreuse automotrice légère</p> 	<p>Réservoirs Jurassiques à faible profondeur (Malm)</p> <p>Zones A, B et C</p>	500m	<ul style="list-style-type: none"> - Empreinte en surface : env. 1000-1500 m² - Décapage de la terre végétale & Compactage du sol ; ou pose de grave de 50cm d'épaisseur sur la TV - Bassins de rétention, décantation et neutralisation pour eaux de chantier - Bassins de tests (fonction des options de rejets des eaux géothermales aux EU). - Petite base de vie 	<ul style="list-style-type: none"> - 2 sections - Vertical 	10 jours (12h / jours)
<p>Atelier de foration</p> 	<p>Réservoirs Jurassiques et Triasiques de moyenne profondeur (Malm, Dogger, Muschelkalk)</p> <p>Zones A, B et C</p>	> 500m à 1500m	<ul style="list-style-type: none"> - Empreinte en surface : env. 2500 m² - Bétonnage autour du puits - préparation des voies d'accès (compactage, empierrage) - Bassins de rétention, décantation et neutralisation pour eaux de chantier - Bassins de tests (fonction des options de rejets des eaux géothermales aux EU). - Petite base de vie 	<ul style="list-style-type: none"> - Casing de surface - 3-4 sections - Vertical - Blow out preventer (BOP) 	45 - 60 jours (24h / 24h)

<p>Rig léger à angle d'entrée variable</p> 	<p>Réservoirs Jurassiques et Triasiques à moyenne profondeur (Malm, Dogger, Muschelkalk)</p> <p>Zones A, B et C</p>	<p>> 500m à 1500m</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Empreinte en surface : env. 2500 à 3000 m² - Bétonnage autour du puits - Préparation des voies d'accès (compactage, empierrage) - Bassins de rétention, décantation et neutralisation pour eaux de chantier - Bassins de tests (fonction des options de rejets des eaux géothermales aux EU). - Petite base de vie 	<ul style="list-style-type: none"> - Casing de surface - 3-4 sections - Dévié - Blow out preventer (BOP) 	<p>60 jours (24h / 24h)</p>
<p>Rig de forage lourd</p> 	<p>Réservoir Triasiques (Muschelkalk) et permo-Carbonifère de moyenne à grande profondeur</p> <p>Zones A, B et C</p>	<p>> 1500m (et forage dévié)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Empreinte en surface : env. 5000 m² minimum - Bétonnage et drainage de l'emprise au sol du Rig - Préparation des voies d'accès - Zone de stockage matériel - Bassins de rétention, décantation et neutralisation pour eaux de chantier - Bassins de tests (fonction des options de rejets des eaux géothermales aux EU). - Petite base de vie - Connexion électrique et réseau informatique souterrain - Logement personnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Casing de surface - Liner de production - 3 à 5 sections - Vertical ou dévié - Blow out preventer (BOP) 	<p>90 à 150 jours (24h / 24h)</p>

Références

- ABDELFETTAH Y., SCHILL E., KUHN P., 2014. Characterization of geothermally relevant structures at the top of crystalline basement in Switzerland by filters and gravity forward modelling. *Geophysical Journal International*, Volume 199, Issue 1, Pages 226-241.
- BOEM J.-M., FLURY F., RIEBEN C., 2006. Recherche d'eau par forages profonds dans le Dogger (Grande Oolithe) du Jura tabulaire à Courtemaîche (Jura, Suisse). *Bulletin für angewandte Geologie*, 17 p.
- CHOI J.-H., EDWARDS P., KO K., KIM Y.-S., 2016. Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach. *Earth-Science Reviews*, 19 p.
- CSD Ingénieurs SA (2021) Roches et aquifères moyennement profonds dans la Vallée de Delémont et en Ajoie, Évaluation du potentiel d'exploitation géothermique. Rapport JU1896.100; Office de l'environnement du canton du Jura.
- Do Couto, D., Garel, S., Moscariello, A. et al. Origins of hydrocarbons in the Geneva Basin: insights from oil, gas and source rock organic geochemistry. *Swiss J Geosci* 114, 11 (2021). <https://doi.org/10.1186/s00015-021-00388-4>
- FLURY F., KÜBLER B., REY JP. SCHINDLER BA. 1983. Galerie Delémont-Bellerive. Observatoire géologiques et hydrogéologiques. *Eclogae geol. Helv.* Vol 76/3. Pages 507-522.
- Groupement d'Etude Géothermie Profonde Jura (2012) Géothermie profonde : Etude du potentiel cantonal. Rapport mai 2012 ; République et Canton du Jura.
- HESSENAUER, M., RIEBEN, C., FLURY, F., 2001. Prospection d'eau souterraine par forages profonds à Muriaux (Canton du Jura). *Bull. Géologie Appliquée* 6, 147–164.
- LINIGER H. 1925. *Geologie des Delsbergerbeckens und der Umgebung von Movelier*. *Beitr. geol. Karte Schweiz*, NF, 55
- NUSSBAUM, C., BOSSART, P., AMANN, F. et al. Analysis of tectonic structures and excavation induced fractures in the Opalinus Clay, Mont Terri underground rock laboratory (Switzerland). *Swiss J Geosci* 104, 187 (2011). <https://doi.org/10.1007/s00015-011-0070-4>
- PFIFFNER, O. A. (2014). *Geology of the Alps*. Chichester: John Wiley & Son.
- RIME, V., SOMMARUGA, A., SCHORI, M. & MOSAR, J. 2019. Tectonics of the Neuchâtel Jura Mountains: insights from mapping and forward modelling. *Swiss Journal of Geosciences*, 16 p.
- VOLLMAYR (1983). *Temperaturmessungen in Erdölbohrungen der Schweiz*. *Bull. Ver.schweiz. Petroleum-Geol.u.Ing.*, 49.

