

## République et Canton du Jura – Géothermie profonde – Etude du potentiel cantonal



### **GROUPEMENT D'ETUDE GEOTHERMIE PROFONDE JURA**

### **RAPPORT**

### **Géothermie profonde – Etude du potentiel cantonal**

Dossier 11J028 – Version 001  
2 mai 2012

## Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introduction</b>  | <b>7</b>  |
| 1.1 Cadre   | 7         |
| 1.2 Objectifs   | 7         |
| 1.3 Besoins actuels et futurs du canton (chaleur et électricité)                                      | 8         |
| <b>2. La production d'énergie grâce à la géothermie profonde</b>                                      | <b>10</b> |
| 2.1 Définitions et potentiels   | 10        |
| 2.1.1 Géothermie profonde / superficielle, de haute énergie / basse énergie                           | 10        |
| 2.1.2 Systèmes hydrothermaux et petrothermaux   | 11        |
| 2.1.3 Potentiel de la géothermie profonde en Suisse et dans le monde pour la production d'électricité | 13        |
| 2.2 Méthodes d'exploration de production de l'énergie géothermique                                    | 17        |
| 2.2.1 Méthodes d'exploration  | 17        |
| 2.2.2 Techniques de forage  | 19        |
| 2.2.3 Stimulation du réservoir  | 24        |
| 2.3 Les différentes manières de valoriser la géothermie selon les degrés d'enthalpie                  | 25        |
| 2.3.1 La géothermie très basse enthalpie (température inférieure à 20°C)                              | 25        |
| 2.3.2 La géothermie basse enthalpie (20 à 100°C)  | 25        |
| 2.3.3 La géothermie moyenne enthalpie (100 à 160°C)   | 25        |
| 2.3.4 La géothermie haute enthalpie (température supérieure à 160°C)                                  | 26        |
| 2.4 Objectif visé pour la valorisation de la chaleur  | 26        |
| 2.4.1 Production d'électricité au moyen d'un groupe ORC   | 26        |
| 2.4.2 Production de chaleur pour un chauffage urbain  | 27        |
| 2.4.3 Production de froid par système à absorption  | 29        |
| 2.4.4 Valorisation basse température  | 30        |
| 2.5 Risques liés à la sismicité induite et solutions potentielles                                     | 31        |
| 2.5.1 Etat des connaissances  | 31        |
| 2.5.1.1 Sismicité naturelle   | 31        |
| 2.5.1.2 Sismicité induite   | 32        |
| 2.5.2 Mitigation des risques, principe des trois piliers  | 33        |
| 2.5.3 Système horizontal multi-fractures de Geo-Energie Suisse SA                                     | 35        |
| 2.6 Quelques exemples de systèmes géothermiques profonds  | 35        |
| 2.6.1 Riehen (BS)   | 35        |
| 2.6.2 Unterhaching, Bavière (D)   | 36        |
| 2.6.3 Soultz-sous-Forêts, Alsace (F)  | 37        |
| <b>3. Evaluation du potentiel du Canton du Jura</b>   | <b>39</b> |
| 3.1 Evaluation des ressources   | 39        |
| 3.1.1 Géologie du canton du Jura  | 39        |
| 3.1.2 Gradient géothermique, profondeurs requises, implications                                       | 46        |
| 3.1.3 Alternative des systèmes hydrothermaux hybrides   | 48        |
| 3.2 Evaluation du potentiel géothermique du Canton du Jura pour la production d'électricité           | 49        |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 4.      | Détermination d'une dizaine de sites pour des projets pilotes | 50 |
| 4.1     | Définition des critères pour la sélection des sites           | 50 |
| 4.1.1   | Sites potentiels  | 53 |
| 4.1.1.1 | Site 1 - Région de Delémont                                   | 53 |
| 4.1.1.2 | Site 2 - Porrentruy Ouest                                     | 60 |
| 4.1.1.3 | Site 3 - Bassecourt Est                                       | 65 |
| 5.      | Conclusions   | 70 |
| 6.      | Références  | 71 |

Auteurs :

**Groupement d'étude géothermie profonde Jura**

| Prénom Nom       | Formation                              | Fonction              |
|------------------|--|-----------------------|
| François Flury   | Géologue/Hydrogéologue                 | Directeur/Associé MFR |
| Peter Meier      | Dr. sc. techn.                         | Directeur GES         |
| Olivier Zingg    | Géologue/Géophysicien                  | Chef de projet GES    |
| Patrick Dewarrat | Ingénieur HES en technique énergétique | Chef de projet RWB    |
| Johan Donzé      | Master en environnement                | Spécialiste SIG RWB   |
| Daniel Urfer     | Dr. sc. techn.                         | Directeur/Associé RWB |

## Table des figures

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figure 1  | : Perspective de consommation de l'énergie électrique en 2035 pour le Canton du Jura, Source : « consommation et approvisionnement en énergie du canton du Jura » Weinmann-Energie SA du 26 mai 2011 | 8  |
| Figure 2  | : Perspective de provenance de l'énergie électrique en 2035 pour le Canton du Jura, Source : « consommation et approvisionnement en énergie du canton du Jura » Weinmann-Energie SA du 26 mai 2011   | 9  |
| Figure 3  | : Différentes utilisations de l'énergie géothermale (GREGE, 03.10, Neuchâtel. <a href="http://www.crege.ch">www.crege.ch</a> )   | 10 |
| Figure 4  | : Principe des systèmes hydrothermaux exploitant un aquifère profond, exemple de la région de Munich   | 11 |
| Figure 5  | : Principe des systèmes pétrothermaux exploitant la chaleur des roches cristallines, projet DHM Bâle   | 12 |
| Figure 6  | : Perméabilité naturelle et besoin de stimulation des systèmes géothermiques profonds  | 12 |
| Figure 7  | : Représentation schématique des provinces géothermales de haute température   | 13 |
| Figure 8  | : Forages géothermiques profonds réalisés en Suisse entre 1987 et 1998 (d'après OFEN, 1998)  | 15 |
| Figure 9  | : Potentiel des nouvelles énergies renouvelables en Suisse après 2050 (Axpo, 2007)   | 16 |
| Figure 10 | : Représentation schématique de la géologie de la Suisse à une profondeur de 5 km environ.   | 16 |
| Figure 11 | : La géothermie profonde fournit de l'électricité en ruban   | 17 |
| Figure 12 | : Camion vibreur (émetteur) et géophones (récepteurs) durant une campagne de sismique-réflexion. Schaffhouse, mars 2012 (Photo O. Zingg)   | 18 |
| Figure 13 | : Foreuse Wirth B12 (charge maximale 152 T) à Schlattigen (TG), avril 2011. Exploration géothermique, profondeur atteinte 1508 m (Photo O. Zingg)  | 20 |
| Figure 14 | : Foreuse Bentec Euro Rig 350 AC (charge maximale 350 T) à Noville (VD). Exploration gazière par forage dévié, longueur totale 4298 m (Photo Daniel Willi SA)  | 21 |
| Figure 15 | : Forages directionnels : <i>Mud Motor</i> (d'après A.Picksak, Bohrmeisterschule Celle)  | 22 |
| Figure 16 | : Forages directionnels : <i>Rotary Steerable System</i> (d'après A.Picksak, Bohrmeisterschule Celle)  | 22 |
| Figure 17 | : Outils de forage PCD (gauche) et tricône (droite) (Source : Baker Hughes Inc.)   | 23 |
| Figure 18 | : Schéma et diamètres de tubage du forage Basel-1 (Ladner, 2009)   | 24 |
| Figure 19 | : Principe de la stimulation hydraulique par cisaillement (d'après S. Baisch, Q-con GmbH)  | 25 |
| Figure 20 | : Schéma simplifié d'un système ORC  | 27 |
| Figure 21 | : © ADEME – BRGM Principe de fonctionnement d'un réseau de chaleur avec centrale et sous-stations  | 28 |
| Figure 22 | : Schéma simplifié avec ORC et réseau de chauffage urbain  | 28 |
| Figure 23 | : Système à absorption ( <a href="http://www.energie.wallonie.be">www.energie.wallonie.be</a> )  | 29 |
| Figure 24 | : Chauffage de serres grâce à la géothermie en Hollande (Magazine Bilan du 07 septembre 2011)  | 30 |
| Figure 25 | : Aléa sismique en Suisse. (Service Sismologique Suisse, 2004).  | 31 |
| Figure 26 | : Aléa et risque sismique (source Service Sismologique Suisse / PartnerRe)   | 32 |
| Figure 27 | : Risque sismique en Suisse, échelle relative (Source PartnerRe).  | 32 |
| Figure 28 | : Géométrie du réservoir du projet DHM de Bâle obtenu par monitoring sismique de la stimulation. Coupe en profondeur N-S passant par le forage Basel-1. (Häring, 2008)                               | 33 |
| Figure 29 | : Réseau de monitoring sismique du projet Triemli à Zurich (gauche) et photos des sismomètres installés (source : service sismologique suisse)   | 34 |
| Figure 30 | : Principe du système pétrothermal « classique » / concept horizontal multi-fractures  | 35 |
| Figure 31 | : Schéma de fonctionnement de la centrale géothermique de Riehen (Bâle-Ville) (source : Gruneko AG)  | 36 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figure 32 | : Bâtiments de la centrale géothermique d'Unterhaching en Bavière (source <a href="http://www.geothermie-unterhaching.de">www.geothermie-unterhaching.de</a> ) | 37 |
| Figure 33 | : Tests de circulation du réservoir de Soultz-sous-Forêts (source <a href="http://www.geothermie-soultz.fr/v">www.geothermie-soultz.fr/v</a> )                 | 38 |
| Figure 34 | : Carte des grandes unités tectoniques du canton du Jura   | 39 |
| Figure 35 | : Profil géologique Nord-Sud (1 : Jura plissé, 2 : Jura tabulaire, 3 : Fossé rhéna). (O.A. Pfiffner, 2009, <i>Geologie der Alpen</i> . Fig. 5.2-3)             | 40 |
| Figure 36 | : Profil géologique Nord-Sud à travers le Mont Terri (P. Bossart & M. Thury, 2008)   | 40 |
| Figure 37 | : Hypothèses sur la répartition du Permo-Carbonifère et des failles qui affectent le socle. (K. M. Ustaszewski, 2004.)   | 41 |
| Figure 38 | : Fracturation et accidents kilométriques en Ajoie (Braillard, 2006)   | 44 |
| Figure 39 | : Sismique au Sud de Miécourt : modèle structural (Hessenauer et al., 2010)  | 45 |
| Figure 40 | : Isolignes de températures à 1000 mètres de profondeur au Sud du fossé rhéna (Hauber, L., 1993)   | 46 |
| Figure 41 | : Isolignes de températures à 1000 mètres de profondeur (Medici & Rybach, 1995)  | 47 |
| Figure 42 | : Courtemaîche : mesures de températures et gradient géothermique (Boem et al., 2006)  | 47 |
| Figure 43 | : Schéma de combinaison de différentes couches SIG   | 50 |
| Figure 44 | : Carte du risque sismique, échelle relative (Source PartnerRe).   | 52 |
| Figure 45 | : Carte des zones d'affectations et des zones de restriction de la région de Delémont  | 55 |
| Figure 46 | : Zones potentielles de la région de Delémont  | 56 |
| Figure 47 | : Dangers naturels potentiels (Carte indicative des dangers) dans les zones potentielles de la région de Delémont  | 57 |
| Figure 48 | : Cartes du cadastre des sites pollués de la région de Delémont  | 58 |
| Figure 49 | : Carte des zones d'affectations et des zones de restriction de la région de Porrentruy  | 61 |
| Figure 50 | : Carte des zones potentielles de la région de Porrentruy  | 62 |
| Figure 51 | : Dangers naturels potentiels (Carte indicative des dangers) dans les zones potentielles de la région de Porrentruy  | 63 |
| Figure 52 | : Carte du cadastre des sites pollués de la région de Porrentruy   | 63 |
| Figure 53 | : Carte des zones d'affectations et des zones de restriction de la région de Bassecourt  | 66 |
| Figure 54 | : Carte des zones potentielles de la région de Bassecourt  | 67 |
| Figure 55 | : Dangers naturels potentiels (Carte indicative des dangers) dans les zones potentielles de la région de Bassecourt  | 68 |
| Figure 56 | : Carte du cadastre des sites pollués de la région de Bassecourt   | 68 |

## Table des photos

|         |   |    |
|---------|---|----|
| Photo 1 | : Vues de la zone industrielle Est                  | 59 |
| Photo 2 | : Vues de la zone industrielle de la Communance Sud | 59 |
| Photo 3 | : Vues de la zone industrielle des Rondez           | 59 |
| Photo 4 | : Vue du site potentiel de Porrentruy Ouest         | 64 |
| Photo 5 | : Vue de la zone potentielle de Bassecourt Est      | 69 |

## Table des tableaux

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1 : Puissance installée (MWe) dans le monde et croissance 1990-2010 (International Geothermal Association <a href="http://www.geothermal-energy.org">http://www.geothermal-energy.org</a> ) | 14 |
| Tableau 2 : Valeurs énergétiques théoriques selon schéma de principe ci-dessus (Figure 20)  | 27 |
| Tableau 3 : Valeurs théoriques selon schéma simplifié avec ORC et réseau de chauffage urbain  | 29 |
| Tableau 4 : valeurs théoriques pour la valorisation de la basse température   | 30 |
| Tableau 5: Tableau synthétique des lithologies, réservoirs et profondeurs (basé sur les forages de Buix, Montbouton, Knoeringue et Bâle «BS1»)  | 43 |
| Tableau 6 : Géothermie profonde - ressources hydrothermales : exemple des profondeurs attendues à Delémont  | 48 |
| Tableau 7 : Evaluation des sites potentiels   | 51 |
| Tableau 8 : Extrait pour la région de Delémont de l'évaluation des sites potentiels   | 53 |
| Tableau 9 : Extrait pour la région de Porrentruy de l'évaluation des sites potentiels   | 60 |
| Tableau 10 : Extrait pour la région de Bassecourt de l'évaluation des sites potentiels  | 65 |

# 1. Introduction

## 1.1 Cadre

Notre démarche s'inscrit dans le cadre de la politique énergétique 2035 du canton du Jura. Dans le contexte actuel de croissance de la demande énergétique et d'un probable abandon de la filière nucléaire au niveau national, le besoin de diversification des sources d'approvisionnement énergétique et électrique en particulier sera une préoccupation permanente dans les années à venir à l'échelle nationale et cantonale.

Dans ce cadre, il nous a paru nécessaire de nous pencher sur le potentiel de la géothermie profonde pour l'approvisionnement énergétique futur du canton. La géothermie est qualifiée de « profonde » lorsqu'elle a pour objectif la production de fluides géothermaux suffisamment chauds pour être utilisés directement dans des réseaux de chauffage à distance ou pour la production d'électricité. Elle se distingue ainsi de la géothermie superficielle nécessitant la combinaison d'une sonde géothermique à une pompe à chaleur. Celle-ci est destinée essentiellement à la production d'eau chaude sanitaire et de chauffage de bâtiments individuels.

La géothermie profonde représente une source d'énergie indigène, propre, quasiment illimitée et pouvant fournir de l'électricité en continu indépendamment des conditions météorologiques tout en ayant un faible impact sur le paysage. Le degré de maturité technologique ainsi que la problématique de la sismicité induite posent néanmoins des défis qu'il s'agira de relever.

## 1.2 Objectifs

L'objectif de cette étude est d'établir le potentiel de production électrique et, dans une moindre mesure, thermique de la géothermie profonde dans le canton du Jura ainsi que d'identifier des sites potentiellement favorables à l'implantation d'un ou plusieurs projets pilotes.

Pour ce faire, les différents concepts de géothermie profonde, à savoir les systèmes dits « hydrothermaux » et ceux dits « pétrothermaux », ainsi que les technologies existantes de conversion électrique et de valorisation de la chaleur sont étudiés dans le contexte géologique et énergétique cantonal. Les opportunités ainsi que les risques associés à ces technologies sont abordés et illustrés par des exemples de projets en Suisse et à l'étranger.

L'étude du potentiel à proprement parler est guidée d'une part par l'établissement des conditions géologiques propres au canton aux profondeurs requises (4 à 5 km) et, d'autre part, par la définition des contraintes et besoins en surface. Une approche systématique est menée au moyen d'un système d'information géographique (SIG) permettant une analyse multicritère.

Finalement, une dizaine de sites potentiels sont analysés en fonction des conditions locales et leur adéquation pour l'implantation de projets pilotes est évaluée.

### 1.3 Besoins actuels et futurs du canton (chaleur et électricité)

La consommation d'énergie en Suisse a été multipliée par 3 au cours des 50 dernières années, et dépend à plus de 70% des énergies non-renouvelables importées (gaz naturel et produits pétroliers). La différence provient essentiellement de l'énergie hydraulique et dans une moindre proportion du bois.

En moins de 20 ans, la consommation en électricité du canton du Jura a passé de 372 à 503 GWh/an, avec une croissance annuelle moyenne de 1.73%. En 2008, cela représente 7'361 kWh par habitant (légèrement inférieur à la moyenne suisse). La production (hydraulique) du Jura en 2004 a été de 31GWh. Cela représente 7% de la consommation du canton pour la même année.

En 2009, la consommation jurassienne toutes énergies confondues atteint 2200 GWh, cela représente 31'440 kWh par habitant. Elle équivaut à 512 GWh/an pour l'électricité, à 700 GWh/an pour le pétrole et à 500 GWh/an pour le gaz.

#### Evolution de la consommation d'électricité du canton du Jura (GWh)

|                                   | 1990       |             | 2010       |             | 2035       |             |
|-----------------------------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
| Renouvelable existant 2010        | 135        | 36%         | 176        | 34%         | 176        | 26%         |
| NEW Renouvelable géothermie 2035* | 0          | 0%          | 0          | 0%          | 334        | 48%         |
| NEW Renouvelable 2010-2035        | 0          | 0%          | 0          | 0%          | 52         | 8%          |
| Autre (non renouvelable)          | 237        | 64%         | 336        | 66%         | 180        | 26%         |
| <b>Total</b>                      | <b>372</b> | <b>100%</b> | <b>512</b> | <b>100%</b> | <b>690</b> | <b>100%</b> |

\* Pour 3 sites de géothermie profonde avec une moyenne de 5 doublets par site

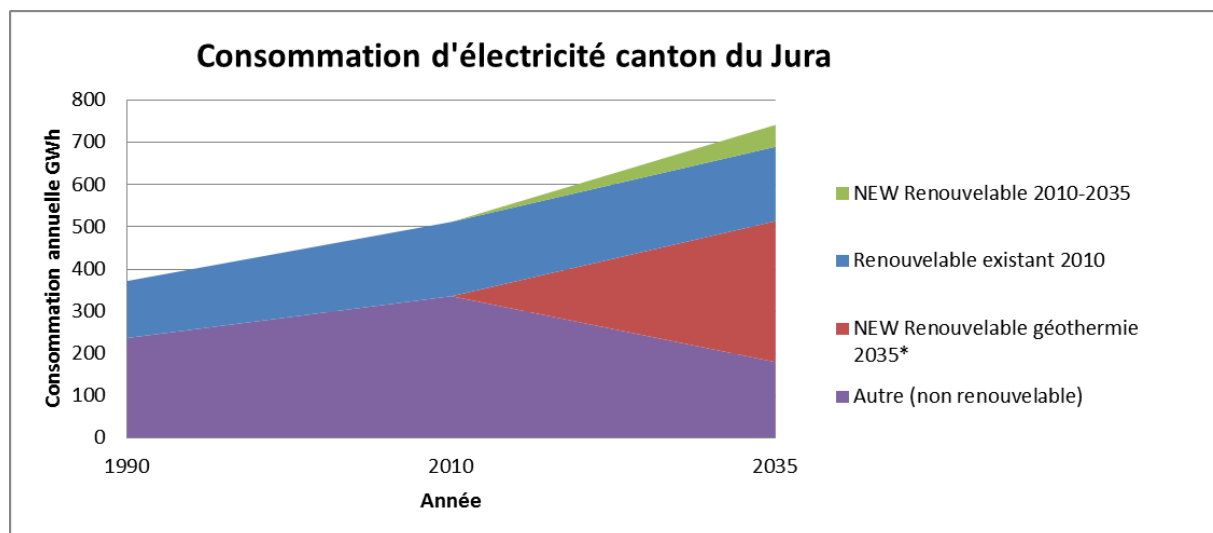


Figure 1 : Perspective de consommation de l'énergie électrique en 2035 pour le Canton du Jura, Source : « consommation et approvisionnement en énergie du canton du Jura » Weinmann-Energie SA du 26 mai 2011



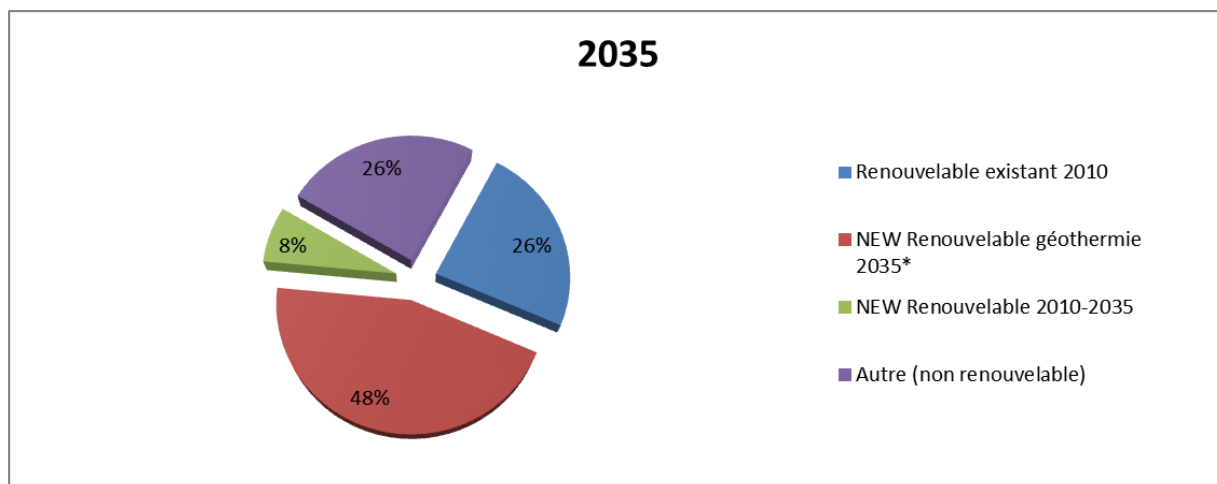


Figure 2 : Perspective de provenance de l'énergie électrique en 2035 pour le Canton du Jura, Source : « consommation et approvisionnement en énergie du canton du Jura » Weinmann-Energie SA du 26 mai 2011

Les figures 1 et 2 montrent clairement le potentiel que représente la géothermie profonde pour la production d'électricité dans la République et Canton du Jura (RCJU). En effet, avec trois centrales géothermiques, la majorité des besoins d'électricité renouvelable à l'horizon 2035 pourrait être couverte par la géothermie profonde. De plus, une part de la consommation actuelle de chaleur produite au moyen de combustibles fossiles pourrait être remplacée par la chaleur résiduelle des centrales géothermiques via la construction ou l'agrandissement de réseaux de chauffage à distance.

## 2. La production d'énergie grâce à la géothermie profonde

### 2.1 Définitions et potentiels

#### 2.1.1 Géothermie profonde / superficielle, de haute énergie / basse énergie

L'énergie géothermale peut être valorisée au moyen de différents procédés qui se distinguent essentiellement par la profondeur et la température de la ressource.

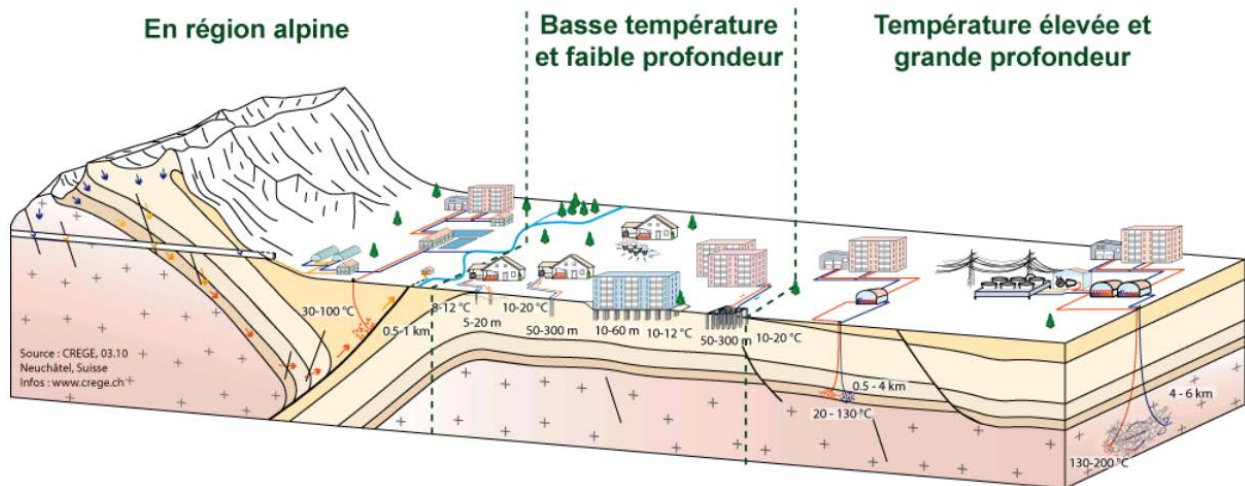


Figure 3 : Différentes utilisations de l'énergie géothermale (GREGE, 03.10, Neuchâtel. [www.crege.ch](http://www.crege.ch))

Le schéma ci-dessus s'applique à des régions continentales et des conditions géologiques telles que nous les connaissons en Suisse. Il faut relever ici que dans les régions du monde où règne une activité volcanique ou tectonique importante, des ressources géothermales de haute enthalpie (ou haute énergie) peuvent être accessibles à de faibles profondeurs. Ce sont d'ailleurs ces régions qui représentent à l'heure actuelle l'essentiel de la production d'électricité d'origine géothermique dans le monde.

En Suisse et dans le canton du Jura en particulier, les ressources géothermales de basse température et de faible profondeur (jusqu'à 400 m environ) peuvent être exploitées de différentes manières :

- Sondes géothermiques verticales et champs de sondes géothermiques
- Collecteurs enterrés (serpentins, corbeilles énergétiques, etc.)
- Géostructures énergétiques (pieux de fondation, etc.)
- Utilisation de la chaleur des nappes phréatiques et des sources
- Eaux de drainage des tunnels

La relativement faible température de ces ressources implique généralement l'utilisation d'une pompe à chaleur pour extraire une énergie utilisable à des fins de chauffage des bâtiments. Le potentiel des ressources de faible profondeur ne fait pas l'objet d'une évaluation dans le cadre de ce rapport.

On parle généralement de géothermie profonde ou de moyenne à haute énergie dès qu'une utilisation directe de l'énergie géothermique (sans pompe à chaleur) est possible. A partir de 90 °C environ, une cogénération d'électricité devient envisageable et aux alentours de 150 °C, celle-ci peut devenir l'objectif premier d'un projet d'exploitation géothermique. En Suisse, la température du sous-sol augmente en moyenne de 30 °C par km. Les projets de géothermie profonde à vocation première de production de courant électrique ont par conséquent une profondeur-cible de plus de 4000 m.

Deux méthodes permettent une exploitation des ressources géothermales profondes :

- l'exploitation de la chaleur des aquifères profonds (systèmes dits « hydrothermaux »)
- les systèmes géothermiques stimulés qui permettant une extraction directe de la chaleur de la roche (systèmes dits « pétrothermaux »).

Le présent rapport fait le point sur ces deux technologies et se concentre sur la seconde en particulier au vu de la géologie profonde du canton du Jura et de l'absence d'aquifères à grande profondeur (3.1).

## 2.1.2 Systèmes hydrothermaux et petrothermaux

Deux facteurs fondamentaux déterminent le rendement d'un projet de géothermie profonde :

- La température du réservoir
- La perméabilité de la roche permettant à des volumes d'eau suffisants de circuler entre les forages de production et d'injection.

Les projets de géothermie profonde souffrent d'un conflit d'intérêt fondamental entre ces deux facteurs : afin de maximiser le rendement et l'efficacité énergétique, une température élevée est recherchée, ce qui implique des réservoirs situés à de grandes profondeurs. Cependant, l'augmentation de la profondeur s'accompagne d'une compaction croissante des roches sédimentaires qui perdent ainsi progressivement leur porosité et leur perméabilité pourtant nécessaires à de hauts débits. De manière générale, les meilleures qualités de réservoir se situent à de faibles profondeurs. Une solution à ce conflit d'intérêt est apportée par ce que l'on nomme la « stimulation du réservoir », à savoir l'augmentation de la perméabilité naturelle par injection d'eau sous pression dans la roche (Paragraphe 2.2.3).

Deux types principaux de systèmes géothermiques profonds peuvent ainsi être différenciés :

- **Les systèmes hydrothermaux** : ces systèmes exploitent des aquifères profonds naturels : formations rocheuses sédimentaires perméables, socle cristallin altéré ou encore grands systèmes de failles perméables. La technologie requise pour l'exploitation de tels systèmes est en grande partie maîtrisée et mise en œuvre de façon quasi-routinière. Des conditions géologiques très spécifiques sont par contre requises, ce qui limite grandement le potentiel géographique de cette méthode. Le risque d'exploration ne peut être sous-estimé !

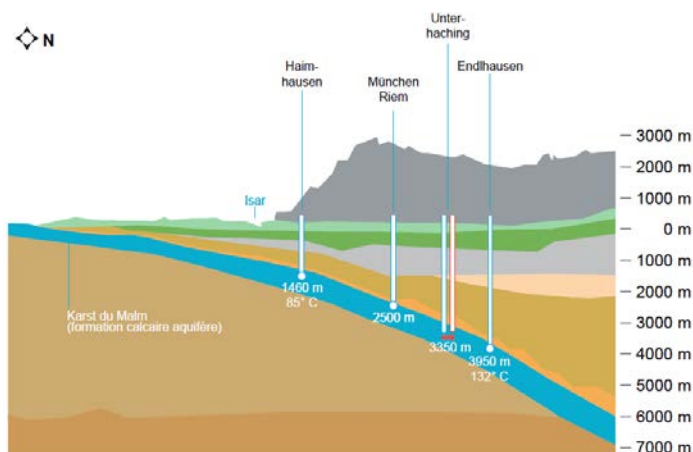


Figure 4 : Principe des systèmes hydrothermaux exploitant un aquifère profond, exemple de la région de Munich

- **Les systèmes pétrothermaux ou EGS** (*Enhanced Geothermal Systems*, systèmes géothermiques stimulés) : les dénominations anglaises HDR (Hot Dry Rocks), HWR (Hot Wet Rocks) ou encore HFR (Hot Fractured Rocks) sont également fréquemment utilisées. Les formations rocheuses présentant une faible ou une très faible perméabilité sont concernées, ce qui est le cas des roches du socle cristallin (granite, gneiss) mais aussi de certaines roches sédimentaires compactes. Ces réservoirs doivent être

stimulés artificiellement par la création ou l'élargissement de fissures ou de fractures existantes. La technologie nécessaire à la réalisation de tels systèmes se trouve encore dans une phase de développement précoce et a été insuffisamment testée. Une base de données statistique fait encore défaut en l'absence de projets ayant fonctionné sur une durée suffisante dans le monde. A l'opposé des systèmes hydrothermaux, le potentiel de cette technologie est par contre immense vu que toute roche imperméable, les roches cristallines en particulier, peut à priori être exploitée. Le sous-sol de la Suisse est essentiellement composé de roches très peu perméables aux profondeurs requises pour une exploitation rentable d'un projet de géothermie profonde à vocation de production électrique.

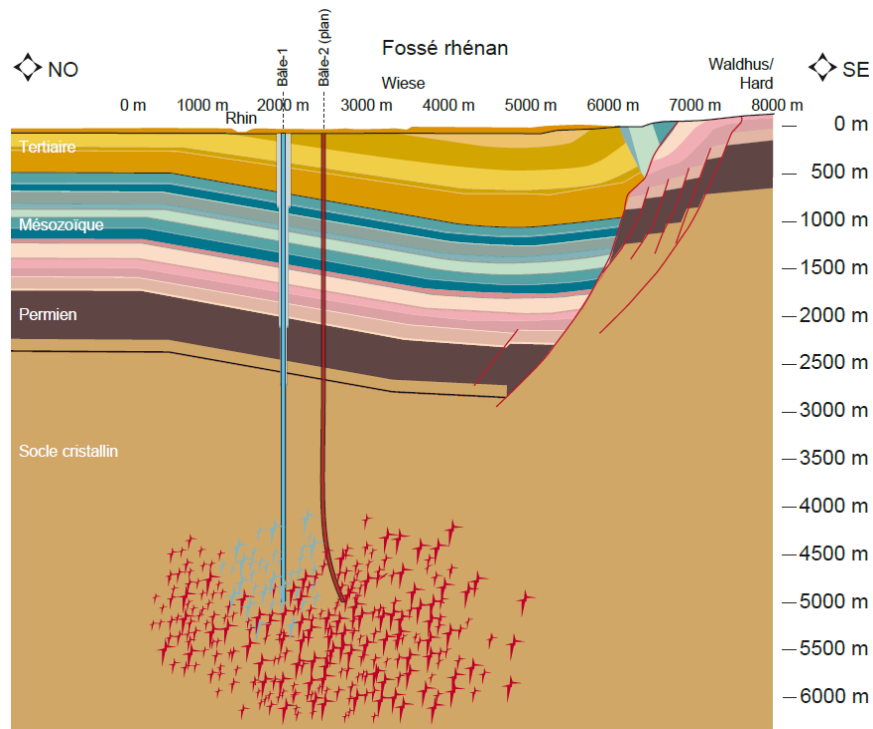


Figure 5 : Principe des systèmes pétrothermaux exploitant la chaleur des roches cristallines, projet DHM Bâle

Il faut finalement relever que la classification ci-dessus représente les deux pôles d'un continuum, la nature nous offrant toute une palette de possibilités intermédiaire :

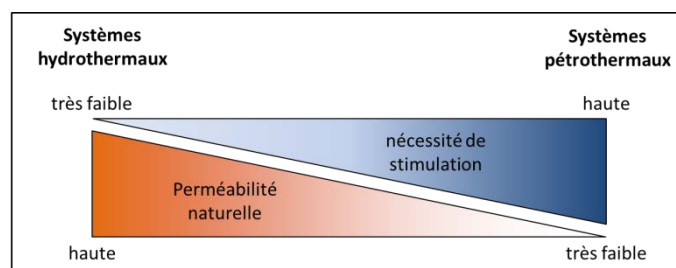


Figure 6 : Perméabilité naturelle et besoin de stimulation des systèmes géothermiques profonds

### 2.1.3 Potentiel de la géothermie profonde en Suisse et dans le monde pour la production d'électricité

#### La Géothermie profonde dans le monde

La production d'électricité à partir de sources géothermales a été développée depuis une centaine d'années. Les premiers essais de production à partir de vapeur ont eu lieu à Lardarello en Italie en 1904. Les développements se sont ensuite concentrés à l'échelle mondiale sur les régions volcaniques offrant la possibilité d'atteindre des ressources chaudes (> 200 °C) à relativement faible profondeur et de produire de l'électricité directement à partir de vapeur sèche ou humide. L'essentiel de la production d'électricité d'origine géothermique se concentre au niveau mondial à l'heure actuelle dans des pays bénéficiant d'un environnement géologique favorable à l'exploitation de tels systèmes. Ils se situent ainsi pour l'essentiel dans les zones de forte activité tectonique et en particulier autour de la « ceinture de feu » du Pacifique (Figure 7). La taille moyenne typique d'une telle installation est de l'ordre de 50 MWe.

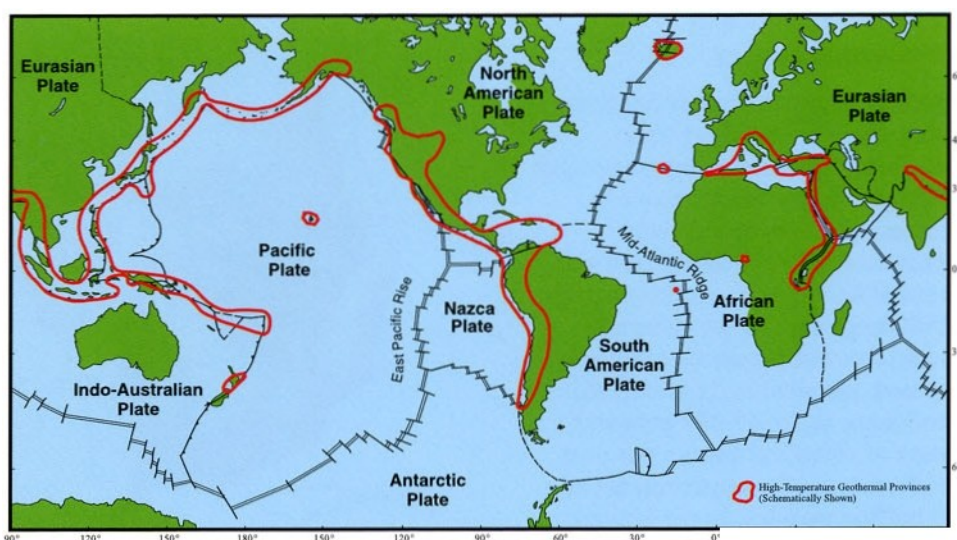


Figure 7 : Représentation schématique des provinces géothermales de haute température

Le tableau ci-dessous énumère les puissances installées (MWe) des centrales géothermiques des principaux pays producteurs dans le monde ainsi que la croissance sur les 20 dernières années.

| Pays               | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2010 | Croissance 1990-2010 |
|--------------------|------|------|------|------|------|----------------------|
| USA                | 2775 | 2817 | 2228 | 2544 | 3093 | 11%                  |
| Philippines        | 891  | 1227 | 1909 | 1931 | 1904 | 114%                 |
| Indonésie          | 145  | 310  | 590  | 797  | 1197 | 727%                 |
| Mexique            | 700  | 753  | 755  | 953  | 958  | 37%                  |
| Italie             | 545  | 632  | 785  | 790  | 843  | 55%                  |
| Nouvelle Zélande   | 283  | 286  | 437  | 435  | 628  | 122%                 |
| Islande            | 45   | 50   | 170  | 322  | 575  | 1189%                |
| Japon              | 215  | 414  | 547  | 535  | 536  | 150%                 |
| El Salvador        | 95   | 105  | 161  | 151  | 204  | 115%                 |
| Kenya              | 45   | 45   | 45   | 127  | 167  | 271%                 |
| Costa Rica         | 0    | 55   | 143  | 163  | 166  | nouveau              |
| Nicaragua          | 35   | 70   | 70   | 77   | 88   | 151%                 |
| Russie (Kamchatka) | 11   | 11   | 23   | 79   | 82   | 645%                 |

|                           |             |             |             |             |              |            |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|------------|
| Turquie                   | 21          | 20          | 20          | 20          | 82           | 298%       |
| Papouasie Nouvelle Guinée | 0           | 0           | 0           | 39          | 56           | nouveau    |
| Guatemala                 | 0           | 33          | 33          | 33          | 52           | nouveau    |
| Portugal (Açores)         | 3           | 5           | 16          | 16          | 29           | 867%       |
| Chine                     | 19          | 29          | 29          | 28          | 24           | 25%        |
| France (Guadeloupe)       | 4.2         | 4.2         | 4.2         | 15          | 16           | 281%       |
| Ethiopie                  | 0           | 0           | 8.5         | 7           | 7.3          | nouveau    |
| Allemagne                 | 0           | 0           | 0           | 0.2         | 6.6          | nouveau    |
| Autriche                  | 0           | 0           | 0           | 1           | 1.4          | nouveau    |
| Australie                 | 0           | 0.2         | 0.2         | 0.2         | 1.1          | nouveau    |
| Thaïlande                 | 0.3         | 0.3         | 0.3         | 0.3         | 0.3          | 0%         |
| Argentine                 | 0.7         | 0.6         | 0           | 0           | 0            | -100%      |
| <b>Total</b>              | <b>5832</b> | <b>6867</b> | <b>7974</b> | <b>9064</b> | <b>10717</b> | <b>84%</b> |

Tableau 1 : Puissance installée (MWe) dans le monde et croissance 1990-2010 (International Geothermal Association <http://www.geothermal-energy.org>)

Il est à noter que les technologies actuelles permettent au moyen de systèmes binaires une production électrique à partir de source de beaucoup plus basse température, aux alentours de 100 °C déjà (2.3). Cela a permis ces dernières années à des pays comme l'Allemagne et l'Autriche ne bénéficiant pas d'un environnement volcanique d'apparaître dans la liste des pays producteurs d'électricité (Tableau 1).

### La géothermie profonde en Suisse

La Suisse, à l'instar de l'Allemagne ou de l'Autriche ne dispose pas d'un environnement volcanique permettant la production directe d'électricité à partir de vapeur. Les températures nécessaires à la production d'électricité doivent être recherchées à de plus grandes profondeurs (gradient géothermique moyen de 30 °C / km). La géothermie profonde a connu une première phase d'essor en Suisse pour la production de chaleur uniquement, sous l'impulsion d'un programme d'incitation de la Confédération couvrant une partie des risques d'exploration liés aux forages profonds durant les années 1987 à 1998. 14 forages dans des aquifères profonds furent réalisés durant cette période (Figure 8). Neuf sont exploités commercialement à ce jour. Toutefois, par rapport aux objectifs de réussite fixés dans les contrats avec la Confédération, seules quatre réalisations géothermiques ont été considérées comme des succès (Riehen, Bassersdorf, Bad Schinznach et Lavey-les-Bains) et deux comme des succès partiels (Saillon et Kreuzlingen). Pour ces projets, les températures des eaux profondes captées varient entre 26 et 69° C et les débits de production entre 4 et 23 l/s. Les puissances géothermiques calculées en tête de puits sont comprises entre 0.3 et 5.5 MWth (Groupe de travail PGG, 2011).

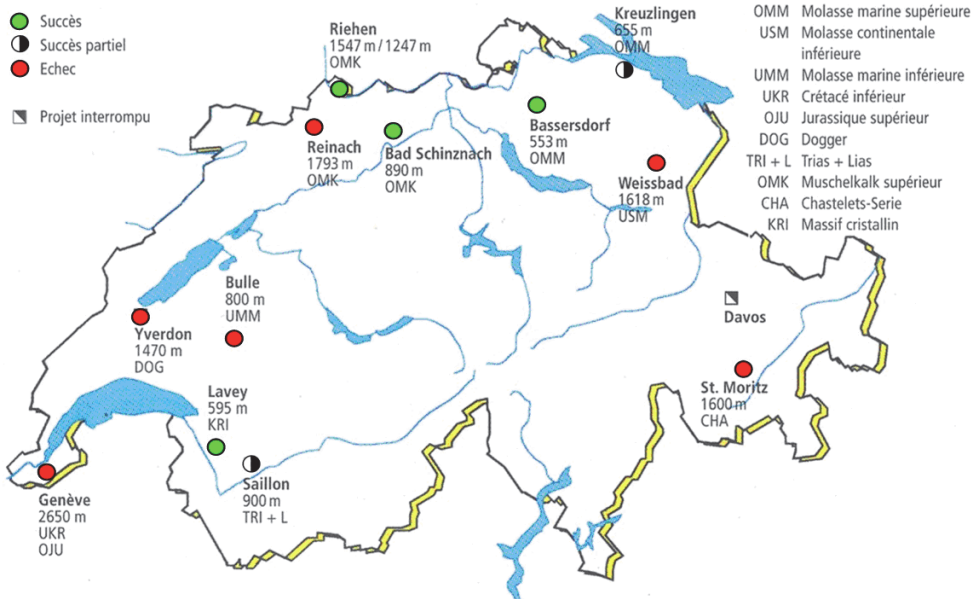


Figure 8 : Forages géothermiques profonds réalisés en Suisse entre 1987 et 1998 (d'après OFEN, 1998)

La fin du programme d'incitation de la Confédération en 1998 a également marqué le coup d'arrêt de cette première phase de développement de la géothermie profonde en Suisse.

Il faudra attendre 2009 et la mise en place d'un nouveau programme d'incitation de la Confédération sous forme à nouveau de couverture partielle des risques d'exploration pour voir reflourir de nouveaux projets en Suisse. Ce nouveau programme, placé sous l'égide de Swissgrid, ne s'adresse cette fois qu'à des projets à vocation de production d'électricité. Les projets les plus avancés ayant obtenu ou pouvant prétendre à cette couverture des risques sont actuellement

- AGEPP Lavey-les-Bains (VD)
- Ville de St-Gall (SG)
- La Côte (VD)

De nombreux autres projets, à vocation thermique uniquement, se développent également dans toute la Suisse à des degrés de maturité divers. Des études de potentiel ont en outre été réalisées dans plusieurs cantons suisses ces dernières années (VS, VD, NE, FR, GE, ZH, TG, SH).

### Potentiel de production de courant électrique en Suisse

Ce regard sur les premiers développements de géothermie profonde en Suisse et sur les projets actuels pose naturellement la question du potentiel de cette source d'énergie pour la production d'électricité en Suisse. L'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) estime dans le cadre de sa stratégie énergétique une contribution de la géothermie profonde à hauteur de **4.7 TWh/an** à l'horizon 2050 (OFEN, 2011). Des études antérieures (Axpo, 2007) postulent un potentiel technique bien plus important de l'ordre de **17.5 TWh/an** après 2050. L'Institut Paul Scherrer (PSI) calcule quant à lui en 2005 un potentiel « physique » encore bien plus important (PSI, 2005). Ce qu'il ressort de ces différentes études, hormis les incertitudes liées à l'estimation du potentiel d'une technologie encore non-établie, est l'importance de ce potentiel au regard des autres énergies renouvelables en Suisse (Figure 9).

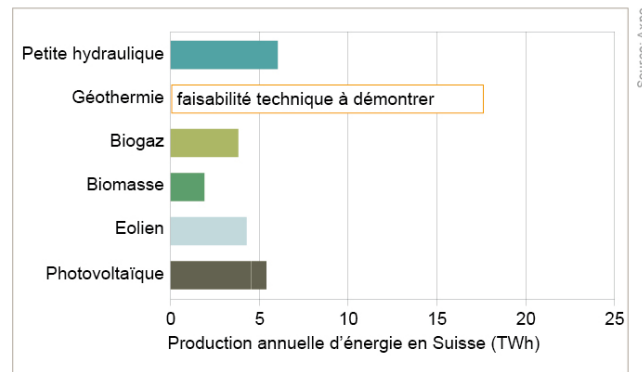


Figure 9 : Potentiel des nouvelles énergies renouvelables en Suisse après 2050 (Axpo, 2007)

Il apparaît tout aussi clairement que l'essentiel de ce potentiel réside dans les systèmes pétrothermaux en roches cristallines peu perméables et exploitables par la technologie EGS. En effet, la technologie des réservoirs stimulés permet *a priori* la réalisation d'une centrale géothermique quasiment n'importe où, indépendamment des conditions géologiques. La faisabilité de la création d'une perméabilité artificielle permanente a été démontrée pour les roches cristallines entre autres lors du projet Deep Heat Mining (DHM) de Bâle (Håring et al., 2008). Aux profondeurs requises pour la production d'électricité, les roches cristallines dominent largement (Figure 8). Qui plus est, moyennant certaines adaptations technologiques, des systèmes pétrothermaux pourraient également être exploités dans des roches sédimentaires. Les projets GeneSys à Hanovre et Gross Schönebeck près de Berlin actuellement en cours de développement devraient en démontrer la faisabilité. Les systèmes hydrothermaux dépendent quant à eux de conditions géologiques particulières, ce qui rend l'évaluation de leur potentiel en Suisse délicate à l'heure actuelle.

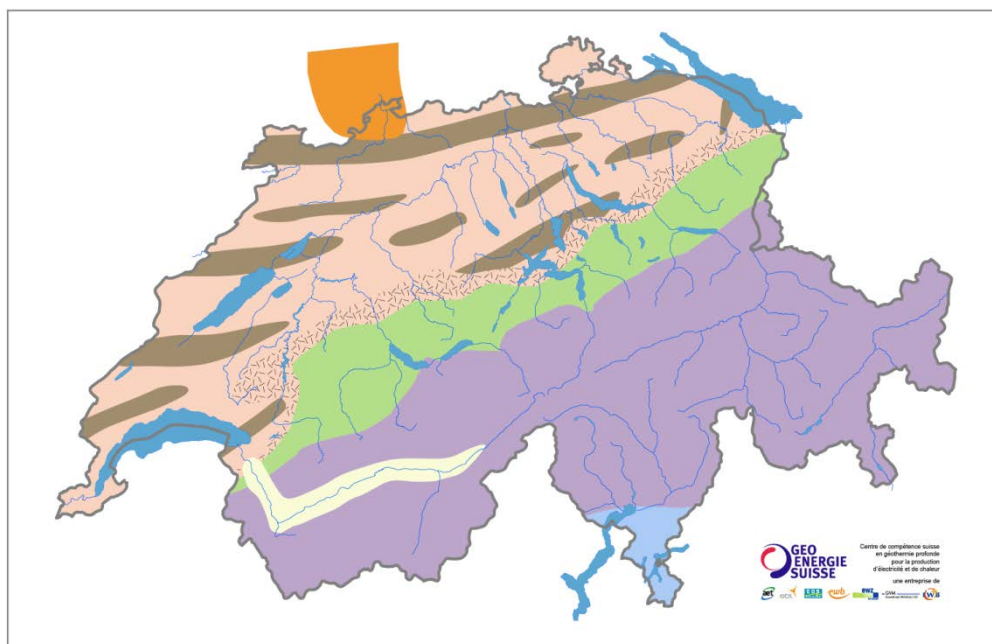


Figure 10 : Représentation schématique de la géologie de la Suisse à une profondeur de 5 km environ. Les roches cristallines du socle (en rose) dominent sous le plateau suisse et le Jura. Les roches du soubassement des Alpes (en mauve) sont trop variables pour être distinguées sur cette carte, mais ici également, les roches cristallines dominent. Les taches brunes représentent schématiquement des fossés sédimentaires anciens dits « Permo-carbonifères » et la bande verte au front des Alpes représente également des roches majoritairement sédimentaires. La région de Bâle (en orange) appartient géologiquement au « fossé rhénan ».

La question du potentiel des systèmes pétrothermaux peut également être abordée sous un angle plus « concret ». Les investigations préliminaires de Geo-Energie Suisse SA montrent qu'une centrale géothermique



EGS réalisée à partir de plusieurs doublets (paires de forages injecteur-producteur) forés depuis un même site pourrait atteindre au moins 20 MWe. En considérant la réalisation à l'échelle du pays de quelques 50 centrales de ce type, c'est une puissance de 1000 MWe qui pourrait être installée, soit celle d'un réacteur nucléaire moderne. Or une centrale géothermique, à l'instar d'une centrale nucléaire, peut délivrer du courant en ruban, c'est-à-dire en continu et indépendamment de la saison ou des conditions météorologiques. La combinaison du fort potentiel à la capacité de générer de l'électricité en ruban en fait une forme d'énergie des plus attractives parmi les nouvelles énergies renouvelables (Figure 11).

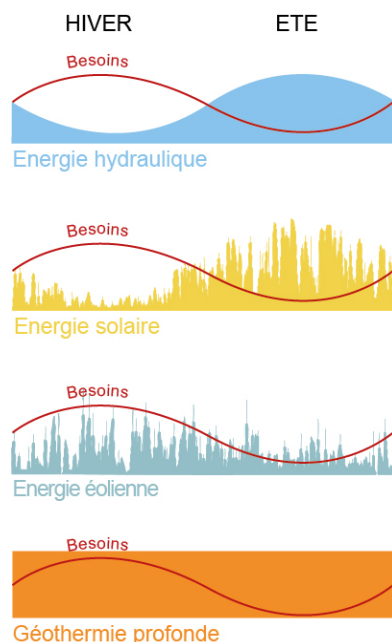


Figure 11 : La géothermie profonde fournit de l'électricité en ruban

## 2.2 Méthodes d'exploration de production de l'énergie géothermique

### 2.2.1 Méthodes d'exploration

Les paramètres géologiques du réservoir géothermal à déterminer durant les phases d'étude d'un projet de géothermie profonde sont pour l'essentiel les suivants:

- Formation géologique, lithologie
- Structures tectoniques, failles
- Perméabilité, conductivité hydraulique
- Température
- Champ de contraintes

Les besoins ne sont pas exactement les mêmes pour un projet hydrothermal ou pétrothermal. Certaines de ces grandeurs peuvent être estimées depuis la surface, essentiellement grâce à des méthodes géophysiques, d'autres ne se laissent mesurer que dans un forage. Nous nous intéresserons ci-dessous brièvement aux méthodes de surface permettant justement de déterminer l'emplacement le plus approprié pour un forage d'exploration.

#### Sismique-réflexion

Cette méthode d'investigation géophysique consiste à envoyer des ondes acoustiques dans le sous-sol et à en enregistrer les échos afin d'en déduire une image de la structure du sous-sol, de manière comparable à celle de l'échographie médicale. Il s'agit de la seule méthode d'investigation géophysique permettant d'imager

directement le sous-sol, ce qui en fait la méthode de prédilection de l'exploration pétrolière par exemple. C'est également la méthode d'exploration géophysique la plus coûteuse.



Figure 12 : Camion vibreur (émetteur) et géophones (récepteurs) durant une campagne de sismique-réflexion. Schaffhouse, mars 2012 (Photo O. Zingg)

Cette méthode permet de fournir des sections verticales du sous-sol (sismique 2D) ou des volumes entiers de données couvrant la surface d'investigation (sismique 3D). La sismique-réflexion, en combinaison avec d'autres informations (en particulier géologie de surface et forages profonds avoisinants) permet d'apporter des informations sur les paramètres suivants :

- Formations géologiques du sous-sol. La sismique-réflexion permet de prédire la profondeur et l'épaisseur d'une formation géologique recherchée. Il peut s'agir de l'épaisseur d'un aquifère potentiel pour un projet hydrothermal ou de la profondeur du toit du socle cristallin pour un projet pétrothermal par exemple. La perméabilité d'une formation géologique, garante du succès d'un projet hydrothermal, ne se laisse par contre pas déterminer directement par sismique-réflexion.
- Présence et géométrie de failles. Des failles importantes présentent parfois une forte conductivité hydraulique et peuvent représenter une cible pour de projets hydrothermaux. De grandes failles régionales peuvent également être associées à un risque de sismicité plus élevé et doivent par conséquent être identifiées dans le cadre de projets pétrothermaux
- Profil de forage prédictif. L'estimation de la profondeur et de l'épaisseur de chaque unité géologique permet une planification optimale d'un forage profond.

## Gravimétrie

Cette méthode consiste à mesurer les subtiles variations de la gravité terrestre et d'en tirer des conclusions sur la répartition des masses dans le sous-sol et donc de la géologie. Il s'agit d'une méthode de potentiel ne permettant pas d'interprétation univoque. Elle doit donc être utilisée en complément d'autres méthodes d'investigation et permet par exemple de valider un modèle géologique du sous-sol dérivé de l'interprétation de sismique-réflexion. Dans certains cas les variations de la gravité peuvent être corrélées à des changements de la porosité des roches. Cette méthode a l'avantage d'être beaucoup plus simple et moins coûteuse à mettre en œuvre qu'une campagne de sismique-réflexion.

## Méthodes électriques et magnétiques

De nombreuses méthodes électriques ou magnétiques permettent de déterminer la conductivité électrique du sous-sol. Ces méthodes permettent d'investiguer des profondeurs faibles à moyennes et ne trouvent pas d'applications pratiques en géothermie profonde. Font exception les mesures dites magnétotelluriques qui permettent grâce à la mesure de champs électriques et magnétiques naturels de déduire la conductivité électrique du sous-sol à de grandes profondeurs. Cette technique est couramment utilisée pour la prospection dans des environnements volcaniques où de puissantes circulations hydrothermales affectent la résistivité électrique de grands volumes du sous-sol. Si cette méthode a déjà fait l'objet de recherches dans des contextes géologiques tels que nous les connaissons en Suisse, elle n'a pas encore débouché sur des applications routinières en exploration géothermique hors des régions volcaniques.

Les autres paramètres (perméabilité, température, champ de contraintes, etc.) d'un réservoir géothermal ne se laissent pas mesurer depuis la surface et sont donc généralement extrapolés ou modélisés à partir de **forages profonds** plus ou moins éloignés dans lesquels ces grandeurs ont été mesurées :

- **la température du réservoir** joue un rôle central sur le rendement d'un futur projet hydrothermal comme pétrothermal. En fonction de la densité et de la qualité des données existantes (mesures dans des forages ou des tunnels), il est possible de modéliser le champ de température afin de faire des prédictions. Des cartes du flux thermique en surface et des températures à 500 m, 1000 m et 2000 m ont ainsi été établies sur la base des mesures disponibles en Suisse (Medici et Rybach, 1995). Une modélisation tridimensionnelle du champ de température a également été entreprise dans le cadre de l'atlas des ressources géothermiques de la Suisse (Signorelli et Kohl, 2006 ; Baujard et al., 2007) La prédiction de la température aux profondeurs requises pour des projets à vocation électrique est malheureusement difficile du fait de la rareté des forages ayant atteint une profondeur de 4 à 5 km et dans lesquels des mesures de température fiables ont été relevées. Les estimations à ces profondeurs sont donc entachées d'une forte incertitude. Il n'y a ainsi que 5 forages de plus de 4000 m pour toute la Suisse !
- **La perméabilité** d'une formation géologique peut être mesurée dans un forage. Pour son estimation en un lieu précis, on en est également réduit à des extrapolations à partir des points de mesure existants. Il faut de plus tenir compte de l'effet de la profondeur sur la compaction des roches et des effets locaux, souvent prépondérants, comme la présence de failles. La recherche de perméabilités élevées se situe au cœur de l'exploration hydrothermale.
- **Le champ de contrainte** détermine la tendance à l'ouverture ou à la fermeture d'une fracture. Sa connaissance est donc importante en prospection hydrothermale. Le champ de contrainte détermine également les résultats et la géométrie de la stimulation d'un réservoir pétrothermal. Comme la température, le champ de contrainte est mesuré dans des forages et extrapolé ou modélisé pour les régions à explorer. L'étude des tremblements de terre naturels permet également d'apporter de précieuses indications sur le champ de contrainte, généralement à grande profondeur.

### 2.2.2 Techniques de forage

#### Foreuses

La réalisation des forages représente la plus grande part des coûts d'un projet de géothermie profonde. Le type de forage et la machine pour le réaliser doivent ainsi être choisis avec soin. Les critères déterminants sont la profondeur totale à forer ainsi que le diamètre de l'ouvrage. En effet, la foreuse doit posséder la puissance suffisante pour pouvoir supporter la totalité de la tige de forage et exercer un couple suffisant pour assurer la rotation adéquate de l'outil. Plusieurs types de foreuses sont disponibles sur le marché en fonction de la profondeur à atteindre (exemples Figure 13 et Figure 14).



Figure 13 : Foreuse Wirth B12 (charge maximale 152 T) à Schlattigen (TG), avril 2011. Exploration géothermique, profondeur atteinte 1508 m (Photo O. Zingg)



Figure 14 : Foreuse Bentec Euro Rig 350 AC (charge maximale 350 T) à Noville (VD). Exploration gazière par forage dévié, longueur totale 4298 m (Photo Daniel Willi SA)

### Forages verticaux et déviés

En fonction des objectifs, les forages profonds peuvent être réalisés de manière verticale, déviée, voire horizontale. Les technologies de guidage de l'outil ont d'abord été mises en œuvre afin de maintenir le forage le plus vertical possible avant d'être utilisées pour le dévier à des degrés toujours plus importants et avec des géométries de plus en plus complexes. Les deux technologies principales de forages directionnels sont :

- *Mud Motor*, ou turbine entraînée par les boues de forage. Ce système permet de dévier le forage par étape grâce à une pièce coudée située en amont du trépan (Figure 15). La rotation du trépan au moyen de la turbine uniquement (sans rotation de la tige) permet ainsi d'imprimer une courbure à la trajectoire. En surimposant une rotation de la tige au moyen du moteur de forage principal en surface, le forage peut être poursuivi de manière linéaire, quoiqu'avec un diamètre légèrement supérieur à celui du trépan.

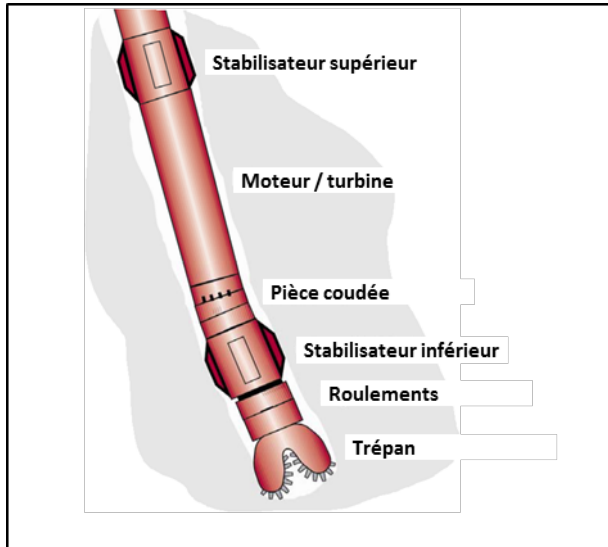


Figure 15 : Forages directionnels : *Mud Motor* (d'après A.Picksak, Bohrmeisterschule Celle)

- *Rotary Steerable System*, une variante du système *Rotary* impliquant une rotation continue de la tige de forage en même temps qu'une déviation grâce à des éléments orientables sur commande situés en amont du trépan de forage (Figure 16). Cette méthode présente de nombreux avantages par rapport à la turbine seule. Elle permet en particulier une avancée du forage continue et sans à-coups résultant en une trajectoire plus régulière et des frictions sur la tige de forage plus faibles. Cette méthode est systématiquement utilisée lors de fortes déviations ou de forages horizontaux. Elle est par contre plus coûteuse à mettre en œuvre.

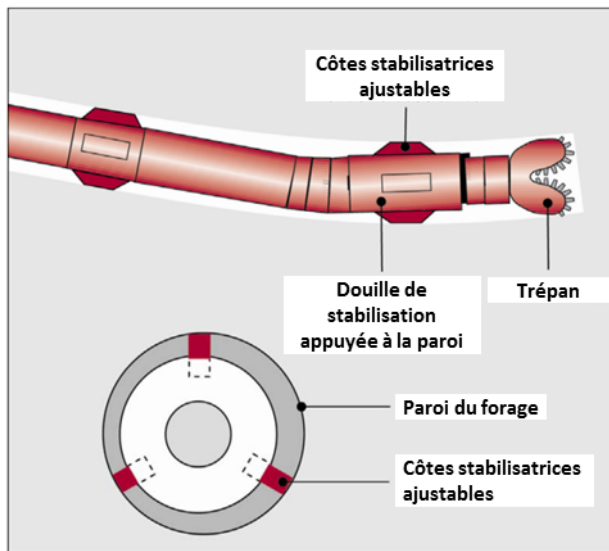


Figure 16 : Forages directionnels : *Rotary Steerable System* (d'après A.Picksak, Bohrmeisterschule Celle)

Les techniques modernes de contrôle directionnel permettent ainsi de réaliser des géométries de forage très complexes pour atteindre des objectifs divers. En géothermie profonde, il est par exemple courant d'incliner un forage afin d'intercepter la plus grande section possible d'une zone de faille supposée perméable. Les forages déviés et horizontaux ouvrent également de nouvelles perspectives pour l'exploitation des systèmes pétrothermaux.

### Outils de forage

Le choix de l'outil de forage ou trépan se fera en fonction du type de roche à forer et de l'optimisation du rapport entre sa durée de vie, son efficacité et son coût. Les principaux types d'outils sont les tricônes et les outils de

forage à diamants polycristallin (PCD) utilisés pour les roches dures comme le granit ou le gneiss p. ex. (Figure 17). Ces derniers sont bien plus résistants mais également beaucoup plus coûteux que les tricônes classiques.

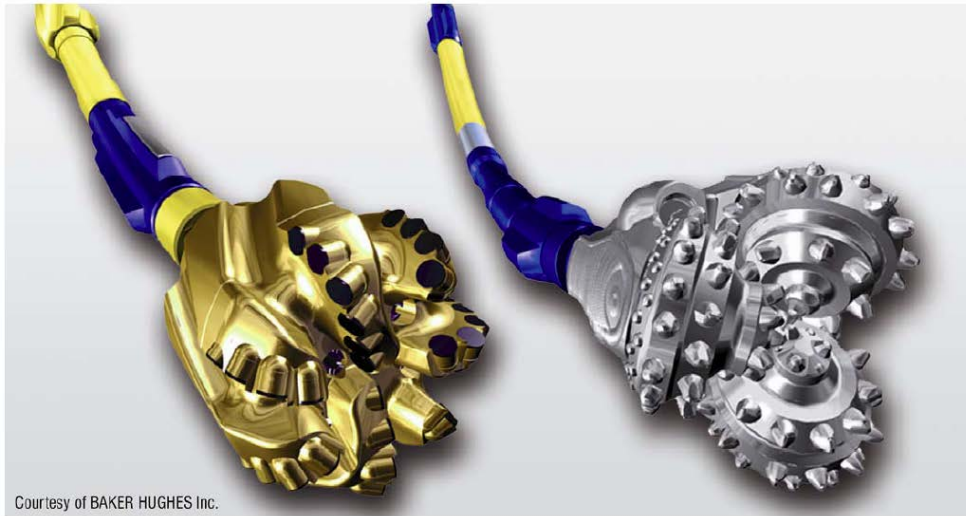


Figure 17 : Outils de forage PCD (gauche) et tricône (droite) (Source : Baker Hughes Inc.)

### Boues de forage

Les forages profonds sont toujours réalisés grâce au procédé *Rotary* et à l'emploi de fluides de forages. Ces derniers ont diverses fonctions :

- Entraînement de la turbine
- Stabilisation des parois du trou
- Prévention de remontée de fluides en surpression
- Entraînement et évacuation des débris de forages (cuttings)
- Lubrification et refroidissement de l'outil de forage

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

### Tubage et cimentation

Le tubage et la cimentation ont pour objectif d'assurer la stabilité des parois du forage, d'empêcher la venue de fluides d'une formation géologique dans le trou ou d'empêcher la communication entre deux aquifères. Il n'est pas possible de réaliser un forage profond sans le tuber au fur et à mesure pour des raisons de stabilité de l'ouvrage et de sécurité. Après la pose de chaque tubage, le forage reprend avec un diamètre inférieur au précédent, ce qui conduit *in fine* à la réalisation d'un forage de manière télescopique. Plus le forage sera profond, plus le nombre de tubes à insérer sera grand et ainsi plus le diamètre initial du forage sera important. Cela a bien sûr une incidence directe sur les coûts qui augmentent exponentiellement avec la profondeur à atteindre. Le forage Basel-1 a par exemple été initié avec un diamètre de 32" (81 cm) pour y installer finalement un *liner* de production de 7 5/8 " (19 cm) (Figure 18) !

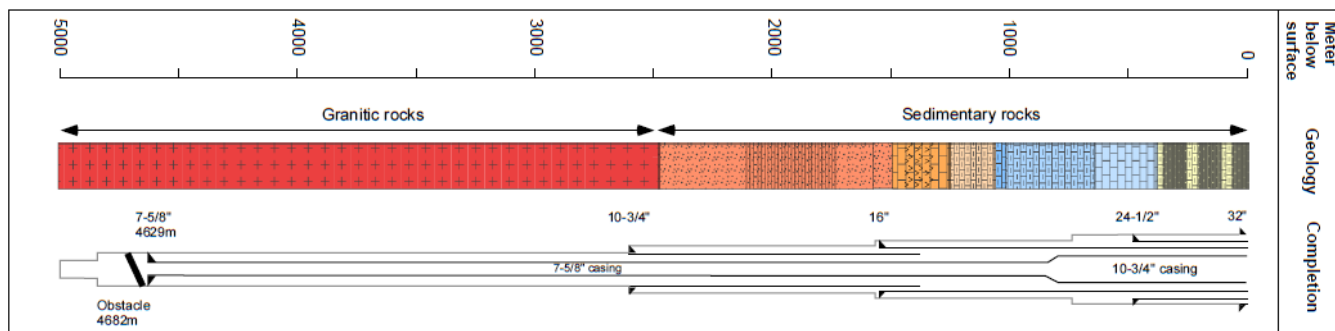


Figure 18 : Schéma et diamètres de tubage du forage Basel-1 (Ladner, 2009)

Il faut noter que des techniques de tubage alternatives comme le *coil tubing* ou les *expandables tubings* sont disponibles sur le marché mais ne s'appliquent guère à la problématique de la géothermie profonde.

La cimentation est garantie à terme de la stabilité et de la sécurité du forage et doit être effectuée avec soin. Les forages géothermiques posent des défis particuliers en matière de cimentation à cause de la dilatation ou de la contraction thermique à laquelle l'ouvrage est soumis durant les différentes phases d'exploitation.

### 2.2.3 Stimulation du réservoir

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

En **géothermie hydrothermale**, le but est d'augmenter localement la perméabilité dans le voisinage immédiat du forage (quelques mètres, éventuellement quelques dizaines de mètres) afin d'établir la connexion avec des zones de la formation géologique possédant une perméabilité naturellement plus élevée comme une zone de faille par exemple. Si de telles zones n'existent pas ou sont trop éloignées du puits, l'effet de la stimulation demeurera local et ne permettra pas d'augmenter sensiblement les débits.

En **géothermie pétrothermale**, la stimulation du réservoir relève du principe fondamental de la méthode vu que cette dernière est mise en œuvre dans des roches « étanches ». Dans ce cas, la stimulation vise à créer une zone de dimension déterminée dans laquelle une perméabilité est artificiellement créée afin de permettre à l'eau de circuler entre deux puits avec un débit suffisant au fonctionnement du système.

#### Stimulation chimique

Cette stimulation est fréquemment mise en œuvre dans des systèmes hydrothermaux. Elle consiste généralement à injecter des acides (chlorhydrique, fluorhydrique, ...) dans la formation rocheuse. Cette méthode est particulièrement efficace pour des formations géologiques calcaires. Cette technique est également appliquée de façon routinière en prospection pétrolière.

#### Stimulation hydraulique, « fracing »

Cette méthode consiste à injecter rapidement de grands volumes de fluides (eau, éventuellement avec additifs) à une pression supérieure à celle à laquelle la roche peut résister (pression de *fracing*). La roche est fracturée et de nouvelles fissures sont créées. En géothermie hydrothermale, cette méthode permet de connecter le puits à une éventuelle zone de perméabilité élevée. En prospection gazière, cette méthode est employée dans de beaucoup plus grandes dimensions pour la production de gaz à partir de roches peu perméables (*tight gas ou shale gas*).

#### Stimulation hydraulique, cisaillement

Il s'agit de la méthode employée en géothermie pétrothermale. Il n'est pas ici question de créer de nouvelles fractures mais bien plus de d'utiliser le réseau de fractures et les zones de faiblesse présentes naturellement



dans la roche et de les « stimuler » en y provoquant un mouvement de cisaillement grâce à l'injection d'eau sous pression. Ce mécanisme est particulièrement efficace dans les roches compétentes comme le granit ou le gneiss et se produit en dessous de la pression de *fracing* de la roche.

Divers projets pétrothermaux en roches cristallines (Soultz-sous-Forêts, Bâle) ont pu démontrer que la perméabilité naturelle de la roche peut être augmentée de plusieurs ordres de grandeur et que ce gain est durable, c'est-à-dire que les fissures stimulées ne se referment pas une fois l'injection terminée. Ce phénomène s'explique par la rugosité des parois de la fissure et porte le nom de *self-propping effect* (Figure 19).

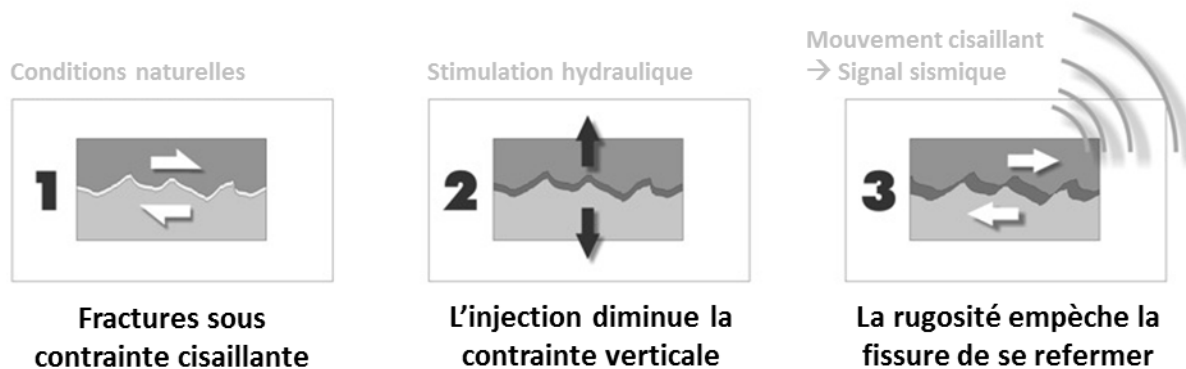


Figure 19 : Principe de la stimulation hydraulique par cisaillement (d'après S. Baisch, Q-con GmbH)

## 2.3 Les différentes manières de valoriser la géothermie selon les degrés d'enthalpie

### 2.3.1 La géothermie très basse enthalpie (température inférieure à 20°C)

Elle concerne les aquifères peu profonds où l'eau est soutirée à une température inférieure à 20°C. Avec l'installation d'une pompe à chaleur (PAC), ce système est utilisé pour le chauffage des bâtiments. Le rendement énergétique du système peut atteindre un COP (*Coefficient Of Performance*) de 4. (Pour 1 kWh d'électricité consommé, 4 kWh de chaleur sont récupérés dans l'aquifère).

Cette faible température peut aussi être utilisée pour le rafraîchissement des bâtiments sans machine frigorifique en période estivale.

### 2.3.2 La géothermie basse enthalpie (20 à 100°C)

Appelée également basse température, elle consiste à utiliser une eau à moins de 90°C. A partir d'une source chaude comprise entre 80 et 90 °C, il est possible, au moyen d'un échangeur, de transférer la chaleur issue de la géothermie à un réseau de chaleur urbain. Ainsi, l'installation d'une pompe à chaleur n'est plus nécessaire, ce qui diminue drastiquement la consommation d'électricité par rapport au cas 2.3.1.

### 2.3.3 La géothermie moyenne enthalpie (100 à 160°C)

La géothermie à moyenne température ou moyenne enthalpie se présente sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à une température comprise entre 100 et 160°C. Avec ces niveaux de température, il est possible de produire de l'électricité à l'aide de groupe ORC (Organic Rankine Cycle) ou du froid à l'aide de système à absorption. La chaleur résiduelle en sortie d'ORC (80-85°C) peut être valorisée dans un réseau de chauffage urbain.

### 2.3.4 La géothermie haute enthalpie (température supérieure à 160°C)

La géothermie haute enthalpie ou haute température concerne les fluides qui atteignent des températures supérieures à 160°C. Les réservoirs exploités sont généralement localisés entre 1'000 et 3'000 mètres de profondeur et se situent dans des zones de gradient géothermique très élevées qui n'existent pas en Suisse. Ces sources sont principalement utilisées pour la production d'électricité.

## 2.4 Objectif visé pour la valorisation de la chaleur

Le présent chapitre illustre les possibilités de valorisation en cascade de la chaleur produite au moyen d'un doublet géothermique de moyenne enthalpie et fournit les puissances et rendements théoriques attendus à chaque étape. Pour ces calculs, une température de 150 °C et un débit de 100 l/s ont été supposés. Ces valeurs correspondent en l'état actuel des connaissances aux attentes pour un réservoir stimulé (EGS) à une profondeur de 4500 m environ. Le modèle de valorisation suivant a été considéré :

|     |   |      |  |
|-----|---|------|--|
| 150 | → | 90°C | Valorisation de la chaleur pour la production d'électricité au moyen d'un groupe ORC |
| 90  | → | 65°C | Valorisation de la chaleur dans un réseau de chauffage urbain                        |
| 95  | → | 65°C | Production de froid par système à absorption   |
| 65  | → | 40°C | Valorisation de la basse température pour ECO-Quartier, Piscicultures, serres, etc.  |

### 2.4.1 Production d'électricité au moyen d'un groupe ORC

Plage de température utilisée : 150 à 90 °C

Infrastructure : Système ORC

Application : Production d'énergie électrique

Descriptif: Le système ORC fonctionne sur le principe du cycle de Rankine en boucle fermée. Le fluide est évaporé dans un surchauffeur pour être ensuite détendu dans une turbine à vapeur couplée à un alternateur. Finalement ce fluide est ramené à l'état liquide dans un condenseur couplé à une source froide. Pour que le système fonctionne correctement, il demande une température minimale de la source chaude à 100 [°C]. Dans ce cas de figure, on obtient actuellement des rendements nets pour la production d'énergie électrique compris entre 6 et 7 %. Des rendements intéressants économiquement de 12 à 15 % peuvent être atteints avec des températures de 150 [°C] et plus.

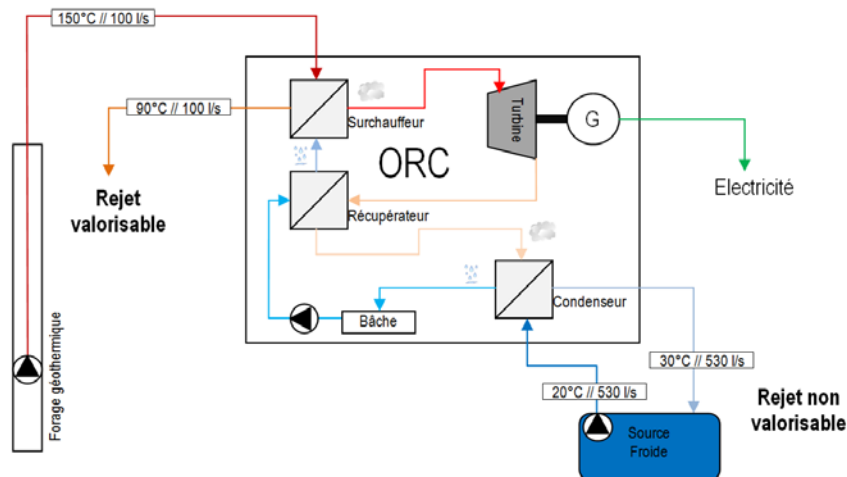


Figure 20 : Schéma simplifié d'un système ORC

| Production d'énergie électrique          | Middle Case     |
|--|-----------------|
| ORC                                      | Turboden        |
| Type refroidissement                     | air             |
| Température air entrée                   | 20 °C           |
| Température air sortie                   | 30 °C           |
| Température entrée eau (tête de puits)   | 150 °C          |
| Température sortie eau                   | 90 °C           |
| $\Delta T$ ORC                           | 60 °C           |
| <b>Rendement net ORC</b>                 | <b>11.0%</b>    |
| Energie thermique annuelle               | 202.5 GWh       |
| Puissance thermique ORC                  | 25'116 kW       |
| <b>Puissance électrique nette ORC</b>    | <b>2'763 kW</b> |
| <b>Energie électrique annuelle nette</b> | <b>22.3 GWh</b> |
| Prix de vente électricité à Swissgrid    | 0.40 CHF/kWh    |
| Recette annuelle                         | 8'911'559 CHF   |

→ Fourniture d'électricité pour 7000 ménages

Tableau 2 : Valeurs énergétiques théoriques selon schéma de principe ci-dessus (Figure 20)

## 2.4.2 Production de chaleur pour un chauffage urbain

Plage de température utilisée : 90 à 65 °C

Infrastructure : Thermoréseau urbain conventionnel

Application : Production d'énergie thermique pour le chauffage des bâtiments

Descriptif: A partir d'un échangeur principal, la chaleur est distribuée à l'aide d'un réseau de chauffage à distance conventionnel jusqu'aux clients de chaleur.

Pour cette utilisation, il sera nécessaire de mettre en place une centrale d'appoint/secours afin de garantir la chaleur à distance en cas de panne de la géothermie.

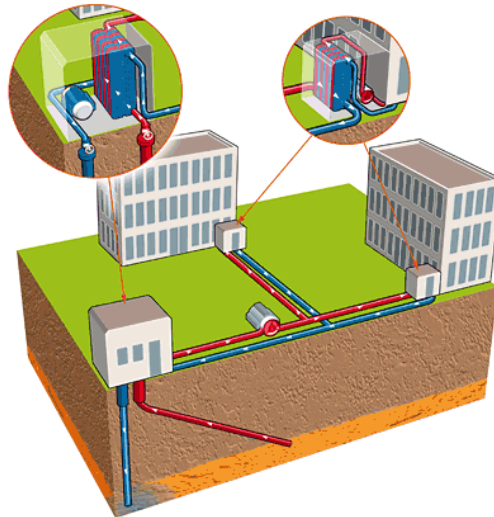


Figure 21 : © ADEME – BRGM Principe de fonctionnement d'un réseau de chaleur avec centrale et sous-stations

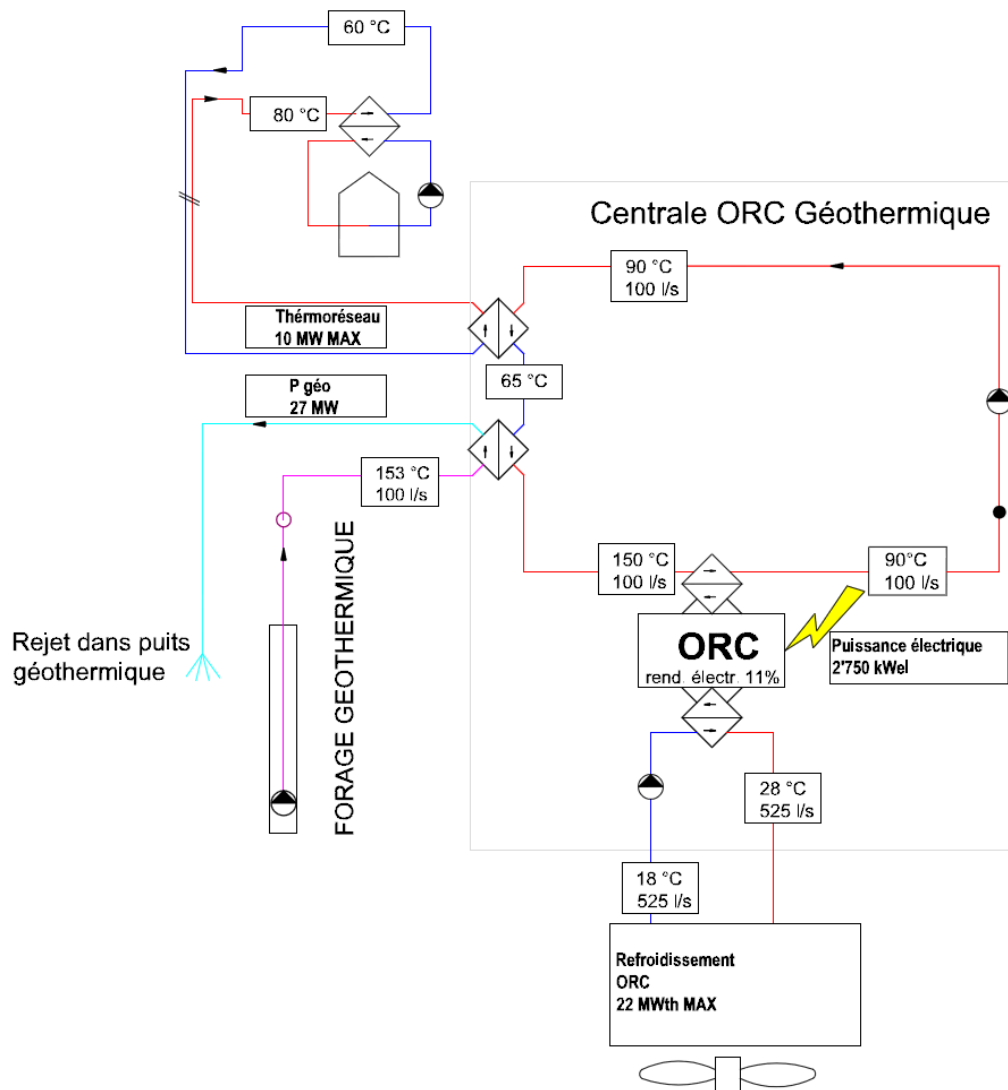


Figure 22 : Schéma simplifié avec ORC et réseau de chauffage urbain

Tableau des valeurs théoriques selon schéma simplifié avec ORC et réseau de chauffage urbain

| Production d'énergie pour la chaleur à distance          | Middle Case      |
|--|------------------|
| Température départ CAD                                   | 90 °C            |
| Température retour CAD                                   | 65 °C            |
| $\Delta T$ CAD   | 25 °C            |
| <b>Puissance thermique</b>                               | <b>10'465 kW</b> |
| <b>Energie thermique (2'000 h à pleine puissance)</b>    | <b>20.9 GWh</b>  |
| Prix de vente de la chaleur à distance sortie plateforme | 0.08 CHF/kWh     |
| Recette annuelle   | 1'569'750 CHF    |

→ Energie de chauffage pour 1'400 ménages

Tableau 3 : Valeurs théoriques selon schéma simplifié avec ORC et réseau de chauffage urbain

### 2.4.3 Production de froid par système à absorption

Plage de température utilisée : 90 à 65 °C

Infrastructure : Système frigorifique à absorption

Application : Climatisation des bâtiments

Descriptif: Le cycle frigorifique à absorption se fait en quatre étapes. Bien que la machine à absorption semble assez différente de la machine frigorifique traditionnelle, le principe de base de fonctionnement reste le même :

- circulation d'un fluide réfrigérant
- évaporation du fluide avec production de froid (évaporateur)
- compression du fluide demandant un apport d'énergie
- condensation du fluide avec production de chaleur (condenseur)

Avec une température de 90°C, le COP est de 0.6. Il faut 1 kWh de chaleur afin de produire 0.7 kWh de froid. La production de froid par système à absorption est bien adaptée dans le cadre de la géothermie. En effet, le réseau de chaleur à distance utilise l'énergie surtout en hiver et la production de froid a lieu en été. Avec l'intégration de production de froid, il est ainsi possible de mieux utiliser le potentiel de la géothermie (production en ruban) tout au long de l'année.

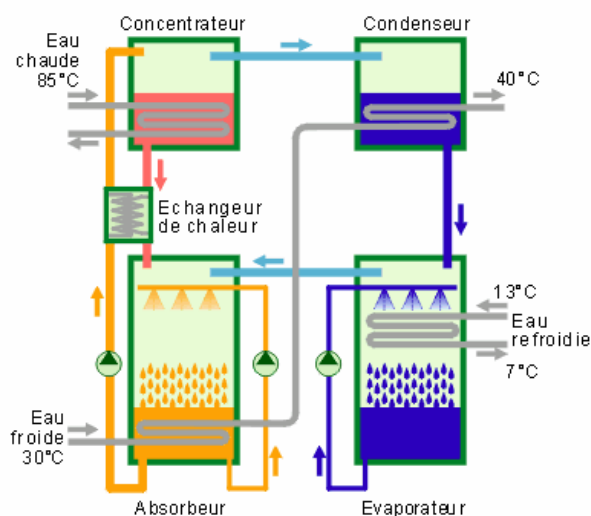


Figure 23 : Système à absorption (www.energie.wallonie.be)

## 2.4.4 Valorisation basse température

Plage de température utilisée : 65 à 40 °C

Infrastructure : Thermoréseau basse température avec isolation de niveau 1

Application : Production d'énergie thermique pour le chauffage de serres, piscicultures ou bains thermaux

Descriptif: A partir d'un échangeur principal, la chaleur est distribuée à l'aide d'un réseau de chauffage à distance jusqu'aux clients de chaleur.

Pour cette utilisation, il sera nécessaire de mettre en place une centrale d'appoint/secours afin de garantir la chaleur à distance en cas de panne de la géothermie.



Figure 24 : Chauffage de serres grâce à la géothermie en Hollande (Magazine Bilan du 07 septembre 2011)

| Valorisation de la basse température                          | Middle Case      |
|---|------------------|
| Température départ  | 65 °C            |
| Température retour  | 40 °C            |
| $\Delta T$  | 25 °C            |
| <b>Puissance thermique</b>                                    | <b>10'465 kW</b> |
| <b>Energie thermique (4'000 h à pleine puissance)</b>         | <b>41.9 GWh</b>  |
| Prix de vente de la chaleur basse enthalpie sortie plateforme | 0.03 CHF/kWh     |
| Recette annuelle  | 1'255'800 CHF    |

→ Energie chauffage pour 2'800 ménages

Tableau 4 : valeurs théoriques pour la valorisation de la basse température

## 2.5 Risques liés à la sismicité induite et solutions potentielles

### 2.5.1 Etat des connaissances

#### 2.5.1.1 Sismicité naturelle

La croûte terrestre est constamment soumise à des contraintes liées à la tectonique globale. Ces contraintes s'accumulent dans les roches sous forme d'énergie élastique. Lorsque la capacité de résistance des roches est dépassée, ce qui se produit généralement le long de plans de faiblesses ou zones de faille, un mouvement brusque se produit et l'énergie accumulée est relâchée sous forme d'ondes sismiques. La mesure de la *magnitude* d'un tremblement de terre est une mesure de l'énergie émise à son foyer. Elle est reportée sur l'échelle ouverte de Richter. Il s'agit d'une échelle logarithmique qui doit être interprétée avec précaution : l'augmentation d'un point de magnitude correspond environ à une augmentation d'un facteur 30 de l'énergie libérée au foyer ! Les sismologues définissent *l'aléa sismique* comme la probabilité qu'un tremblement de terre d'une certaine magnitude se produise en un endroit durant un intervalle de temps donné (Figure 25).

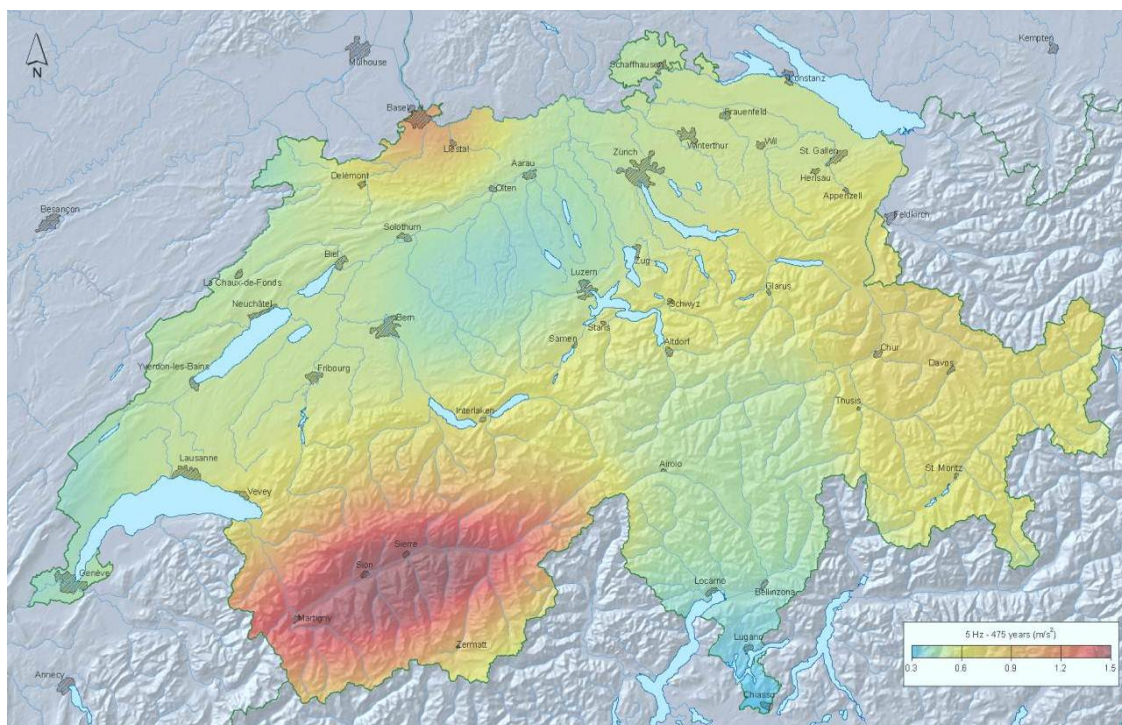


Figure 25 : Aléa sismique en Suisse. Magnitude (exprimée ici en termes d'accélération,  $m/s^2$ ) maximale attendue durant un intervalle d'observation de 475 ans pour une fréquence de 5Hz (Service Sismologique Suisse, 2004). A l'échelle de la Suisse, le canton du Jura présente une faible sismicité naturelle. Les régions de Bâle et du Valais central, connues pour leur activité sismique, ressortent très nettement sur cette carte.

L'effet d'un tremblement de terre en surface ne dépend pas uniquement de sa magnitude mais de beaucoup d'autres facteurs comme la distance à l'épicentre, la profondeur du foyer ou la nature des roches et des sols, etc. On parle de *risque sismique* pour désigner le danger représenté par un tremblement de terre pour les infrastructures. Le risque se calcule en combinant l'aléa, la réponse des sols (effets locaux d'amplification), la densité et la vulnérabilité du bâti (Figure 26 et Figure 27).

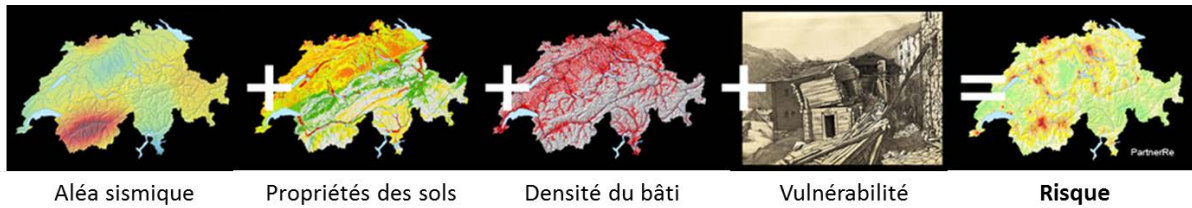


Figure 26 : Aléa et risque sismique (source Service Sismologique Suisse / PartnerRe)

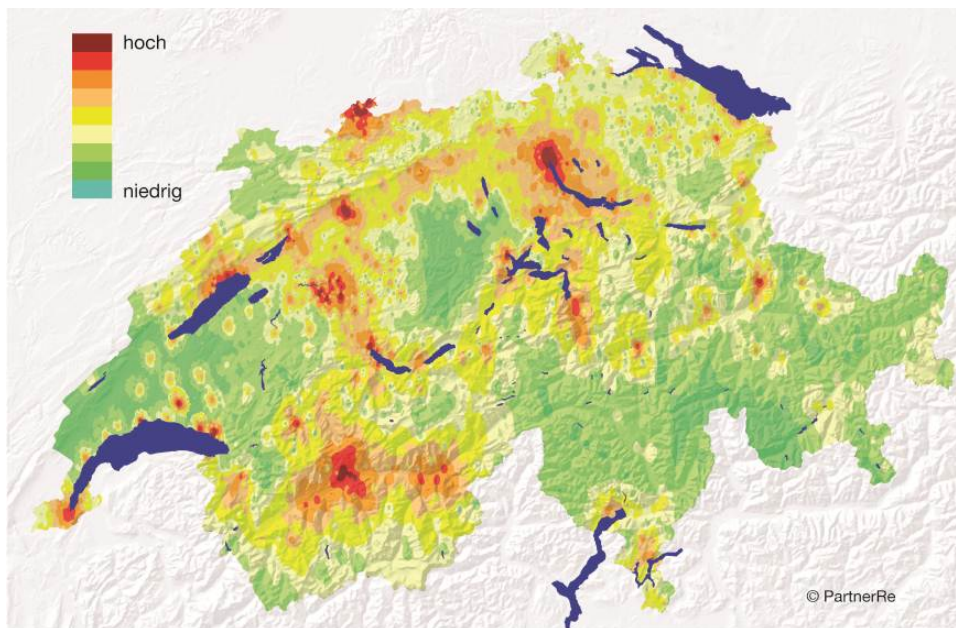


Figure 27 : Risque sismique en Suisse, échelle relative (Source PartnerRe). Tout comme l'aléa, le risque sismique dans le canton du Jura est à l'échelle de la Suisse faible à modéré (région de Delémont). Le contraste avec le risque élevé des grands centres urbains comme Bâle ou Zürich est frappant !

### 2.5.1.2 Sismicité induite

Il est aujourd'hui reconnu que toute activité humaine susceptible de modifier les conditions d'équilibre en profondeur est également susceptible d'engendrer des tremblements de terre pouvant être ressentis en surface, voire pouvant causer des dégâts : mise en eau de barrages, creusement de tunnels et de galeries, extraction minière, travaux de forage, extraction ou injection de fluides dans le sous-sol, etc. La cause de ce phénomène peut être attribuée dans la majorité des cas à la modification du champ de contrainte du sous-sol.

Dans le cas de systèmes pétrothermaux, la sismicité induite est partie intégrante du processus de stimulation du réservoir. Chaque fois qu'un mouvement est initié sur une fracture, un signal sismique est émis (Figure 19). Grâce à l'enregistrement des ondes sismiques au moyen de capteurs de haute sensibilité, il est possible de localiser précisément la source de cette onde et donc la fracture ayant été stimulée. Cette méthode de *monitoring sismique* permet de se faire une idée précise des dimensions et de la géométrie du réservoir obtenu par stimulation hydraulique (Figure 28).



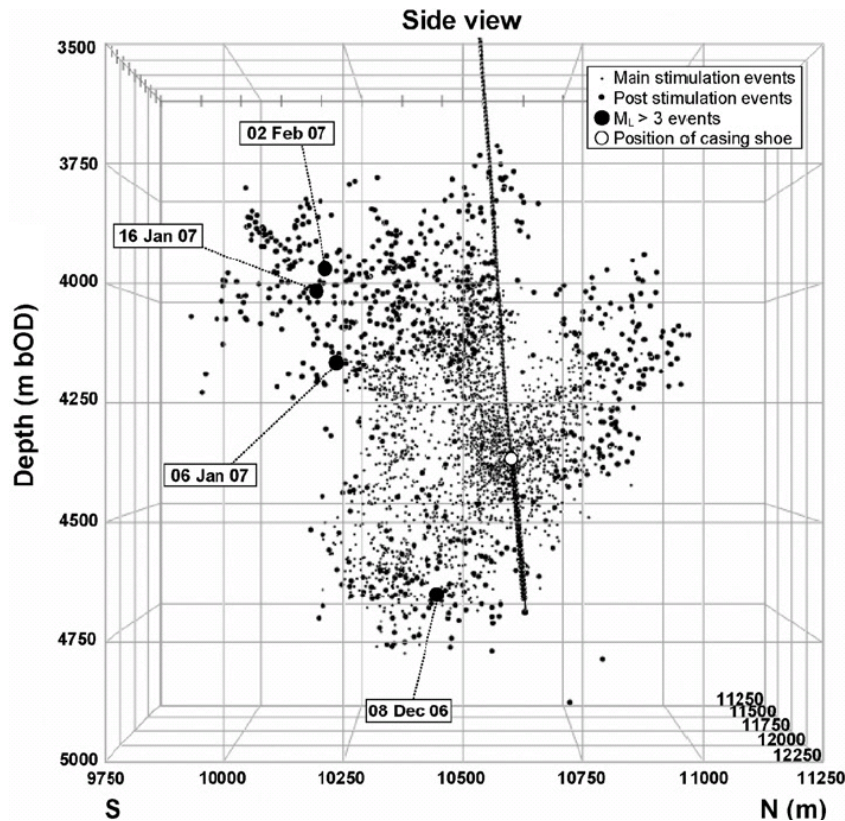


Figure 28 : Géométrie du réservoir du projet DHM de Bâle obtenu par monitoring sismique de la stimulation. Coupe en profondeur N-S passant par le forage Basel-1 (trait). Chaque point représente un événement sismique ayant pu être localisé. Les 3 événements d'une magnitude supérieure à 3 sont aussi représentés. (Håring, 2008)

La sismicité induite est donc nécessaire à l'évaluation du réservoir lors de la stimulation d'un système pétrothermal. Elle devient par contre problématique lorsqu'elle est ressentie en surface. En plus de la sismicité attendue durant la stimulation du réservoir, des cas de sismicité ressentie ont également été reportés durant la phase de production, cela concernant également des systèmes hydrothermaux. Tous les réservoirs géothermaux ne sont par contre pas concernés par des problèmes de sismicité ressentie en surface. Cela est illustré par les exemples de Riehen près de Bâle (hydrothermal) fonctionnant depuis 15 ans sans problèmes ou de Gross Schönebeck au nord de Berlin (pétrothermal) où des pressions identiques et des débits d'injections doubles de ceux de Bâle ont été utilisés durant la stimulation du réservoir pour un total de 80 événements enregistrés (> 15'000 à Bâle) et pour une magnitude maximale de -1.1 (3.4 à Bâle). En comparaison, un tremblement de terre de magnitude 3.1 sur l'échelle de Richter s'est produit au matin du 27 décembre 2011 à une profondeur d'environ 10 km à proximité de Courtételle. Le tremblement de terre a été faiblement ressenti (pas d'annonces à la police ni au service sismologique suisse) et aucune annonce de dommage n'a été communiquée.

De nombreux cas de par le monde montrent que les réservoirs dans des roches compétentes, comme les roches cristallines (majorité des systèmes pétrothermaux) sont plus susceptibles d'engendrer de la sismicité, sans doute à cause de la plus grande capacité de ces roches à accumuler de l'énergie élastique. Pour les réservoirs « actifs » comme à Bâle notamment, il a pu être mis en évidence que la sismicité croît avec l'augmentation de la taille du réservoir (et par conséquent avec la durée de l'injection et des volumes injectés) et n'apparaît donc pas aléatoirement dans l'espace et dans le temps. Cela ouvre des voies à la mitigation des événements de plus forte magnitude par un monitoring précis du réservoir et par la mise en place de systèmes dits « de feu de circulation » intelligents permettant d'interrompre les opérations avant l'apparition d'une sismicité problématique.

## 2.5.2 Mitigation des risques, principe des trois piliers

L'approche choisie par Geo-Energie Suisse SA pour mitiger le risque de sismicité induite associé aux projets de géothermie pétrothermale repose essentiellement sur trois piliers.

- **Choix du site.** Les régions présentant une sismicité naturelle supérieure à la moyenne comme Bâle ou le Valais ont été exclues pour la réalisation d'un premier projet pilote (voir aussi Figure 25). Bien qu'une corrélation claire entre activité sismique naturelle et risque de sismicité induite ne soit pas établie, le principe de précaution nous invite à la prudence. De plus, pour des considérations liées au risque sismique (voir aussi Figure 27) les grandes agglomérations ont été exclues de la recherche de sites pour la réalisation de projets pilotes. Lorsque la démonstration de la maîtrise de la technologie aura été apportée par les premiers projets-pilotes, il sera alors possible de développer des projets pétrothermaux dans de grandes villes également.
- **Développement d'un système intrinsèquement sûr.** Il ressort du chapitre précédant qu'un des facteurs principaux contrôlant la magnitude maximale est la dimension du système stimulé ou taille du réservoir. La magnitude d'un tremblement de terre naturel est proportionnelle à la longueur de la faille le long de laquelle une rupture s'est produite. De manière similaire, la magnitude maximale d'un tremblement de terre induit est en relation avec la dimension du réservoir stimulé. Un système « intrinsèquement sûr » est un réservoir stimulé dont les dimensions ne permettent pas d'engendrer des magnitudes suffisantes pour causer des dégâts en surface (chapitre 2.5.3). L'établissement de ces dimensions maximales dépend de beaucoup de facteurs et nécessite une investigation détaillée pour chaque cas considéré.
- **Etudes de risque, monitoring, évaluation du risque en temps réel.** Une étude de risque réalisée par des spécialistes doit être réalisée avant le début des travaux. Ses résultats doivent être réévalués à la lumière des résultats intermédiaires comme les premiers essais de pré-stimulation afin de s'assurer que le risque du projet demeure toujours dans des limites acceptables.

Durant tout le déroulement des travaux de stimulation ainsi que durant la phase d'exploitation, un réseau de monitoring sismique devra être mis en place pour permettre une observation et une évaluation en temps réel de l'activité sismique dans le réservoir. Un tel réseau se compose typiquement de plusieurs sismomètres de haute sensibilité installés en surface ou dans des forages de faible profondeur et souvent d'un capteur supplémentaire installé dans un forage d'observation profond prévu à cet effet. L'exemple ci-dessous (Figure 29) illustre le réseau de monitoring sismique installé par le service sismologique suisse pour le projet de géothermie profonde de Triemli à Zurich.

Des travaux en collaboration entre le service sismologique suisse et Geo-Energie Suisse SA sont actuellement en cours pour développer un système de prédiction en temps réel de l'évolution de la sismicité durant la stimulation en fonction des observations écoulées. Ce système aura pour objectif de fournir aux responsables de projet un outil permettant d'interrompre les travaux de manière préventive avant que ne se produisent des secousses sismiques susceptibles de causer des dégâts. En comparaison, le projet DHM de Bâle utilisait bien des critères de magnitude pour décider d'une interruption des travaux mais n'était pas en mesure de prévoir l'évolution de la sismicité dans les jours suivant.



Figure 29 : Réseau de monitoring sismique du projet Triemli à Zurich (gauche) et photos des sismomètres installés (droite) (source : service sismologique suisse)

### 2.5.3 Système horizontal multi-fractures de Geo-Energie Suisse SA

Les expériences du projet DHM de Bâle ou du projet européen de Soultz-sous-Forêts en Alsace ont montré que les deux plus grands défis posés aux systèmes géothermaux stimulés sont la création d'un réservoir permettant un rendement énergétique suffisant et le contrôle de la sismicité induite. Ces deux problèmes sont corrélés. Le rendement énergétique du système est déterminé par la surface d'échange totale du réservoir, en d'autres termes par sa taille. Or nous avons vu dans le chapitre précédent que la sismicité augmentait justement avec la taille du réservoir.

De plus, lors de la stimulation en une seule fois d'un grand réservoir comme cela fut tenté durant le projet DHM de Bâle, le risque de créer quelques conduits préférentiels pour la circulation de l'eau au lieu d'une surface d'échange uniforme est particulièrement élevé et peut conduire à un rendement énergétique réduit du système géothermique.

Le système horizontal multi-fractures de Geo-Energie Suisse SA permet d'apporter une réponse à ces deux problèmes : grâce à la stimulation de plusieurs petites portions de roche le long d'un forage horizontal, il est possible d'atteindre une surface d'échange totale suffisante tout en gardant chaque zone stimulée en-dessous de dimensions critiques en termes de sismicité (Figure 30).

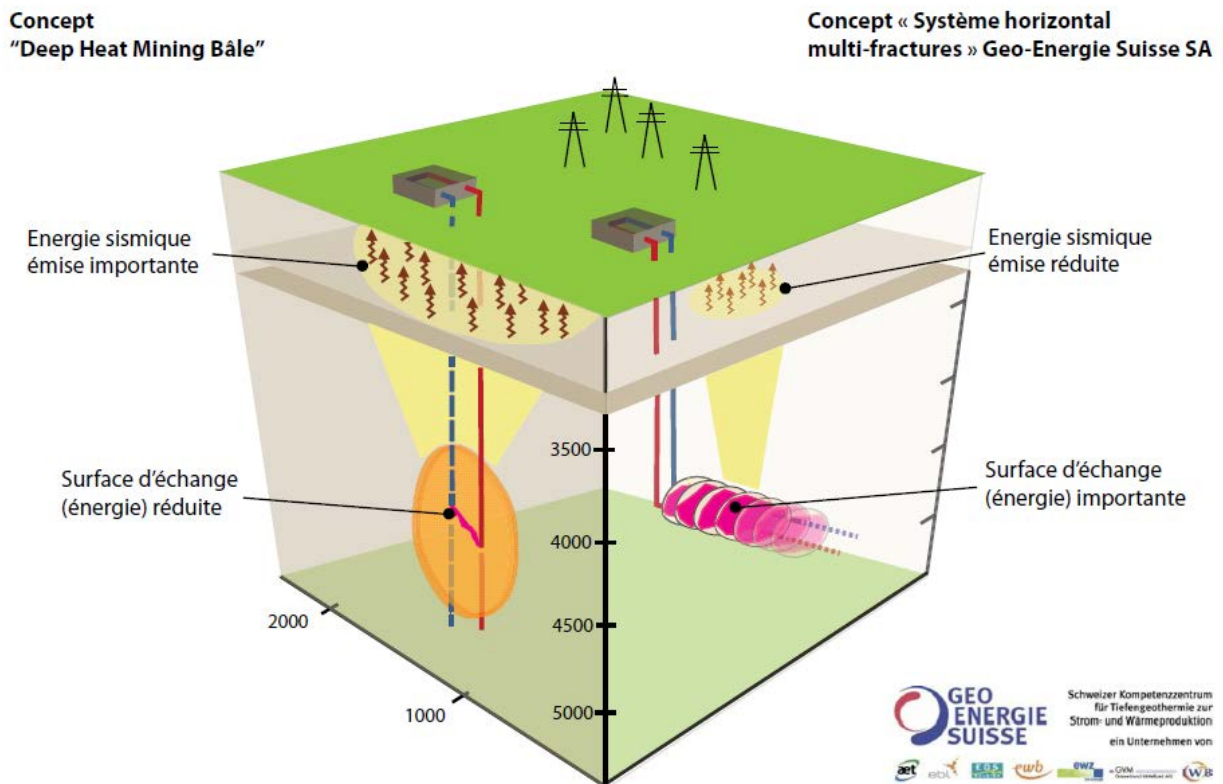


Figure 30 : A gauche, principe du système pétrothermal « classique » formé de deux forages verticaux et d'un réservoir stimulé de grande dimension (un seul forage fut finalement réalisé dans le cas de Bâle). Risque de forte sismicité et de « court-circuit thermique ». A droite, concept horizontal multi-fractures permettant, grâce à des stimulations en série le long d'un forage horizontal, de créer une surface d'échange suffisante tout en gardant la sismicité en-dessous du seuil pouvant causer des dégâts en surface.

## 2.6 Quelques exemples de systèmes géothermiques profonds

### 2.6.1 Riehen (BS)

La centrale de Riehen (Bâle-Ville) est la première centrale géothermique réalisée en Suisse. Il s'agit d'un doublet (paire de forages d'injection et de production) exploitant la chaleur d'un aquifère profond (Muschelkalk, Trias)

pour alimenter un réseau de chauffage à distance. L'eau thermique est pompée à une profondeur de plus de 1500 m à un débit de 20 l/s (Figure 31).

Le projet de Riehen a été réalisé dans le cadre du programme fédéral de promotion de la géothermie profonde entre 1987 et 1998 (chapitre 2.1.3).

Bien qu'il ne s'agisse pas d'un projet à vocation électrique, la profondeur de l'aquifère ne le permettant pas, ce projet mérite d'être mentionné comme l'un des plus grands succès de la géothermie profonde en Suisse. La centrale fonctionne depuis plus de 15 ans (mise en service en 1994) et alimente en eau chaude 180 bâtiments en Suisse et un quartier d'habitation en Allemagne grâce à une eau thermique à 65 °C. Au vu du succès et de la demande, un projet d'agrandissements a été proposé.

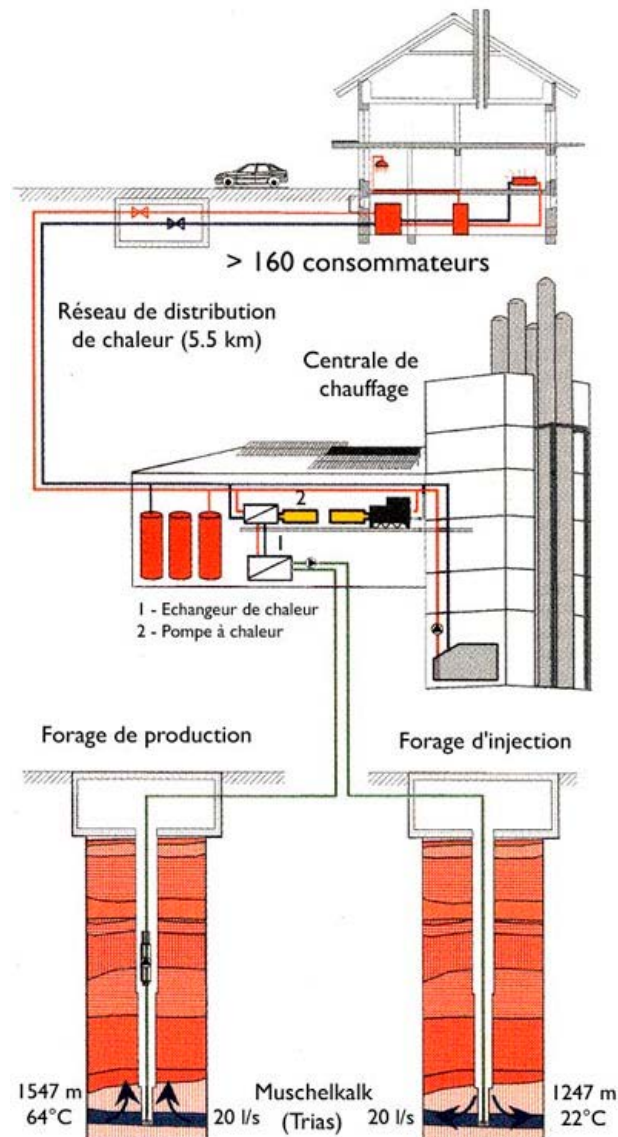


Figure 31 : Schéma de fonctionnement de la centrale géothermique de Riehen (Bâle-Ville) (source : Gruneko AG)

## 2.6.2 Unterhaching, Bavière (D)

La centrale géothermique d'Unterhaching au sud de Munich est la première centrale géothermique couplant la production de courant électrique à celle de chaleur à avoir été mise en service dans le sud de l'Allemagne en 2009. Il s'agit aussi de la première centrale fonctionnant sur le principe *Kalina*. La puissance du système géothermique (38 MW<sub>th</sub>) permet d'alimenter en chaleur l'équivalent de 3000 foyers et le générateur électrique

d'une puissance moyenne de 3.4 MW<sub>e</sub> permet d'alimenter l'équivalent de 6000 foyers en électricité. Cela représente une économie de CO<sub>2</sub> annuelle de quelques 35'000 tonnes. Les investissements totaux se montent à 80 millions d'Euro.

Il s'agit d'un système hydrothermal exploitant à une profondeur de 3350 m un aquifère calcaire du Malm (Jurassique) particulièrement prolifique et fournissant naturellement une eau thermique à plus de 120 °C à un débit de 150 l/s. L'exploitation se fait grâce à un doublet de forages déviés ayant intercepté une zone de failles préalablement identifiée grâce à des mesures de sismique-réflexion.

Une des particularités de la centrale d'Unterhaching est l'usage d'un générateur fonctionnant sur le principe *Kalina* utilisant de l'ammoniaque comme fluide caloporteur du circuit secondaire. Ce procédé, quoique techniquement plus délicat à mettre en œuvre qu'un système ORC (cycle organique de Rankine) offre toutefois un rendement électrique supérieur à basse température.

Le projet d'Unterhaching, réalisé entre 2001 et 2009, a servi de modèle et ouvert la voie à une multitude de projets similaires dans la région munichoise. Plus de 100 concessions géothermales ont été attribuées depuis dans le bassin molassique bavarois. Cet exemple démontre de manière éclatante l'effet d'entraînement positif que peut avoir un premier succès sur le développement régional de la géothermie profonde et sur l'économie en général.



Figure 32 : Bâtiments de la centrale géothermique d'Unterhaching en Bavière (source [www.geothermie-unterhaching.de](http://www.geothermie-unterhaching.de))

### 2.6.3 Sultz-sous-Forêts, Alsace (F)

Le projet européen de Sultz-sous-Forêts au nord de l'Alsace a débuté en 1984 sur la base d'un partenariat franco-allemand. Ce projet de recherche avait pour but de démontrer la faisabilité technique des systèmes géothermaux stimulés pour la production d'électricité. Les principales étapes de sa réalisation furent les suivantes :

1984-1991 : travaux préparatoires, étude de faisabilité, exploration

1992-1997 : réalisation de deux forages profonds (3500 m) et stimulation du réservoir. 25 l/s à plus de 140 °C sont produits durant 4 mois de tests de circulation.

1998-2005 : approfondissement du deuxième forage et réalisation de deux nouveaux puits à 5000 m. Stimulation du réservoir.

2006-2009 : tests de circulation du système profond et construction de la centrale géothermique équipée d'un générateur ORC. Inauguration le 13 juin 2008.

Depuis 2010 : Suivi scientifique et études. Amélioration des équipements. Vente de l'électricité produite.

Le projet de Soultz-sous-Forêts, en démontrant la faisabilité de la technologie EGS et la capacité à entretenir une circulation sur le long terme permettant une production continue d'électricité, marque une étape décisive dans la réalisation des systèmes pétrothermaux. Ce projet de recherche a de plus permis à une multitude d'instituts et d'universités d'étudier de nombreux aspects d'un tel système allant de la mécanique des roches à la technologie des centrales géothermiques en passant par la sismologie, la géochimie, les techniques de forages, etc. Ces enseignements ont ouvert la voie à la réalisation de nombreux autres projets (Landau, Insheim, Bâle, ...).



Figure 33 : Tests de circulation du réservoir de Soultz-sous-Forêts (source [www.geothermie-soultz.fr/v](http://www.geothermie-soultz.fr/v))

### 3. Evaluation du potentiel du Canton du Jura

#### 3.1 Evaluation des ressources

##### 3.1.1 Géologie du canton du Jura

###### *Généralités et grandes unités structurales*

La géologie du canton du Jura est caractérisée par une pile de roches sédimentaires (calcaires, marnes) reposant sur un socle (granite, gneiss) qui n'affleure pas dans le périmètre du canton, mais dans les Vosges et la Forêt Noire.

La couverture sédimentaire, dont l'épaisseur est d'environ 1.5 km, est plissée sous l'effet de la poussée alpine. Aucun forage profond n'a atteint le socle sur le territoire cantonal.

Du point de vue de la géologie régionale, le canton du Jura est situé à un carrefour entre, au Nord, le fossé rhénan et, au Sud, le Jura plissé. On notera également que la dernière chaîne du Jura plissé au Nord (anticlinal du Mont Terri) chevauche le Jura tabulaire ; la plaine d'Ajoie correspond grosso modo au Jura tabulaire qui s'ennoie vers le Nord sous les sédiments tertiaires du fossé rhénan.

La carte suivante (Figure 34) montre cette position charnière du canton du Jura entre trois grandes unités tectoniques, ainsi que le réseau de failles orientées NNE-SSW qui fracture le massif. On y voit aussi les multiples chevauchements en direction du NW dans le Jura plissé.

Les forages profonds de Buix (vert), ainsi que ceux de Bâle, Riehen et Reinach (rouge) réalisés à proximité du canton, sont indiqués, ainsi que les forages locaux (bleu) dont les profondeurs sont comprises entre 400 et 635 mètres. Les forages de Montbouton et Knoeringue (jaune), en France voisine, sont également indiqués. La ligne rouge N-S représente la coupe de la Figure 35.

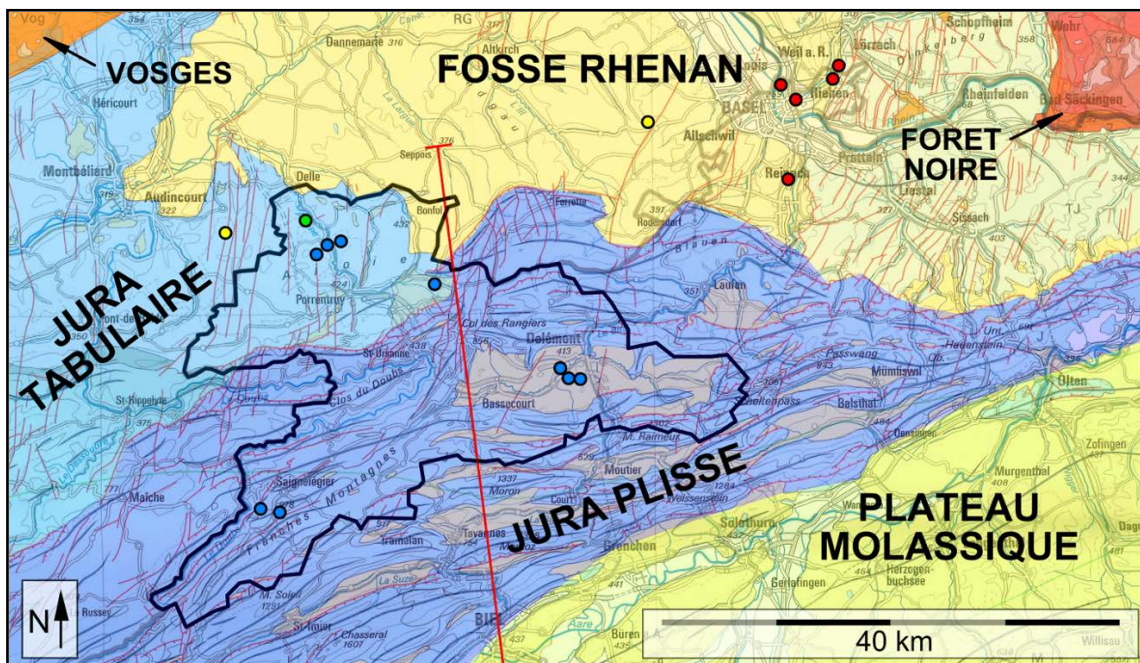


Figure 34 : Carte des grandes unités tectoniques du canton du Jura (vert : forage de Buix-JU ; bleu : forages locaux de profondeurs entre 400 et 635m ; rouge : forages de Riehen, Reinach et Bâle ; jaune : forages profonds de France voisine ; la trace du profil de la Figure 35 ci-dessous est donnée ici en rouge). Voir également le tableau 5 plus bas

Seuls les forages de Bâle et de Knoeringue ont atteint le socle granitique (voir également le tableau 5 plus bas).

La coupe suivante illustre la structure globale, ainsi que la géologie des reliefs du canton du Jura et la différence entre Jura plissé et le Jura tabulaire. Le canton est à cheval entre ces deux unités.

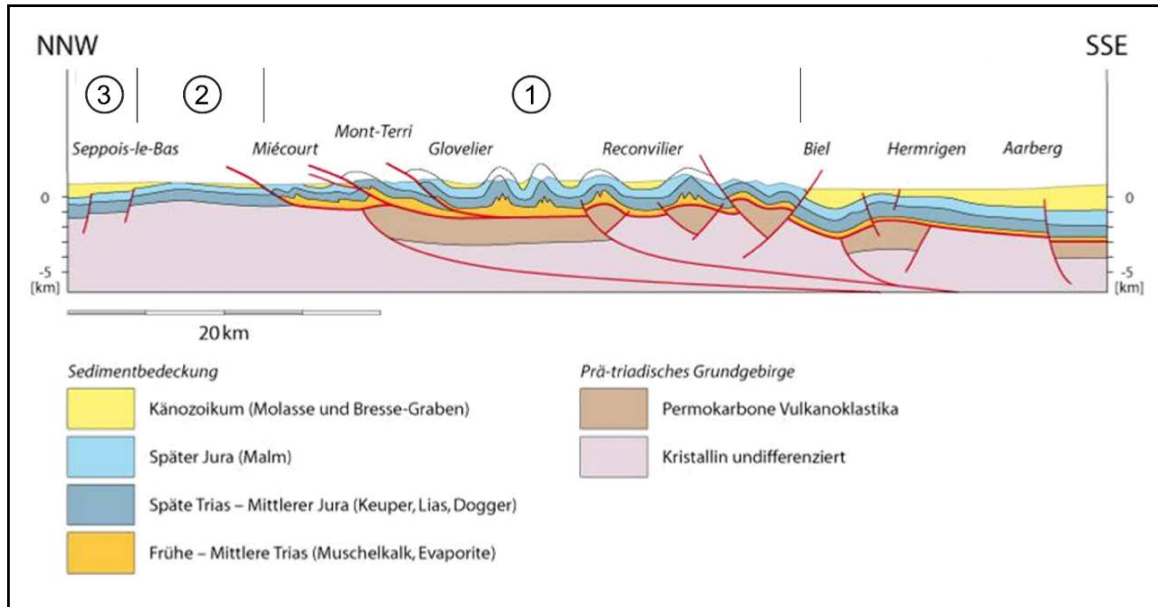


Figure 35 : Profil géologique Nord-Sud (1 : Jura plissé, 2 : Jura tabulaire, 3 : Fossé rhénan). (O.A. Pfiffner, 2009, Geologie der Alpen. Fig. 5.2-3)

Une autre coupe plus détaillée, à travers le Mont Terri, montre bien le chevauchement du Jura plissé sur le Jura tabulaire, ainsi que la structure en plateau du Jura tabulaire qui forme l'Ajoie.

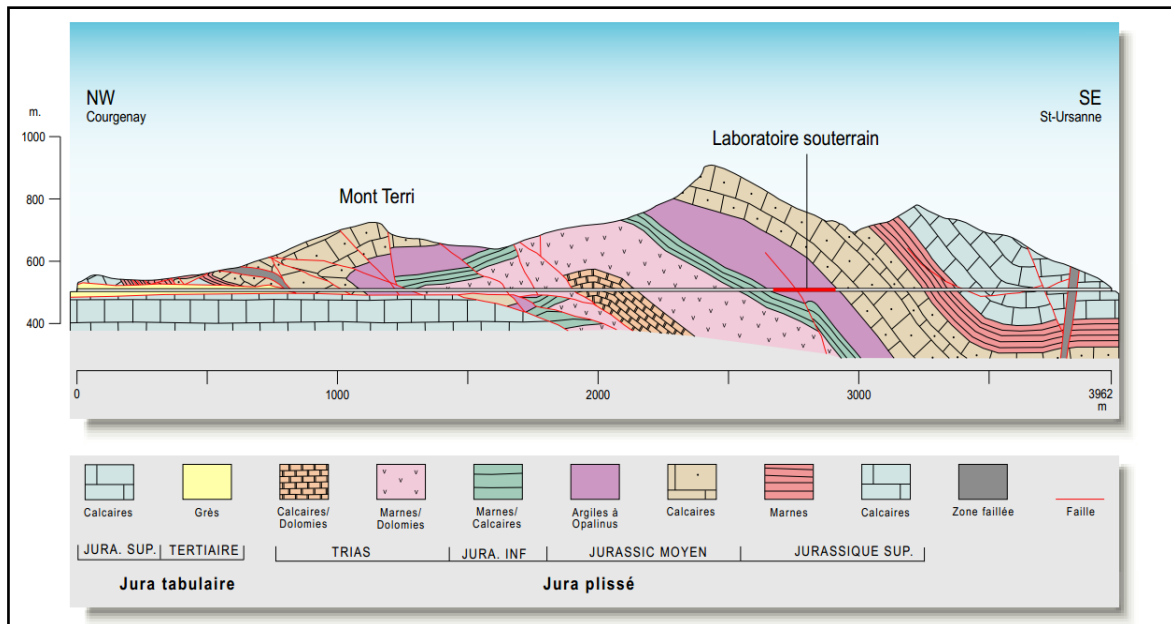


Figure 36 : Profil géologique Nord-Sud à travers le Mont Terri (P. Bossart & M. Thury, 2008)

*Formations géologiques et profondeur prévisionnelle du socle (tableau 5)*



Pour ce qui concerne les formations géologiques qui forment le sous-sol cantonal, on trouve d'abord, depuis la surface, des dépôts quaternaires récents. Ce sont généralement des produits de l'altération, comme par exemple des alluvions ou des dépôts de pente ; leur épaisseur dépasse rarement 10 mètres.

Sous ces dépôts quaternaires prend place une couche de sédiments continentaux tertiaires, principalement de la molasse (dépôts lacustres, alluvionnaires et marins). Dans le canton du Jura, on trouve ces sédiments au fond de la vallée de Delémont ainsi que dans l'Est de l'Ajoie. L'épaisseur du Tertiaire est très variable, de quelques mètres à plus de 150 mètres au Sud de Delémont.

Sous ces sédiments tertiaires se trouve une importante série de couches sédimentaires du Secondaire (Jurassique, Trias) d'une épaisseur d'environ 1200 mètres. Ces roches sont essentiellement composées de calcaires et de marnes.

On trouve, plus profondément encore, d'hypothétiques *grabens* du Permo-carbonifère (ère Primaire, voir la Figure 36 ci-dessus). Il s'agit d'anciens fossés d'effondrements qui ont été mis en évidence lors des forages profonds de la Nagra il y a une trentaine d'années dans le nord-est de la Suisse. Ces fossés contiendraient, à priori, des sédiments de type grès, qui peuvent être localement riches en matière organique. La présence, ainsi que l'emplacement, de ces grabens permo-carbonifères sont controversés : on n'a actuellement pas la preuve formelle qu'ils se poursuivent vers l'Ouest jusque sous le canton du Jura (pas de forages suffisamment profonds). Le forage de Buix a cependant recoupé quelques mètres de Permien avant d'être arrêté sans avoir atteint le socle cristallin.

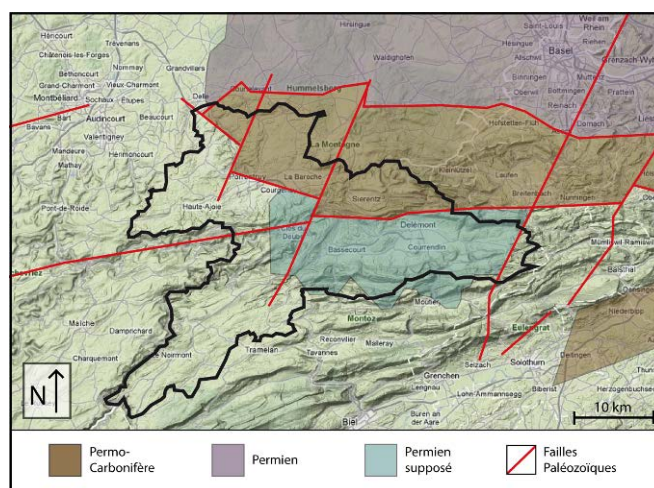


Figure 37 : Hypothèses sur la répartition du Permo-Carbonifère et des failles qui affectent le socle. (K. M. Ustaszewski, 2004.)

Pour le modèle prévisionnel de la géologie profonde sous le canton, on a donc deux cas de figure qui peuvent être rencontrés :

- un premier modèle avec la couverture sédimentaire Secondaire qui repose directement sur le socle : profondeur du socle de 1'100 mètres (Buix) à 1'400-1'500 mètres (Muriaux, respectivement Delémont) ;
- un deuxième modèle avec la couverture sédimentaire Secondaire qui surmonte un graben du Permo-carbonifère : en fonction de l'épaisseur admise pour ces formations non-reconnues par forage dans le canton du Jura, il faut ajouter encore 610 mètres (Knoeringue), ou 780 mètres (Basel BS1), ou encore plus de 985 mètres (Riniken, Nagra). On admettra donc prudemment pour ce 2<sup>e</sup> modèle, une profondeur du socle sous notre canton vers 2'000 à 2'500 mètres de profondeur (avec l'hypothèse d'environ 1'000 mètres de Permo-carbonifère).

On notera encore que les 2 forages les plus proches qui ont touché le socle sont ceux de Bâle et Knoeringue : le socle, composé de roches cristallines comme le granite et le gneiss, a été trouvé à 2'426, respectivement 2'123 mètres, de profondeur.

A 65 km à l'Ouest de Porrentruy, à proximité de Besançon, les forages pétroliers de Buez et Orsans ont recoupé le socle à 1173 mètres, respectivement 1024 mètres, de profondeur.



Aussi bien à Bâle qu'à Knoeringue, Buez et Orsans, une formation permo-carbonifère a toujours été recoupée. Cependant, l'épaisseur de cette formation est très faible à Buez et Orsans, de l'ordre de quelques mètres alors qu'elle atteint 780 mètres à Bâle.

| Identification Géologique |  |  | Lithologie                                   |                           | Réservoirs                                 |                           | Buix       |            | 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<br>OMM<br>USM                          | Molasse : marnes, sables fins et grès. |  |                           |  | 0-13 m                    | 13 m       | -          | 0 m        | 38-276 m    | 234 m       | 21-597 m    | 576 m       |           |
|                           |  | Jurassique                             | Malm   | Malm sup. : Calcaires.    |  | Aquifère calcaire du Malm |            | 13-103 m   | 90 m       | 0-130 m     | 130 m       | 276-535 m   | 259 m       | 597-827 m |
| Malm inf. : Marnes.       |  |  |  |                           |  | 103-456 m                 | 454 m      | 130-523 m  | 393 m      | 535-942 m   | 407 m       | 827-1060 m  | 233 m       |           |
| Dogger                    | Dogger sup. : Calcaires.                   |  | Aquifère calcaire du Dogger (Grande Oolithe) |                           |  |                           |            |            |            |             |             |             |             |           |
|                           | Dogger inf. : Calcaires marneux et marnes. |  |  |                           | 456-562 m                                  | 106 m                     | 523-600 m  | 77 m       | 942-999 m  | 57 m        | 1060-1108 m | 48 m        |             |           |
| Trias                     | Lias                                       | Marnes, gypses et calcaires.           |  |                           |  | 562-753 m                 | 191 m      | 600-788 m  | 188 m      | 999-1176 m  | 177 m       | 1108-1278 m | 170 m       |           |
|                           |  | Keuper                                 | Anhydrites et calcaires marneux.             |                           |  |                           | 753-992 m  | 239 m      | 788-974 m  | 186 m       | 1176-1392 m | 216 m       | 1278-1590 m | 312 m     |
|                           |  |  | Dolomites, gypses et calcaires marneux.      |                           | Aquifère calcaire du Muschelkalk supérieur |                           |            |            |            |             |             |             |             |           |
| Muschelkalk               |  | 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,<br>Carbonifère   | Buntsandstein                              | Conglomérats et grès détritiques.      |  | ???                       |  | >1043 m                   | ?          | >1040 m    | ?          | 1514-2123 m | 609 m       | 1645-2426 m | 781 m       |           |
|                           |  | Granite, Gneiss                        |  |                           |  | ?                         |            | ?          |            | >2123 m     |             | >2426 m     |             |           |
| Socle cristallin          |  |  |  |                           |  |                           |            |            |            |             |             |             |             |           |

Tableau 5: Tableau synthétique des lithologies, réservoirs et profondeurs (basé sur les forages de Buix, Montbouton, Knoeringue et Bâle «BS1»)

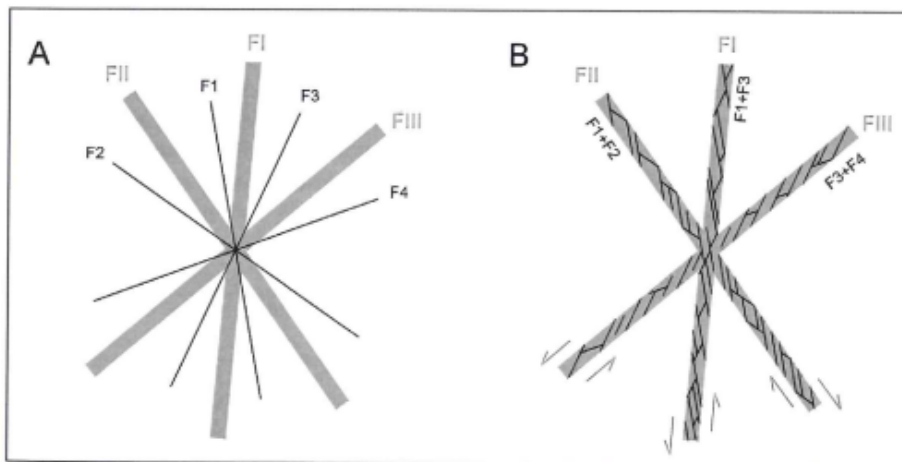
Le tableau synthétique 5 fourni en page précédente résume les différentes formations géologiques rencontrées dans le canton du Jura. Ce tableau est basé sur les résultats des forages de Buix, de Bâle, de Montbouton et de Knoeringue. Des données de la Nagra provenant de forages réalisés à Riniken (AG), à Schafisheim (AG) et à Weiach (ZH) ont également été consultées à titre de comparaison.

Les forages de Bâle, de Buix, de Knoeringue et de Montbouton sont les plus intéressants, au vu leur proximité avec le canton, ainsi que leurs profondeurs. En effet, bien qu'il n'ait pas atteint le socle, le forage de Buix descend à 1052 mètres de profondeur. C'est le forage le plus profond réalisé sur le sol du canton.

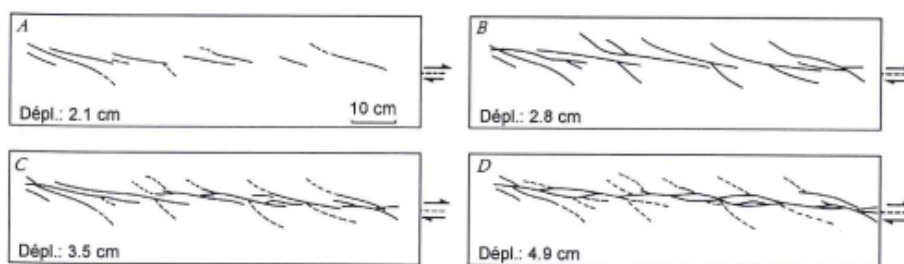
Les deux forages profonds réalisés à Bâle, respectivement OT2 (2755 mètres) et BS1 (5000 mètres) ont quant à eux atteint le socle cristallin à 2649 mètres pour OT2 et 2426 mètres pour BS1. A Knoeringue, le socle, bien qu'altéré, a été atteint à 2123 mètres. Le forage de Montbouton a montré des clastes granitiques sur les derniers mètres sans pour autant arriver dans le socle proprement dit.

### Failles et décrochements majeurs

L'important travail de Braillard (2006) sur le Jura tabulaire d'Ajoie permet de faire le lien entre les nombreuses mesures de fractures faites à l'affleurement (par ex. tunnels A16) et les accidents kilométriques significatifs pour la géothermie profonde qui nous occupe.



**Fig. 3.14** A: Superposition du réseau de fissures F1-F4 et des accidents kilométriques FI-FIII. B: proposition schématique de relation géométrique entre macro- et micro-fracturation. (Le sens des décrochements FII et FIII correspond à la phase de compression Eocène, celui de FI à la phase du Miocène supérieur; F1 à F4 correspondent à des décrochements synthétiques de deuxième ordre; les probables décrochements antithétiques ne sont pas représentés, ni F5.)



**Fig. 3.15** Evolution d'une zone de cisaillement expérimentale induite par une faille basale unique (modifié d'après NAYLOR et al. 1986). Vues planimétriques des fractures de Riedel dessinées à partir de photographies prises à différentes étapes du cisaillement (le matériau cisailé est épais de 10 cm).

Figure 38 : Fracturation et accidents kilométriques en Ajoie (Braillard, 2006)

Braillard synthétise les failles kilométriques d'Ajoie en trois familles subverticales :

- FI : N005° +/- 5°
- FII : N145° +/- 5°
- FIII : N050° +/- 10°

Selon Braillard, les accidents subméridiens FI sont prédominants (nommés « rhénans » par les géologues indigènes), alors que les accidents FII et FIII sont moins nombreux et localisés aux abords de l'Allaine, entre Porrentruy et Delle.

Plus à l'Est en Ajoie, à l'extrême Sud du fossé rhénan au Sud de Miécourt, dans le petit bassin tertiaire de Courgenay-Charmoille, les mesures sismiques effectuées en 2006 (Hessenauer et al., 2010) confirment l'importance de la famille subméridienne FI décrite par Braillard plus à l'Ouest. Toutefois, on ne retrouve pas vraiment les 2 autres familles FII et FIII qui, à Miécourt se fondent plus ou moins en une seule famille orientée E-W.

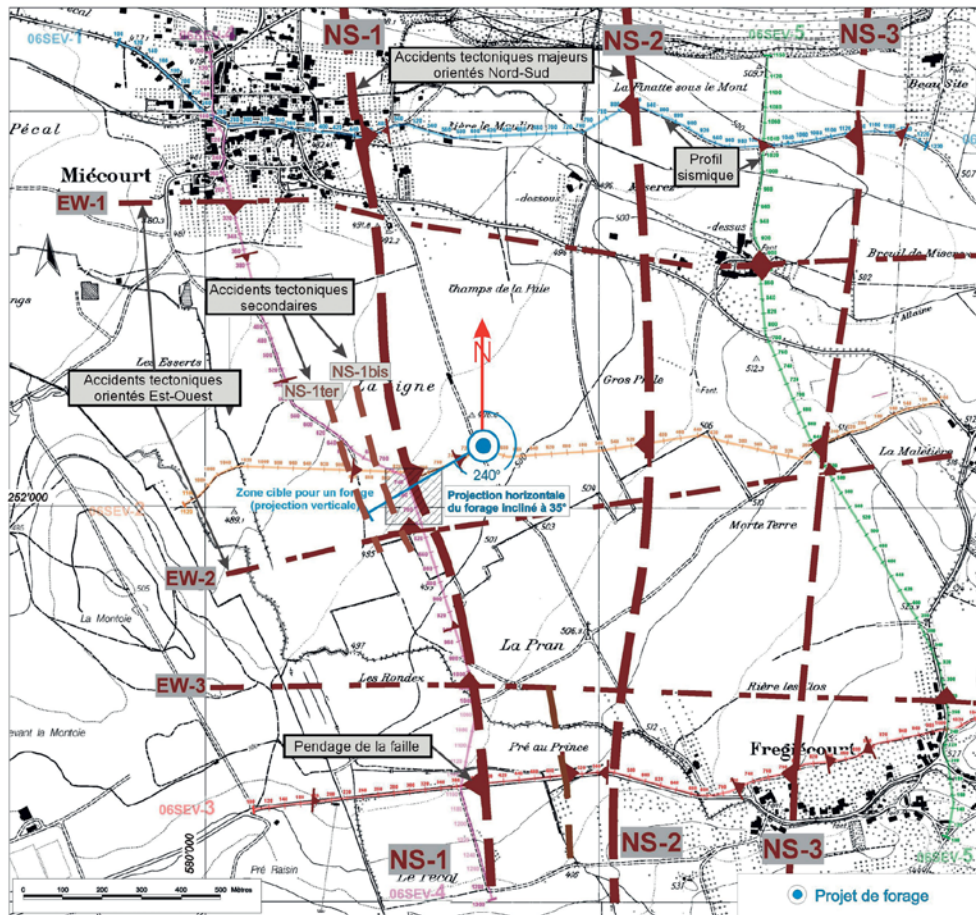


Figure 39 : Sismique au Sud de Miécourt : modèle structural (Hessenauer et al., 2010)

Dans le Jura plissé, lors du percement d'une galerie entre Delémont et Soyhières, les mesures systématiques de la fracturation (400 fractures) ont été traitées statistiquement (Flury et al., 1983) : 2 familles de fractures sont caractérisées :

- un système vertical NNE-SSW: N024°
- un système subvertical (80°) NNW-SSE : N150°

Comme en Ajoie, le système méridien (« rhénan ») prédomine. Le 2<sup>e</sup> système à N150° correspond manifestement au système FII de Braillard (N145° +/- 5°).

Au présent stade préliminaire, on retiendra que les failles attendues sont :

- très majoritairement de direction subméridienne (verticales) ; ces failles ont joué au moins deux fois selon Braillard ; il est donc difficile de les considérer a priori comme résultant d'une distension ou d'une compression ;
- elles sont accompagnées d'une autre famille de failles conjuguées, subverticales ou à fort pendage ; ces failles ont probablement subi une compression lors du plissement du Jura.

### 3.1.2 Gradient géothermique, profondeurs requises, implications

Une première carte du gradient géothermique a été établie par L. Hauber en 1993 et concerne les températures estimées à 1000 m de profondeur. Les données des forages de Buix, Reinach 1, Riehen 1 et Riehen 2 sont intégrées dans cette carte. On constate d'emblée une forte anomalie positive à plus de 70°C dans l'extrême Sud du fossé rhénan à 3 km au nord de Ferrette.

Selon cette carte, des valeurs de 35 à 50°C sont attendues à 1000m de profondeur dans la moitié Est de l'Ajoie. On notera que dans le forage de Miécourt 1 (Hessenauer & Flury, 2010), une valeur de 22°C a été mesurée en fond de trou à 430m de profondeur ; en admettant une température moyenne de surface à 9°C, on obtient un gradient de 30.2°C/km, donc une valeur calculée d'environ 39°C à 1000 m de profondeur. Cette valeur est compatible avec la carte de Hauber présentée ci-dessous.

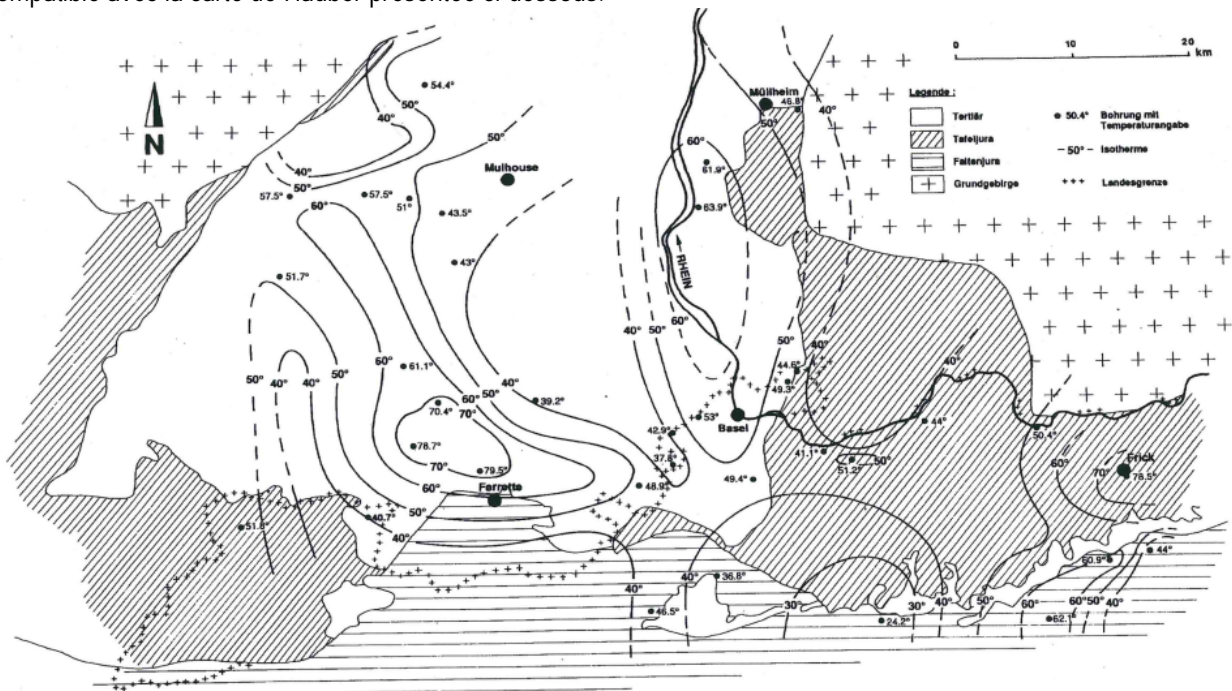


Figure 40 : Isolignes de températures à 1000 mètres de profondeur au Sud du fossé rhénan (Hauber, L., 1993)

On notera, pour la moitié Ouest de l'Ajoie, la valeur de 51.8°C à 1000m de profondeur qui correspond selon Hauber au forage de Buix (Schmidt et al., 1924).

Toujours pour moitié Ouest de l'Ajoie, nos données de Courtemaîche (Boem et al., 2006) concluent à un gradient de 36°C/km, basé sur des mesures ponctuelles de température dans le trou de forage en situation « statique » (sans pompage). Une observation intéressante avait été faite lors des diagraphies de température : « La section supérieure, correspondant aux marnes oxfordiennes, présente ainsi un gradient géothermique moyen de 4.9°C/100m. La section inférieure, associée au Dogger calcaire, présente quant à elle un gradient nettement plus faible, de 3.2°C/100m ». On notera encore que « Les température et profondeur de la seule venue d'eau identifiée ne s'intègrent pas à la corrélation linéaire déterminée pour un état statique. Les eaux captées à une profondeur réelle de 221 mètres ont en effet une température moyenne de 21.5°C, soit -2 degrés de plus que la valeur mesurée au repos à la même profondeur. ». On attendra donc une valeur d'environ 45°C à 1000m de profondeur à Courtemaîche, ce qui est compatible avec la carte de Hauber.

Comme on le voit ci-dessus en figure 40, la carte de Hauber ne se poursuit pas dans la vallée de Delémont. Nos valeurs à Delémont, obtenues dans les 3 forages des Services industriels de la ville, varient entre 30.5 et 32,5 °C/km (Flury et al. 1991). Ces valeurs sont compatibles avec la carte de Medici & Rybach reprise ci-dessous en figure 41.

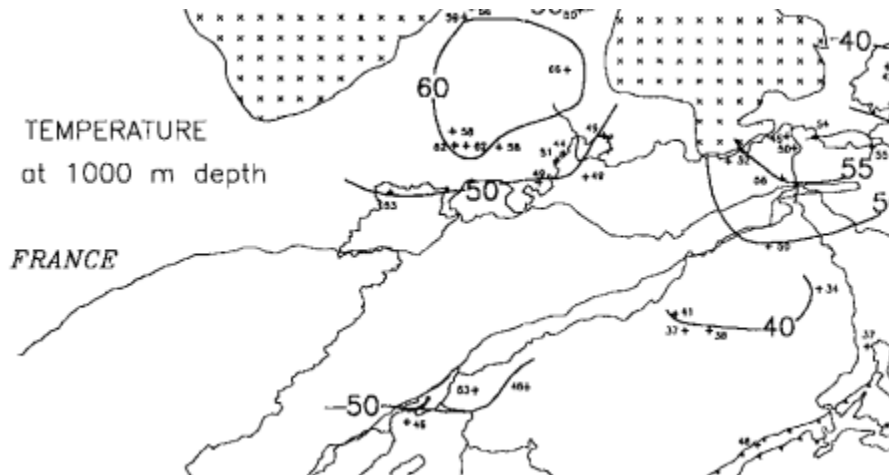


Figure 41 : Isolignes de températures à 1000 mètres de profondeur (Medici & Rybach, 1995)

On retiendra finalement pour l'ensemble du canton des valeurs de gradient de 30 à 40°C/km, si l'on admet une température moyenne de surface de 10°C. On gardera à l'esprit que l'Est de l'Ajoie, qui correspond au sud du fossé rhénan, est a priori un peu plus chaud que le reste du canton. A l'inverse, le plateau des Franches-Montagnes montre probablement des valeurs un peu plus froides, les mesures dans les 2 forages de Muriaux étant difficilement interprétables à cause de la forte épaisseur de terrain non-saturé au-dessus de la nappe (Hessenauer et al. 2001). Plus au Sud, dans le forage profond de Sonvilier, une température de 20°C provenant d'une importante venue d'eau à la profondeur de 420 mètres a été mise en évidence lors de diagraphies (Rieben, 2010) : le gradient géothermique serait donc d'environ 28°C/km dans la vallée de Saint-Imier, si on admet une température moyenne de surface de 8°C.

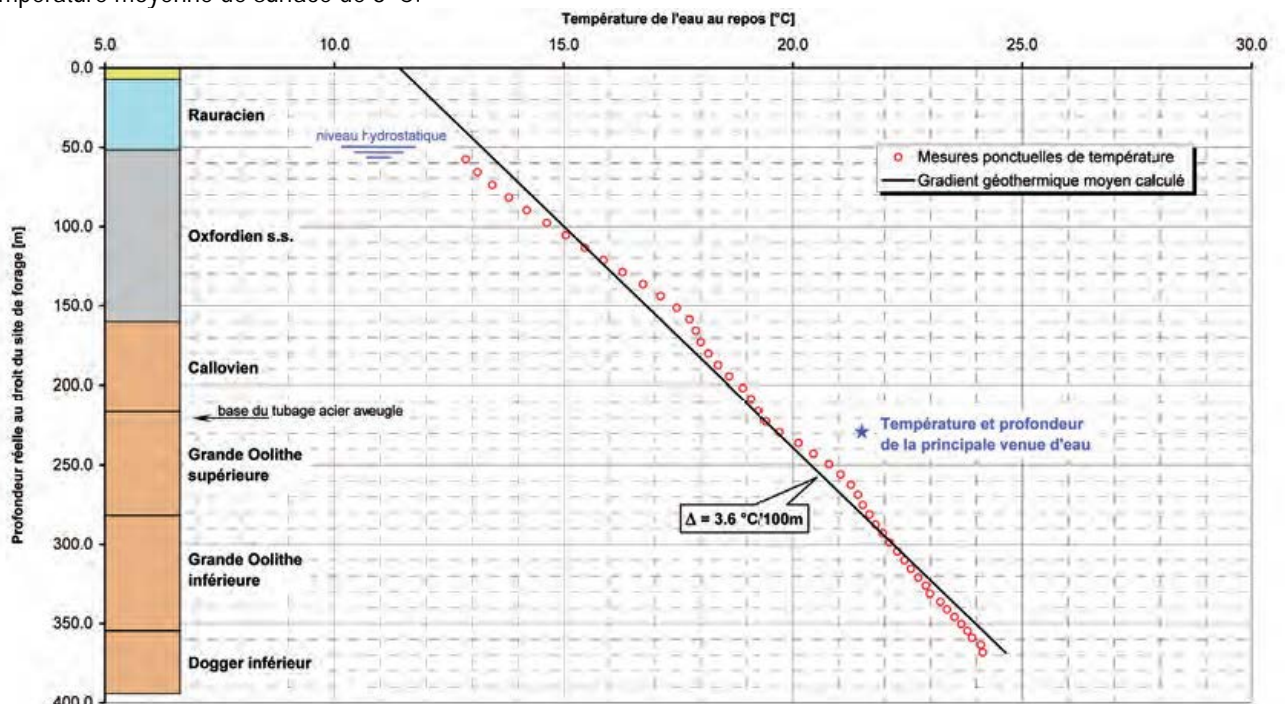


Figure 42 : Courtemaîche : mesures de températures et gradient géothermique (Boem et al., 2006)

Le pronostic de la température à de plus grandes profondeurs reste entaché d'une grande incertitude. L'extrapolation linéaire vers le bas d'un gradient géothermique mesuré à faible profondeur peut conduire à des estimations erronées. Les températures mesurées dans le système géothermal stimulé de Soultz-sous-Forêts en Alsace en sont un bon exemple. Même une modélisation détaillée du champ de températures reste, en l'absence

de calibration, sujette à caution. En première approche, un gradient géothermique moyen de 30 °C / km sera donc considéré.

Pour une température de surface moyenne de 10 °C, une température de 40 à 85 °C serait attendue au sommet du socle cristallin pour une couverture sédimentaire de 1000 m (modèle 1, chapitre 3.1.1), respectivement 2500 m (modèle 2, chapitre 3.1.1). Il en ressort clairement qu'une production d'électricité grâce à la géothermie profonde dans le canton du Jura implique l'exploitation d'un réservoir dans le socle cristallin et par là-même un recours à la technologie des systèmes géothermiques stimulés (EGS). Une température de près de 150 °C pourrait ainsi être attendue à une profondeur-cible de 4500m.

### 3.1.3 Alternative des systèmes hydrothermaux hybrides

Les ressources hydrothermales sont connues grâce aux forages de Riehen et Reinach, ainsi qu'aux données des forages d'eau que le bureau MFR a suivis ces 20 dernières années : Delémont, Courtemaîche, Miécourt, Muriaux, ainsi que Sonvilier dans le Jura bernois.

Les aquifères considérés sont repris au tableau 6 ci-dessous. Il s'agit des aquifères « classiques » du Nord-ouest de la Suisse. On le constate, l'aquifère le plus profond, au demeurant fort mal connu, est représenté par les grès du Buntsandstein, dont la profondeur est estimée par exemple vers 1300-1400m sous la surface à Delémont. En admettant un gradient de température de 30 à 40°C par km et une température de surface de 10°C, on obtient des valeurs de 50 à 65°C pour cet aquifère.

| « GISEMENT » ET PROFONDEUR   | TYPE                        | TEMPERATURE A LA BASE DE LA FORMATION<br>(GRADIENT = 31.5°C/KM) | APPLICATION   | COMMENTAIRES   |
|--|-----------------------------|---|---------------|--|
| Aquifère calcaire du Malm et forages existants des SID 150 - 415 m | Doublet en aquifère profond | 22.3-23.2 °C<br>(forages existants SID)                         | Chaleur seule | Données selon les 3 forages existants qui alimentent la Ville de Delémont  |
| Aquifère calcaire du Dogger (Grande Oolithe) 510 - 725 m           | Doublet en aquifère profond | 33°C  | Chaleur seule | Teneur en sels dissous impliquant probablement un doublet  |
| Aquifère calcaire du Muschelkalk sup. 1100 - 1175 m                | Doublet en aquifère profond | 47°C  | Chaleur seule | Caractère exploratoire : à part le tunnel A16 du Mt Terri, formation pas affleurante dans le canton<br>Teneur en sels dissous impliquant certainement un doublet |
| Aquifère du Buntsandstein 1350 m à ≥ 1500 m                        | Doublet en aquifère profond | ~55-60°C  | Chaleur seule | Caractère exploratoire, aquifère peu connu !<br>Teneur en sels dissous impliquant certainement un doublet  |

Tableau 6 : Géothermie profonde - ressources hydrothermales : exemple des profondeurs attendues à Delémont

Ces chiffres montrent qu'une production d'électricité grâce à l'exploitation d'aquifères « naturels » n'est pas possible dans le canton du Jura. L'exploitation de cette ressource hydrothermale à des fins de chauffage uniquement comme à Riehen par exemple serait toutefois envisageable mais ne fait pas l'objet du présent rapport.



Le recours à une solution « hybride », à savoir la combinaison d'une ressource hydrothermale de moyenne température à une autre source d'énergie comme le bois, le biogaz ou le gaz naturel pour la production d'électricité pourrait être envisagée. Une étude plus approfondie en fonction du contexte, des besoins et des ressources disponibles devrait être menée le cas échéant.

### 3.2 Evaluation du potentiel géothermique du Canton du Jura pour la production d'électricité

Selon le rapport « Consommation et approvisionnement en énergie du canton du Jura » de Weinmann-Energie SA du 26 mai 2011, la consommation d'électricité de la République et Canton du Jura en 2008 se monte à 512 GWh par an.

Hypothèses pour le calcul du potentiel géothermique prévu jusqu'en 2035 :

- Les trois sites les plus favorables à la géothermie seront productifs
- Le nombre d'heures d'exploitation est de 8064 h/an soit 48 semaines de production sur 52.
- Débit de 100 l/s et température de 150°C par doublet
- Production d'électricité à l'aide d'ORC refroidi par aérorefroidisseurs

En se référant au point 2.4.1 « Production d'électricité au moyen d'un groupe ORC », la production d'électricité s'élève à 22.3 GWh/an par doublet (puissance électrique par doublet : ~ 2.8 MW).

Selon le scénario d'évolution de la consommation d'électricité en fonction de la croissance de la population jurassienne et le scénario « Dynamique » de l'OFS, l'augmentation de consommation d'électricité avoisinera les 700 GWh/an en 2035 dans la RCJU.

En réalisant une moyenne de 5 doublets sur les trois sites les plus favorables du Canton du Jura à l'horizon 2035, il est ainsi possible de produire l'équivalent de 336 GWh/an au moyen de la géothermie profonde, ce **qui couvrira le 48% du total de l'énergie électrique consommée dans le Canton du Jura**. Avec la géothermie profonde et la production actuelle en électricité renouvelable, il ne restera « plus » qu'à trouver une production annuelle de 52 GWh/an dans les nouvelles énergies renouvelables (solaire – éolien – petite hydraulique – cogénération au bois/biogaz).

→ Voir paragraphe 1.4 Besoins actuels et futurs du canton (chaleur et électricité)

## 4. Détermination d'une dizaine de sites pour des projets pilotes

### 4.1 Définition des critères pour la sélection des sites

La combinaison des informations relatives au sous-sol dérivées du module « Géologie » avec les données du SIT (Système d'information du territoire) permet d'établir les zones potentiellement favorables au développement de la géothermie profonde sur le territoire de la RCJU.

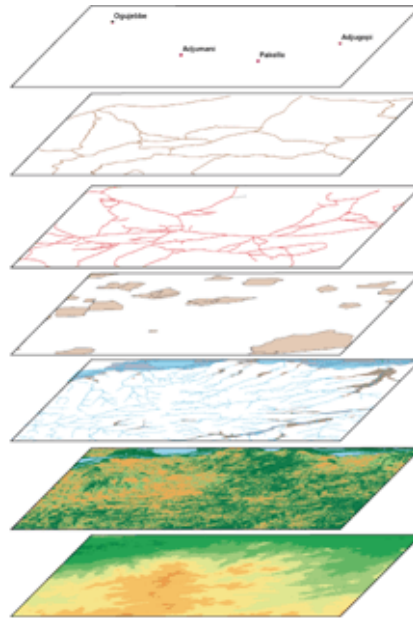


Figure 43 : Schéma de combinaison de différentes couches SIG

Les sites les plus favorables ont été déterminés selon des facteurs de surface. La première étape consiste en une analyse de restriction, qui exclut les réserves naturelles, les périmètres d'inventaires fédéraux, les zones forestières soumises à la loi sur les forêts (LFo) et les zones de protection des eaux.

Sur la base de ces restrictions, plusieurs visites de différents sites ont été organisées. Elles ont permis de restreindre au nombre de 11 les sites jugés potentiellement favorables à l'implantation d'une centrale géothermique.

Dans un deuxième temps, une étude basée sur les SIT a permis de déterminer lesquels de ces onze sites représentent le potentiel le plus intéressant. Les critères utilisés pour cette phase figurent dans le tableau 7 ci-dessous.

Trois groupes (géologie, mise en valeur de l'énergie et divers) comprenant différents facteurs ont été définis. Une pondération pour chaque groupe a été appliquée, respectivement de 30%, 50% et 20%. Chaque critère a ainsi été évalué avec des notes allant de 3 (très favorable) à 1 (peu favorable), afin d'obtenir une note globale pour chaque site.

**Il est important de relever que ces notes représentent une évaluation relative permettant de comparer les sites entre eux et n'ont en aucun cas un caractère absolu. Cela est en particulier vrai pour l'évaluation du risque sismique qui demeure pour tous les sites du Canton du Jura faible à modéré en comparaison suisse, aucun site ne pouvant être a priori qualifié de défavorable selon ce critère.**

| ID_Site | Sites potentiels                    | Géologie 30%    |      | Mise en valeur de l'énergie 50% |                                    |                           |                        |      | Divers 20%                    |              |      | Note globale |
|---------|-------------------------------------|-----------------|------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------|------|-------------------------------|--------------|------|--------------|
|         |                                     | Risque sismique | Note | Distance à un centre urbain     | Station de distribution électrique | Source de refroidissement | Thermoréseau potentiel | Note | Dangers naturels particuliers | Type de zone | Note |              |
| 1.1     | Delémont - ZI Est                   | 1.5             | 1.5  | 3                               | 3                                  | 2                         | 3                      | 2.75 | 3                             | 3            | 3    | 2.4          |
| 1.2     | Delémont - Communance Sud           | 1.5             | 1.5  | 3                               | 3                                  | 2                         | 3                      | 2.75 | 3                             | 3            | 3    | 2.4          |
| 1.3     | Delémont - ZI Rondez                | 1.5             | 1.5  | 3                               | 3                                  | 2                         | 3                      | 2.75 | 2                             | 3            | 2.5  | 2.3          |
| 1.4     | Vicques - ZI Ouest                  | 1.5             | 1.5  | 1                               | 2                                  | 1                         | 1                      | 1.25 | 2                             | 2            | 2    | 1.5          |
| 2       | Porrentruy Ouest                    | 2               | 2    | 3                               | 3                                  | 1                         | 3                      | 2.5  | 1                             | 3            | 2    | 2.3          |
| 3       | Bassecourt Est                      | 2.5             | 2.5  | 3                               | 3                                  | 2                         | 3                      | 2.75 | 3                             | 2            | 2.5  | 2.6          |
| 4       | Saignelégier Sud                    | 3               | 3    | 1                               | 2                                  | 1                         | 2                      | 1.5  | 2                             | 1            | 1.5  | 2.0          |
| 5       | Choindez                            | 2               | 2    | 1                               | 2                                  | 2                         | 1                      | 1.5  | 1                             | 3            | 2    | 1.8          |
| 6       | Courgenay - Nord Moulin de la Terre | 2.5             | 2.5  | 1                               | 1                                  | 1                         | 1                      | 1    | 3                             | 2            | 2.5  | 1.8          |
| 7       | Glovelier ZI Est                    | 2.5             | 2.5  | 2                               | 3                                  | 1                         | 2                      | 2    | 2                             | 2            | 2    | 2.2          |
| 8       | Boécourt SEOD                       | 2.5             | 2.5  | 2                               | 3                                  | 1                         | 1                      | 1.75 | 3                             | 2            | 2.5  | 2.1          |

Tableau 7 : Evaluation des sites potentiels

### Critères géologiques

Les critères géologiques principaux déterminant le succès d'un projet de géothermie pétrothermale sont la nature des roches à la profondeur-cible (roches cristallines recherchées), la température et les paramètres du champ de contrainte. Aux profondeurs envisagées et en l'absence de forage profond, ces paramètres ne peuvent être qu'approximés. A l'échelle du Canton du Jura, il ne nous est pas possible de les utiliser comme critères discriminants et tous les sites ont été considérés de ce point de vue comme également favorables.

Le risque sismique est pour sa part dépendant des conditions locales (nature des sols) et bien sûr de la densité et de la qualité du bâti. Il peut ainsi varier considérablement d'un site à l'autre. Il n'est pas possible de mener une étude de risque pour chaque site dans le cadre de cette étude. En cas de réalisation d'un projet, des études approfondies devront être menées. En première approche, il a ainsi été décidé de considérer le risque de manière qualitative dans un périmètre de quelques kilomètres autour des sites en se basant sur la carte du risque sismique élaborée par le réassureur PartnerRe (chapitre 2.5.1). Comme on pouvait s'y attendre, la région de Delémont, en tant que plus grande ville du canton, présente également le risque le plus élevé à l'échelle cantonale, quoique modéré et toujours acceptable à l'échelle de la Suisse. Cela est parfaitement illustré par la figure 42. Le contraste entre le canton du Jura, région delémontaine comprise, et la région bâloise est évident.

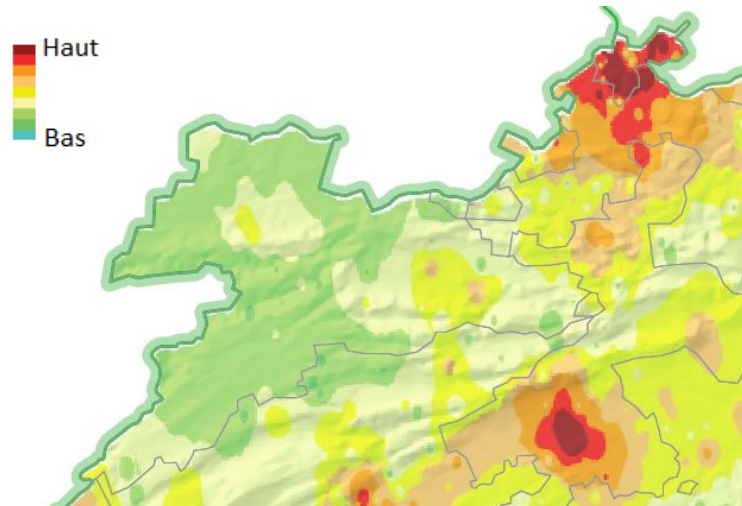


Figure 44 : Carte du risque sismique, échelle relative (Source PartnerRe). Le risque sismique est faible à modéré dans tout le canton. La région de Bâle présente au contraire un haut risque à cause d'une sismicité naturelle élevée et d'une forte densité de population.

### ***Critères de valorisation de l'énergie***

La faible distance à un centre urbain est un élément favorable car on y trouve généralement les infrastructures nécessaires à la réalisation d'un projet de géothermie profonde (voies d'accès, réseau électrique, d'eau, de gaz, etc.). De plus, la possibilité de revalorisation de la chaleur se présente dans les localités les plus peuplées.

Les stations de distribution électrique les plus appropriées pour injecter l'électricité produite sont au nombre de 6 dans le Jura. Il s'agit des sous-stations de Porrentruy pour l'Ajoie, de Tramelan et du Noirmont pour les Franches-Montagnes et de Courrendlin, Bassecourt et Boécourt pour la région de Delémont. La notation se base sur leur distance par rapport aux sites potentiels.

Les sources de refroidissement sont les rivières de la région présentant un débit suffisamment important pour contribuer éventuellement au refroidissement d'un ORC. Il s'agit de la Birse (débit moyen :  $10,9 \text{ m}^3/\text{s}$  /  $Q_{347}$  :  $2,53 \text{ m}^3/\text{s}$ ), de la Sorne (débit moyen :  $4,3 \text{ m}^3/\text{s}$  /  $Q_{347}$  :  $1,02 \text{ m}^3/\text{s}$ ), du Doubs (débit moyen :  $33,1 \text{ m}^3/\text{s}$  /  $Q_{347}$  :  $5,05 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et de l'Allaine (débit moyen :  $3,21 \text{ m}^3/\text{s}$  /  $Q_{347}$  :  $0,49 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Si ces cours d'eau devaient s'avérer (momentanément) inappropriés pour des raisons de débit d'étiage ou d'autres considérations environnementales, le refroidissement sera effectué au moyen d'aéroréfrigérateurs. Les sites à proximité d'une rivière pouvant éventuellement contribuer au refroidissement partiel d'un ORC reçoivent une note de 2, les autres une note de 1. L'absence de grands fleuves dans le canton ne permet en aucun cas d'attribuer la note maximale de 3.

Les thermoréseaux potentiels ou existants sont un point essentiel dans la revalorisation de la chaleur. La présence actuelle ou future de tels réseaux est un atout majeur pour le développement de la géothermie profonde.

### ***Autres critères***

La notation relative aux dangers naturels particuliers est basée sur la carte indicative des dangers. Elle comprend les glissements de terrains, crues, chutes de pierres et de blocs, glissements permanents et spontanés, ainsi que les laves torrentielles. Ces dangers sont indicatifs et non restrictifs, des mesures pouvant être prises afin de les maîtriser.

Les types de zone permettant l'implantation d'infrastructures pour la géothermie profonde sont les zones industrielles, les zones d'extraction de matériaux et les anciennes décharges. En cas d'indisponibilité dans les zones d'activité actuelles, les parcelles agricoles doivent également être considérées, moyennant toutefois une procédure de changement du plan d'affectation devant être étudiée au cas par cas. Il faut encore noter que cette

évaluation se base sur les plans d'affectation actuels et ne considère pas les évolutions possibles aux horizons 2035 ou 2050.

#### 4.1.1 Sites potentiels

Sur la base des notes obtenues, les 3 sites suivants ont pu être mis en évidence :

- Site 1 : Région de Delémont (ZI Est, ZI Communance Sud, ZI Rondez)
- Site 2 : Porrentruy Ouest
- Site 3 : Bassecourt Est

Une analyse géographique plus fine a été effectuée afin de permettre une vision locale pour les 3 sites principaux. Plusieurs cartes ont été réalisées comprenant les critères de restriction, l'utilisation du sol, les zones d'affectation du sol, les zones indicatives de dangers et les éventuels sites pollués pour finalement obtenir une carte de localisation des zones potentielles. Une documentation photographique a également été jointe.

La carte des critères d'exclusion combinée avec celle d'utilisation du sol permet de faire ressortir les zones d'activités préférentielles. Comme défini au point précédent, ce sont les zones d'activités, d'extraction de matériaux et de décharge qui nous intéressent le plus. Parmi ces zones, seules celles non bâties ont été retenues. Le croisement de ces informations (critères d'exclusions, utilisation du sol, zones non bâties) permet d'obtenir la carte des zones potentielles finales.

Pour les autres sites, des fiches synthétiques figurent en annexe de ce rapport.

##### 4.1.1.1 Site 1 - Région de Delémont

Le tableau 8 (extrait du tableau 7) démontre que le site de Delémont présente 3 zones potentielles particulièrement intéressantes.

| ID_Site | Sites potentiels          | Géologie 30%    |      | Mise en valeur de l'énergie 50% |                                    |                           |                        |      | Divers 20%                    |              |      | Note globale |
|---------|---------------------------|-----------------|------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------|------|-------------------------------|--------------|------|--------------|
|         |                           | Risque sismique | Note | Distance à un centre urbain     | Station de distribution électrique | Source de refroidissement | Thermoréseau potentiel | Note | Dangers naturels particuliers | Type de zone | Note |              |
| 1.1     | Delémont - ZI Est         | 1.5             | 1.5  | 3                               | 3                                  | 2                         | 3                      | 2.75 | 3                             | 3            | 3    | 2.4          |
| 1.2     | Delémont - Communance Sud | 1.5             | 1.5  | 3                               | 3                                  | 2                         | 3                      | 2.75 | 3                             | 3            | 3    | 2.4          |
| 1.3     | Delémont - ZI Rondez      | 1.5             | 1.5  | 3                               | 3                                  | 2                         | 3                      | 2.75 | 2                             | 3            | 2.5  | 2.3          |

Tableau 8 : Extrait pour la région de Delémont de l'évaluation des sites potentiels

**Risque sismique** : En comparaison suisse, le risque sismique est faible à modéré dans tout le canton. Afin de refléter ce fait, des notes entre 1.5 (modéré) et 3 (faible) ont été attribuées aux différents sites. La région de Delémont, au vu de la densité du bâti, se voit par conséquent attribuer la note 1.5.

**Distance à un centre urbain** : Delémont représente un bassin de population important (le plus important du Jura). Par conséquent, une note de 3 est définie pour ce site.

**Station de distribution électrique** : La sous-station électrique de Courrendlin a les capacités d'absorber l'électricité produite par la centrale. Elle se situe au sud de l'échangeur de l'A16. Sa situation géographique (proximité de Delémont) lui permet d'obtenir la note maximale.

**Source de refroidissement** : La ville de Delémont est traversée par deux cours d'eau, La Birse (débit moyen : 10,9 m<sup>3</sup>/s) et la Sorne (5,05 m<sup>3</sup>/s). Ces deux rivières présentent un débit moyen relativement important en comparaison avec d'autres cours d'eau de l'arc jurassien. En période d'étiage ( $Q_{347}$ ) le débit de ces deux rivières est respectivement de 2,53 m<sup>3</sup>/s et de 1.02 m<sup>3</sup>/s. Par conséquent, il semble envisageable que ces cours d'eau puissent contribuer au refroidissement d'un ORC. La note maximale a donc également été obtenue pour ce critère pour les 3 sites de Delémont. A titre d'information, il faut un débit minimal assuré de 2 m<sup>3</sup>/s pour refroidir un ORC de 3'000 kWél, en comptant une augmentation de la température de l'eau de 3°C.

**Thermoréseau potentiel** : Il n'existe pas à l'heure actuelle de thermoréseau à Delémont, mais le potentiel est très important au vu de la population de la ville. Il a donc été décidé de donner la note maximale pour ce site.

**Dangers naturels** : Les détails concernant les dangers naturels sont illustrés plus bas (Figure 47). La note de 3 pour ZI Est et Communance est expliquée par le fait que ces deux zones ne sont que légèrement touchées par les zones indicatives de crue. La ZI Rondez est intégralement en zone indicative de crues, elle obtient donc la note de 2.

**Type de zone** : Les types de zone présents pour les différents sites sont des zones d'activité industrielle, mis à part pour le site ZI Est, qui comprend aussi des zones agricoles et des zones d'extraction de matériaux. Toutefois, il a été décidé d'attribuer la note de 3 pour chacun de ces sites.

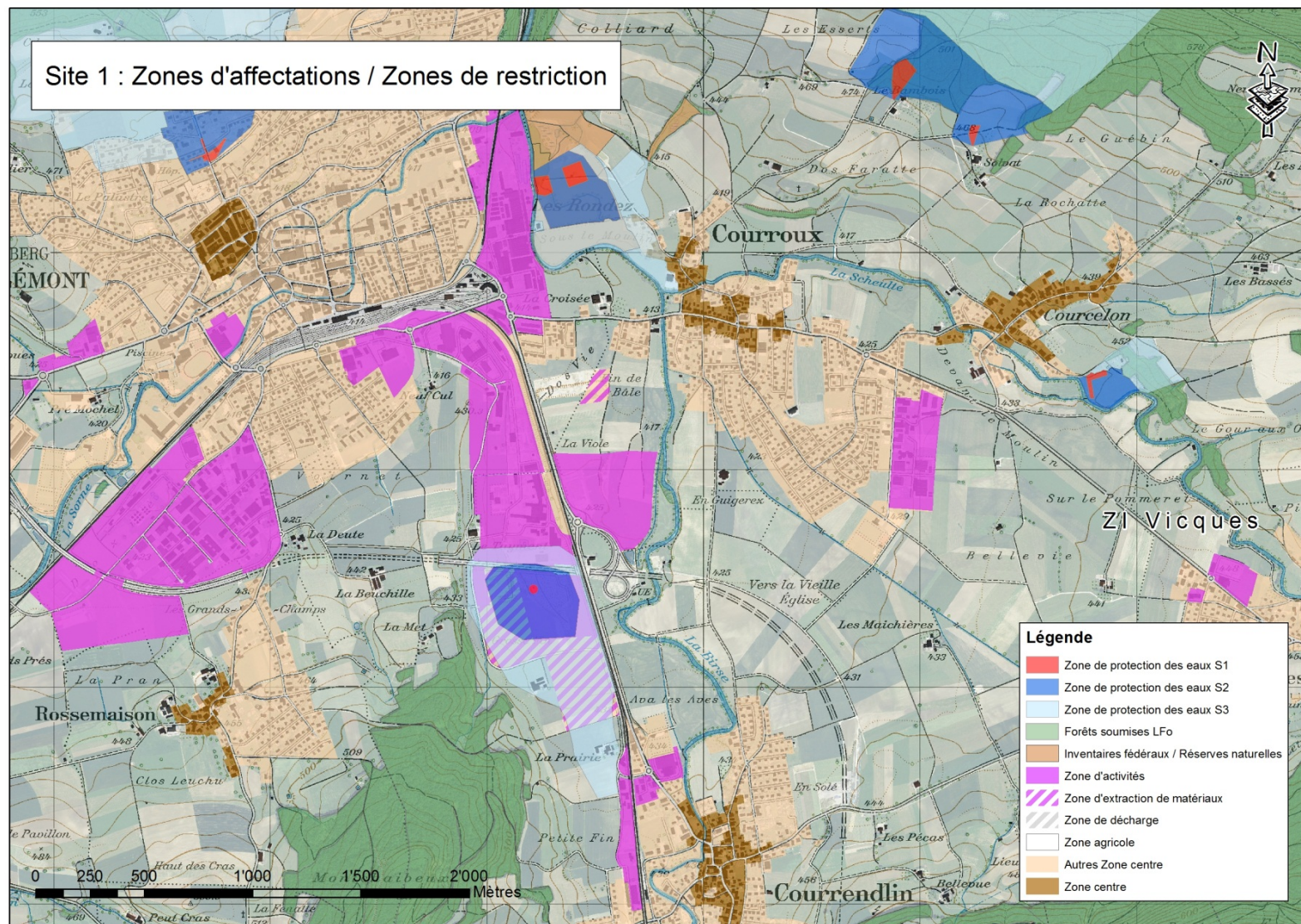


Figure 45 : Carte des zones d'affectations et des zones de restriction de la région de Delémont

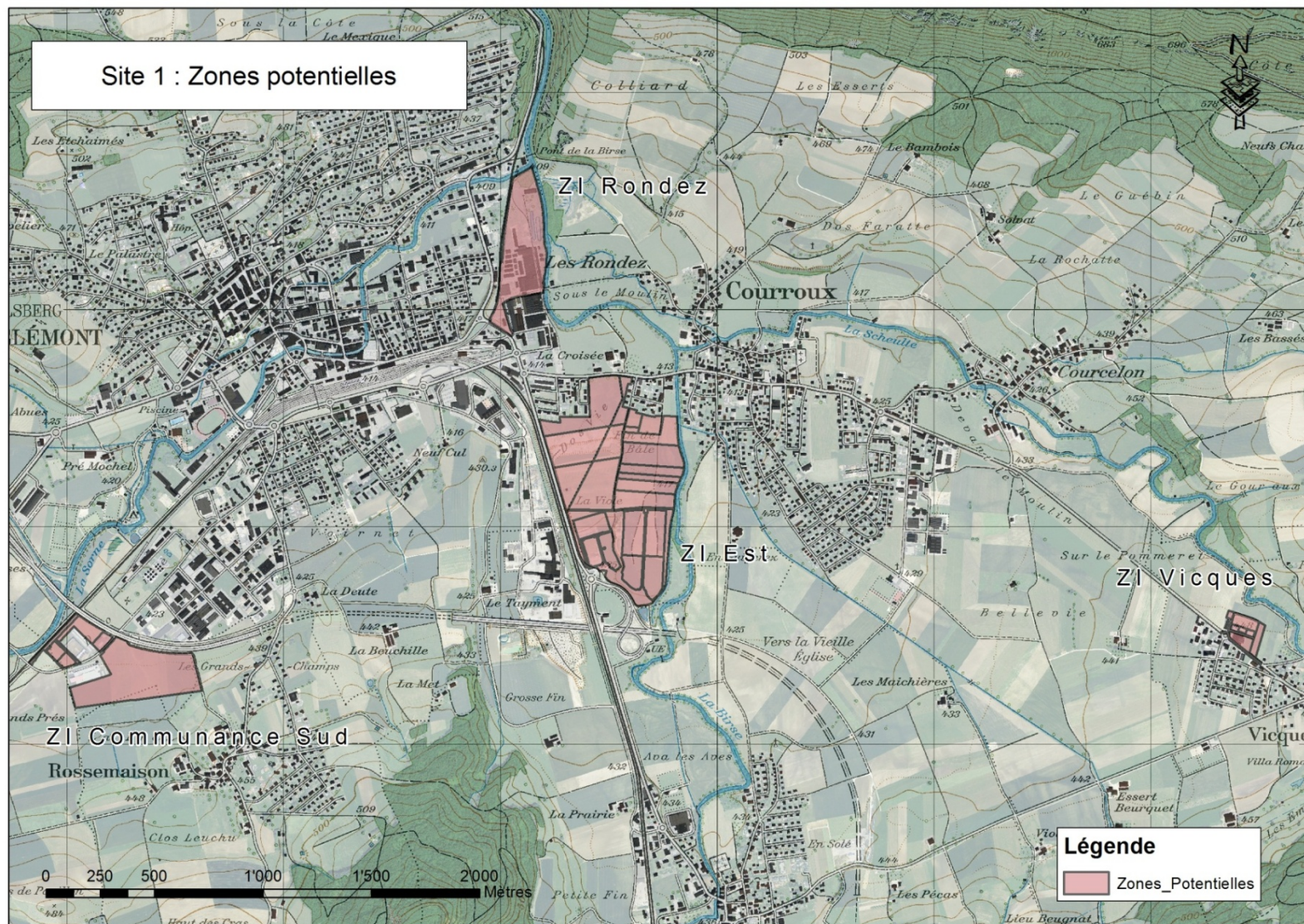


Figure 46 : Zones potentielles de la région de Delémont



Les 4 zones de la région de Delémont se situent dans des zones de dangers indicatifs de crues. Ces informations permettent de mettre en évidence les secteurs nécessitant des mesures potentielles à prendre. Certains sites (1.1, 1.2 et 1.4) ne sont que partiellement touchés par les crues potentielles. Il est préférable de s'orienter vers les emplacements non touchés, mais pour des zones éventuellement touchées par des crues des remblaiements sont envisageables.

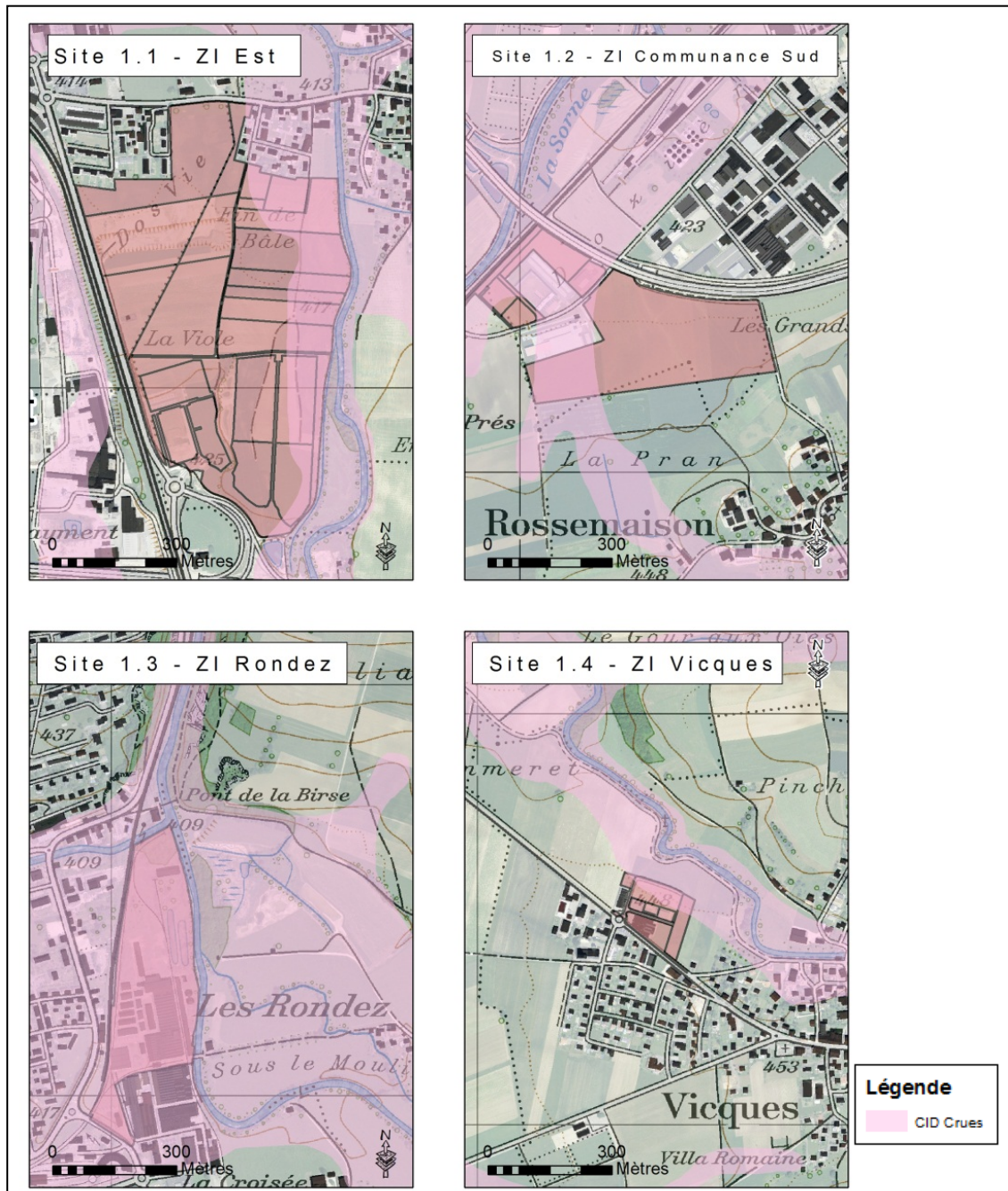


Figure 47 : Dangers naturels potentiels (Carte indicative des dangers) dans les zones potentielles de la région de Delémont

Les informations du cadastre des sites pollués permettent également de prendre des mesures nécessaires. Pour la région de Delémont, seule la Zone Industrielle Est comprend une décharge sur sa moitié Ouest qui nécessite une surveillance. La moitié Est (basse terrasse) ne comprend aucun site pollué.

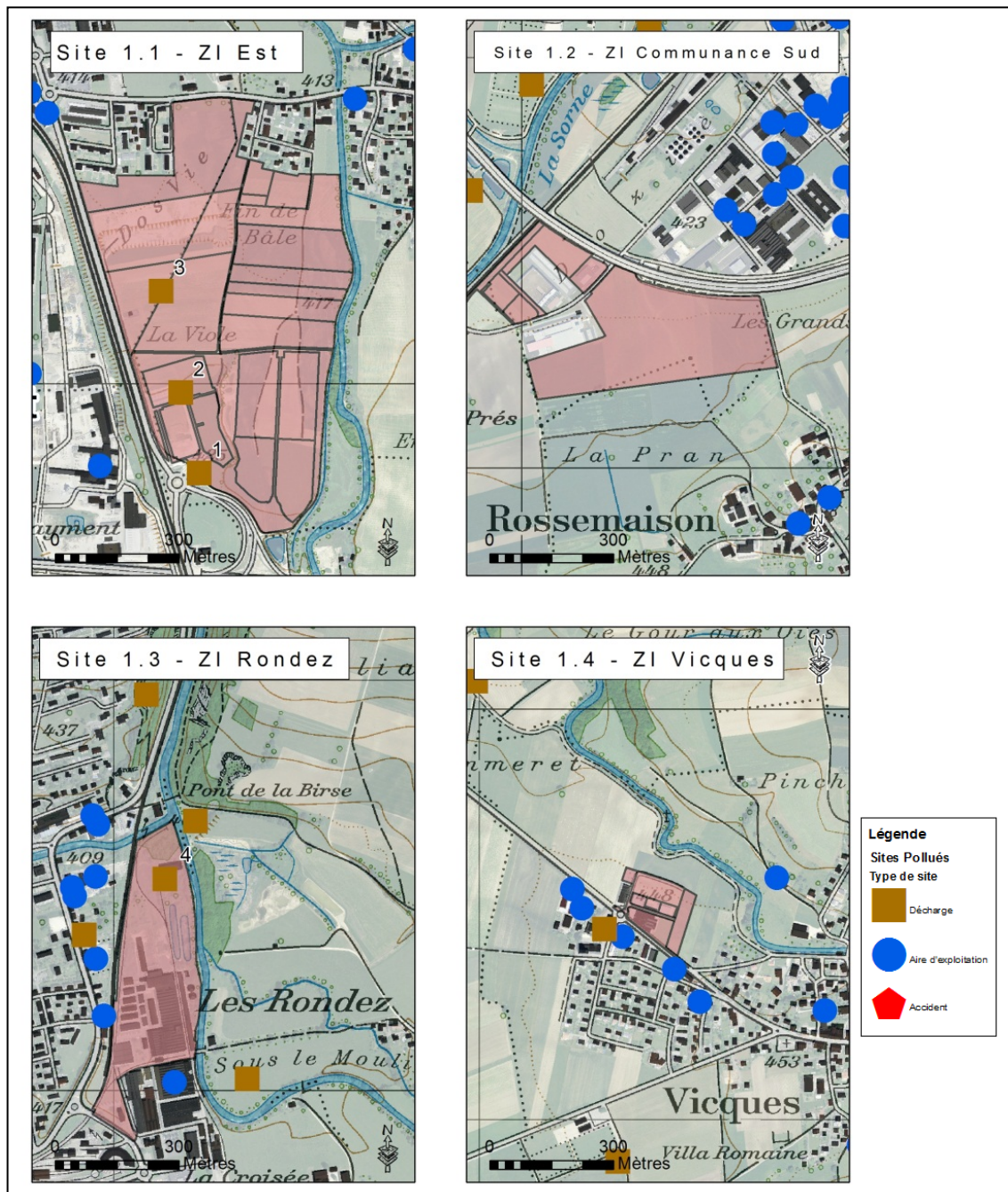


Figure 48 : Cartes du cadastre des sites pollués de la région de Delémont

1. Site pour lequel on ne s'attend à aucune atteinte nuisible ou incommode
2. Site nécessitant une surveillance
3. Site pour lequel on ne s'attend à aucune atteinte nuisible ou incommode
4. Site pour lequel on ne s'attend à aucune atteinte nuisible ou incommode



Photo 1 : Vues de la zone industrielle Est



Photo 2 : Vues de la zone industrielle de la Communance Sud



Photo 3 : Vues de la zone industrielle des Rondez

#### 4.1.1.2 Site 2 - Porrentruy Ouest

| ID_Site | Sites potentiels | Géologie 30%    |      | Mise en valeur de l'énergie 50% |                                    |                           |                        |      | Divers 20%                    |              |      | Note globale |
|---------|------------------|-----------------|------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------|------|-------------------------------|--------------|------|--------------|
|         |                  | Risque sismique | Note | Distance à un centre urbain     | Station de distribution électrique | Source de refroidissement | Thermoréseau potentiel | Note | Dangers naturels particuliers | Type de zone | Note |              |
| 2       | Porrentruy Ouest | 2               | 2    | 3                               | 3                                  | 1                         | 3                      | 2.5  | 1                             | 3            | 2    | 2.3          |

Tableau 9 : Extrait pour la région de Porrentruy de l'évaluation des sites potentiels

**Risque sismique** : En comparaison suisse, le risque sismique est faible à modéré dans tout le canton. Afin de refléter ce fait, des notes entre 1.5 (modéré) et 3 (faible) ont été attribuées aux différents sites. La région de Porrentruy, en tant que deuxième zone urbaine du canton, reçoit une note 2.

**Distance à un centre urbain** : La ville de Porrentruy représente le deuxième centre urbain du canton du Jura. La note maximale est donc obtenue pour le critère de distance par rapport à un centre urbain.

**Station de distribution électrique** : La sous-station électrique de Porrentruy a la capacité d'absorber l'électricité produite par la centrale. Elle se situe entre Fontenais et Porrentruy et permet pour ce critère l'obtention de la note 3.

**Source de refroidissement** : La ville de Porrentruy est traversée par le cours d'eau de l'Allaine, qui présente un débit moyen de 3,21 m<sup>3</sup>/s) et un débit d'étiage Q<sub>347</sub> de 0,49 m<sup>3</sup>/s. A titre d'information, il faut un débit minimal assuré de 2 m<sup>3</sup>/s pour refroidir un ORC de 3'000 kWél, en comptant une augmentation de la température de l'eau de 3°C.

Par conséquent, nous pouvons attribuer une note de 2 pour le site de Porrentruy car un refroidissement partiel de l'ORC pourrait être réalisable par l'Allaine en période de moyennes et hautes eaux. En effet, en période d'étiage, le débit et la température de l'eau de l'Allaine ne permettent pas le refroidissement de l'ORC. Dans ce cas, un système de refroidissement hybride sera prévu (refroidissement par aérorefroidisseurs et eau).

**Thermoréseau potentiel** : Un thermoréseau dont la puissance thermique souscrite est de 18'500 kW existe à Porrentruy, et une deuxième centrale est en projet. Le raccordement d'une centrale de géothermie profonde à ce réseau pour la mise en valeur de l'énergie est un atout majeur pour Porrentruy.

**Dangers naturels particuliers** : La figure 51 présentée plus bas présente deux zones de dangers différents pour le même site de Porrentruy. Les différentes mesures à prendre pour faire face à ces dangers ne permettent de donner que la note minimale pour ce critère.

**Type de zone** : Le site est actuellement composé majoritairement de zones agricoles, ainsi que d'une zone industrielle. Dans l'état actuel, une note de 1 aurait dû être définie. Cependant, une motion a récemment été votée au conseil municipal afin de changer l'affectation de ces zones agricoles en une zone d'activité industrielle intercommunale (Porrentruy et Courtedoux).

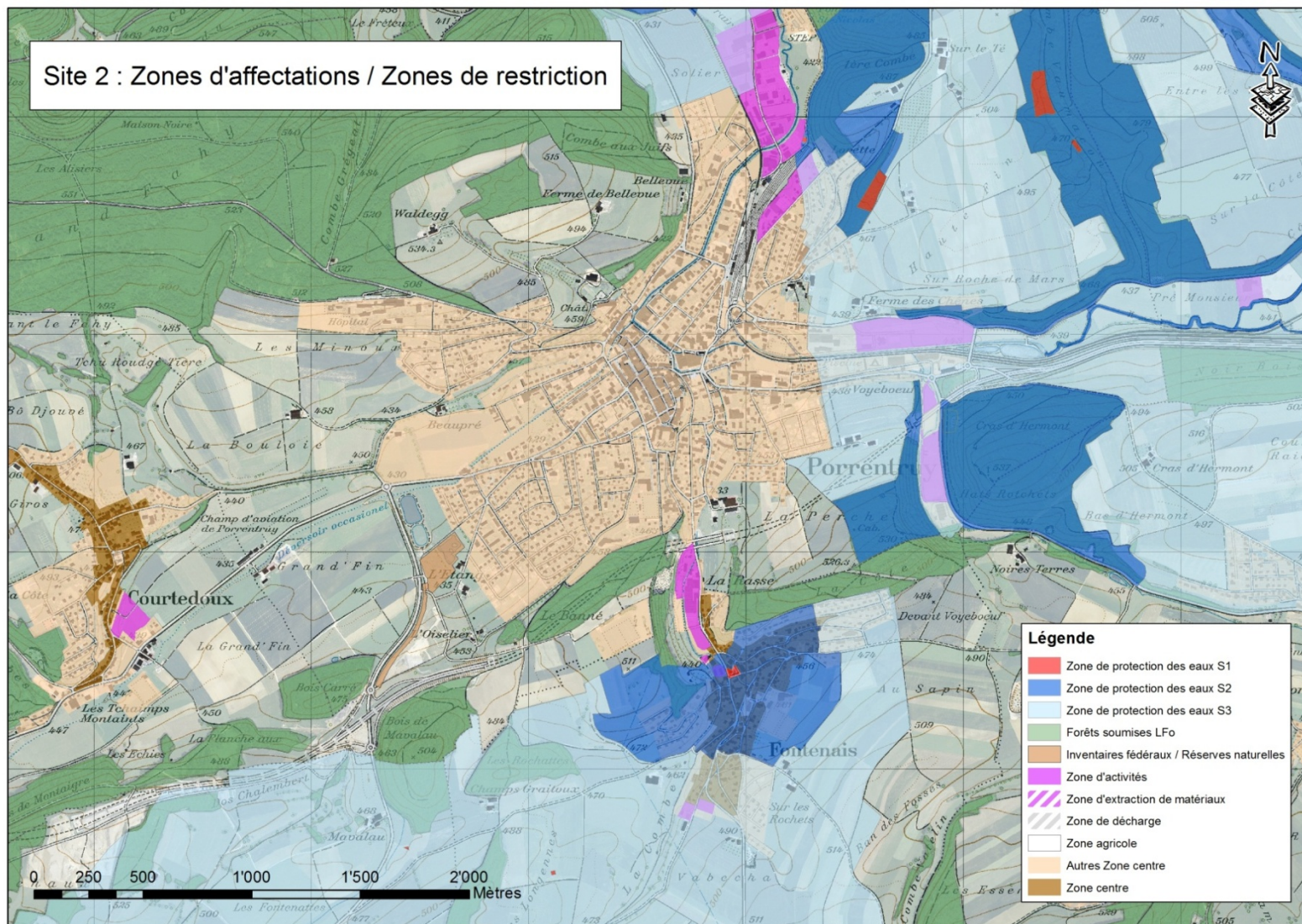


Figure 49 : Carte des zones d'affectations et des zones de restriction de la région de Porrentruy

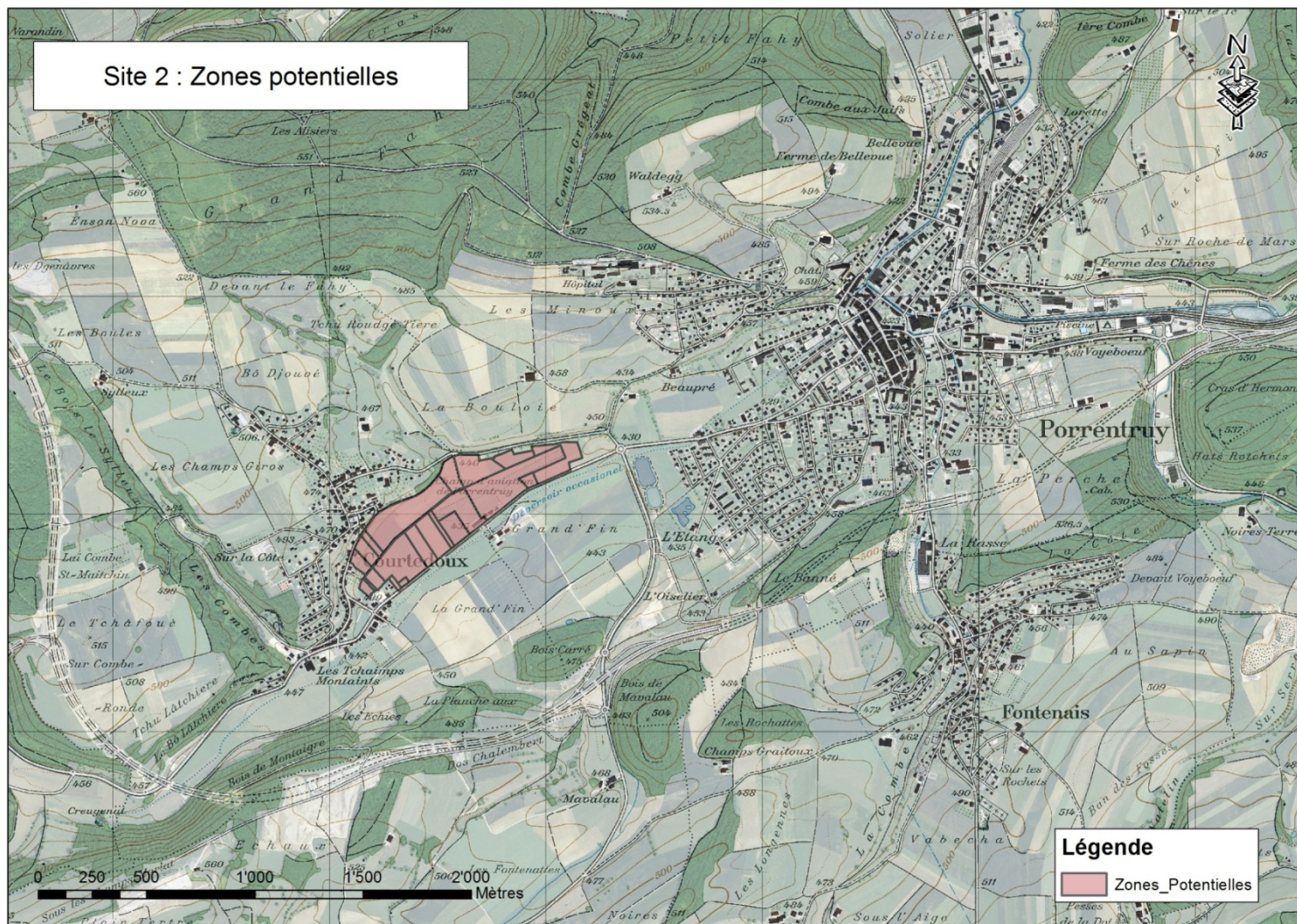


Figure 50 : Carte des zones potentielles de la région de Porrentruy

Le site potentiel de Porrentruy Ouest est presque intégralement compris dans des zones de dangers. Celles-ci sont composées de zones de crues et d'effondrement.

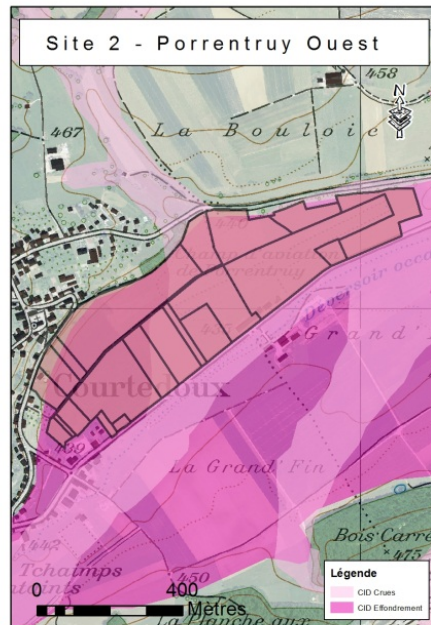


Figure 51 : Dangers naturels potentiels (Carte indicative des dangers) dans les zones potentielles de la région de Porrentruy

Le site de Porrentruy ne comprend pas de données figurant sur le cadastre des sites pollués. Seule une aire d'exploitation comprenant un garage automobile et une station-service se situe à proximité du site potentiel, mais on ne s'attend pour ce cas à aucune atteinte nuisible ou incommode.

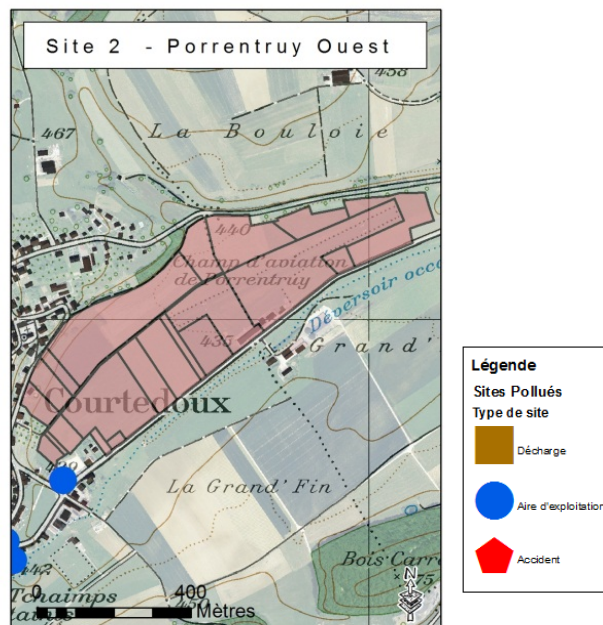


Figure 52 : Carte du cadastre des sites pollués de la région de Porrentruy



Photo 4 : Vue du site potentiel de Porrentruy Ouest



#### 4.1.1.3 Site 3 - Bassecourt Est

| ID_Site | Sites potentiels | Géologie 30%    |      | Mise en valeur de l'énergie 50% |                                    |                           |                        |      | Divers 20%                    |              |      | Note globale |
|---------|------------------|-----------------|------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------|------|-------------------------------|--------------|------|--------------|
|         |                  | Risque sismique | Note | Distance à un centre urbain     | Station de distribution électrique | Source de refroidissement | Thermoréseau potentiel | Note | Dangers naturels particuliers | Type de zone | Note |              |
| 3       | Bassecourt Est   | 2.5             | 2.5  | 3                               | 3                                  | 2                         | 3                      | 2.75 | 3                             | 2            | 2.5  | 2.6          |

Tableau 10 : Extrait pour la région de Bassecourt de l'évaluation des sites potentiels

**Risque sismique** : En comparaison suisse, le risque sismique est faible à modéré dans tout le canton. Afin de refléter ce fait, des notes entre 1.5 (modéré) et 3 (faible) ont été attribuées aux différents sites. La région de Bassecourt se voit attribuer la note 2.5.

**Distance à un centre urbain** : La commune de Bassecourt se classe troisième au niveau de la de population. Sa proximité avec les communes de Boécourt, Glovelier et Courfaivre lui permet d'être considérée comme un centre urbain important et peut présenter un potentiel très intéressant pour la mise en valeur de l'énergie.

**Station de distribution électrique** : Il existe deux sous-stations capables d'absorber l'électricité produite par une centrale de géothermie. Il s'agit évidemment de la sous-station de Bassecourt ainsi que celle de Boécourt.

**Source de refroidissement** : La Sorne (débit moyen : 4,3 m<sup>3</sup>/s) est la seule rivière traversant Bassecourt présentant un débit partiellement suffisant pour refroidir un ORC. A titre d'information, il faut un débit minimal assuré de 2 m<sup>3</sup>/s pour refroidir un ORC de 3'000 kWél. Nous pouvons attribuer une note de 2 car un refroidissement partiel de l'ORC est réalisable par la Sorne. En effet, en période d'étiage (Q<sub>347</sub> : 1,02 m<sup>3</sup>/s), le débit et la température de l'eau de la Sorne ne permettent pas le refroidissement de l'ORC. Dans ce cas, un système de refroidissement hybride sera prévu (refroidissement par aérorefroidisseurs et eau en hiver et à l'entre saison et un refroidissement par aérorefroidisseurs uniquement durant la période estivale).

**Thermoréseau potentiel** : Il n'existe pas de thermoréseau à Bassecourt mais le potentiel est important. Une étude a récemment été menée afin de déterminer le potentiel de valorisation de la chaleur pour cette commune. Suite au sondage de la population, trois thermoréseaux économiques peuvent être réalisés avec une puissance souscrite de 2'100 kW pour la zone Est, 2'500 kW pour la zone Ouest et 2'300 kW pour la zone centre. La commune de Bassecourt aimerait réaliser un thermoréseau interconnectant les trois zones étudiées avec une puissance souscrite de 6'900 kW. Aujourd'hui, c'est le potentiel de bois qui n'est pas suffisant pour alimenter intégralement le projet de thermoréseau de Bassecourt.

**Dangers particuliers** : Les détails concernant les dangers naturels sont expliqués plus bas (Figure 53). Le site de Bassecourt est composé de deux secteurs. Seule la partie inférieure se situe en zone indicative de dangers de crues. La note 2 a été attribuée au site de Bassecourt pour ce critère.

**Type de zone** : Il n'y a pas de place disponible dans les zones industrielles existantes à Bassecourt. Le site le plus approprié est probablement situé sur les parcelles agricoles adjacentes à la sous-station FMB-BKW, elle-même située pour l'essentiel en zone industrielle. Ces parcelles nécessiteraient donc un changement de plan d'affectation mais s'intégreraient parfaitement dans le paysage « industrialisé » de ce secteur.

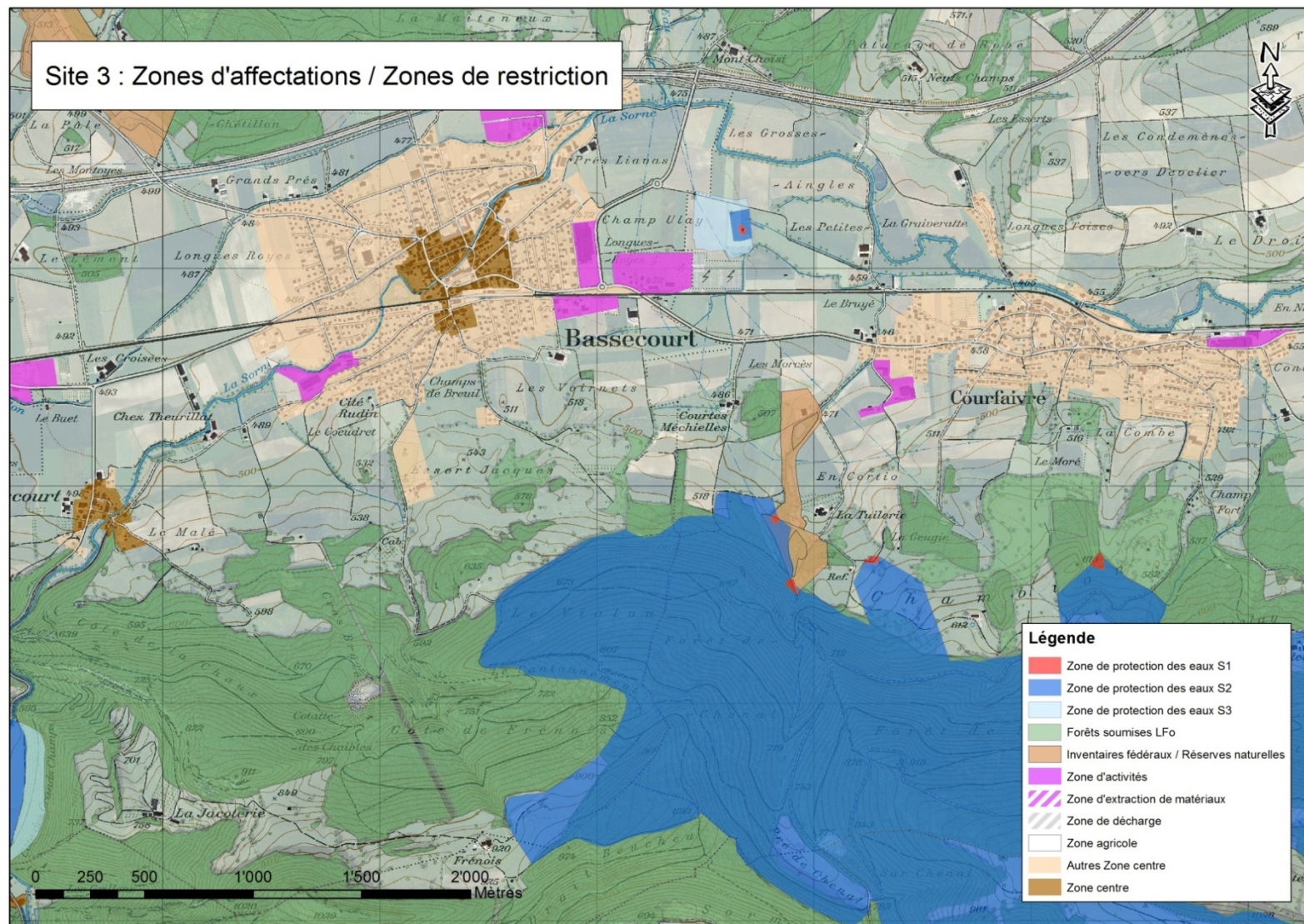


Figure 53 : Carte des zones d'affectations et des zones de restriction de la région de Bassecourt

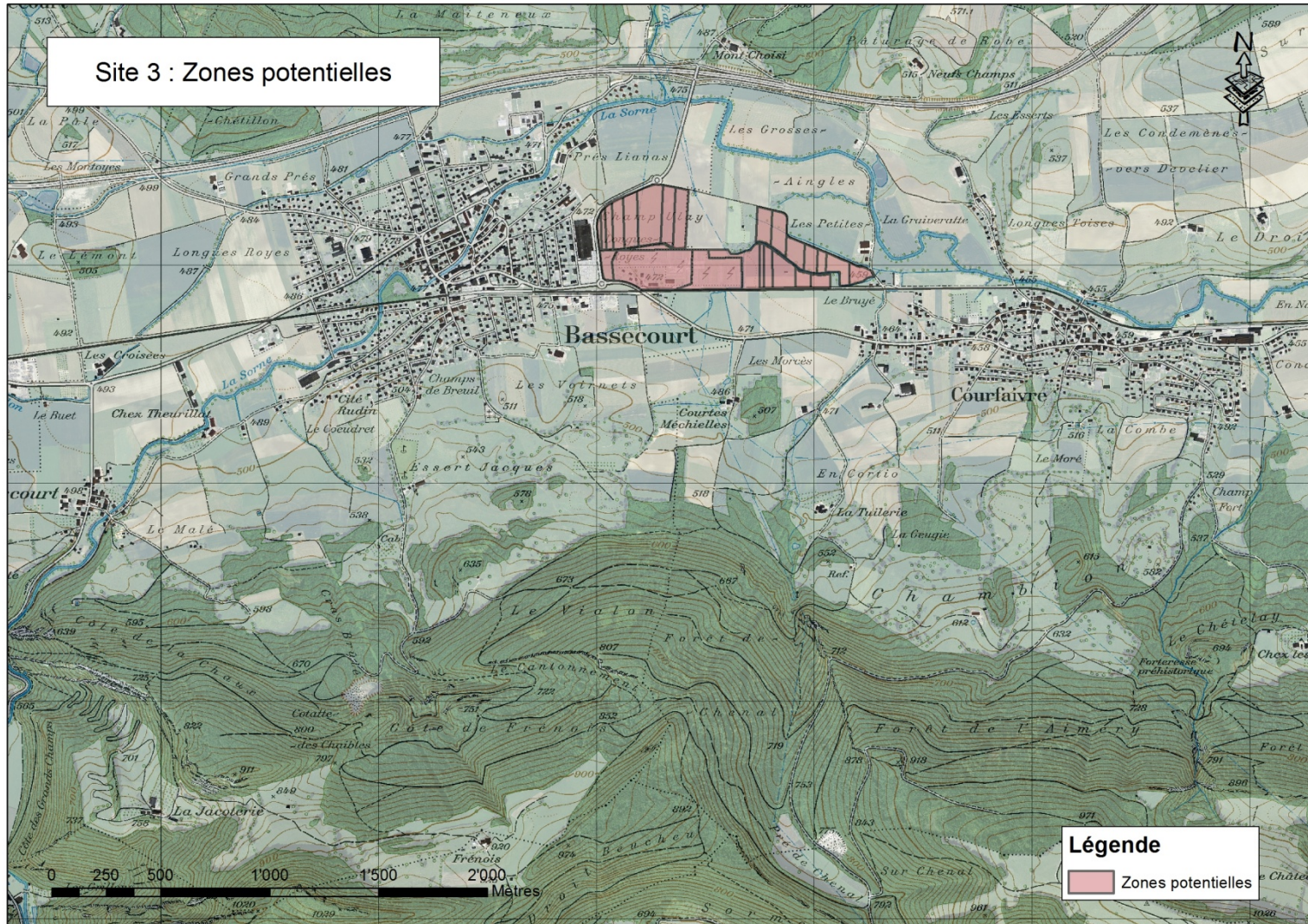


Figure 54 : Carte des zones potentielles de la région de Bassecourt

La partie du site de Bassecourt au nord de la route cantonale n'est touchée par aucune zone indicative de dangers. En revanche la zone au sud du rond-point pourrait être touchée par des crues extrêmes selon la carte indicative des dangers. Tout comme à Porrentruy et à Delémont, des remblaiements sont à envisager en cas de construction là où des crues pourraient survenir.

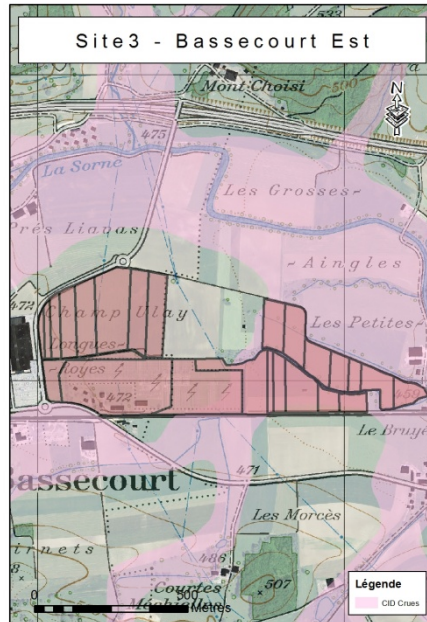


Figure 55 : Dangers naturels potentiels (Carte indicative des dangers) dans les zones potentielles de la région de Bassecourt

Concernant les sites pollués, l'aire d'exploitation de la sous-station FMB de Bassecourt est inscrite au cadastre des sites pollués. Une investigation est actuellement effectuée sur ce site.

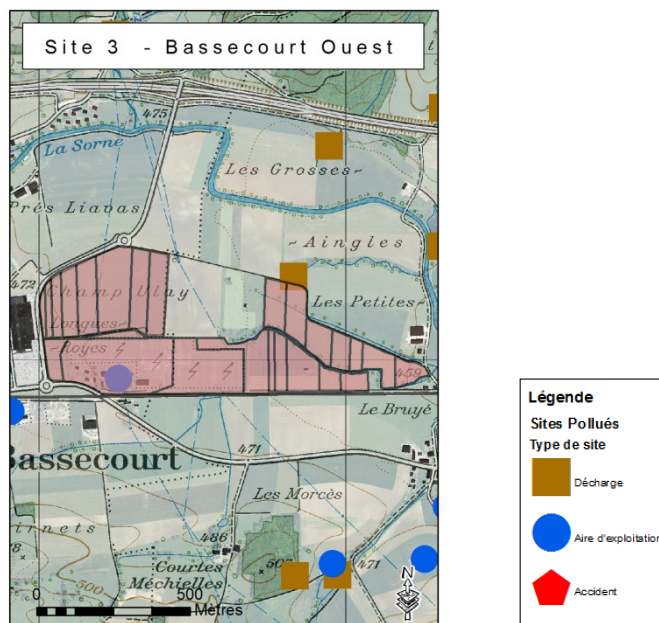


Figure 56 : Carte du cadastre des sites pollués de la région de Bassecourt



Photo 5 : Vue de la zone potentielle de Bassecourt Est

---

## 5. Conclusions

---

Les connaissances géologiques actuelles du sous-sol profond du canton du Jura révèlent qu'aux profondeurs requises pour la production d'électricité (4 à 5 km), les roches cristallines du socle dominant. Cela implique que les ressources géothermiques profondes ne peuvent être exploitées que grâce à la technologie des systèmes géothermiques stimulés (ou EGS).

La première tentative d'application de cette technologie à l'échelle Suisse a eu lieu à Bâle et s'est soldée par l'abandon du projet en 2006 suite à des secousses sismiques fortement ressenties par la population. Fort de cette expérience, ainsi que de celle d'autres projets internationaux, un nouveau concept dit „multi-fractures horizontal“ alliant des forages horizontaux à la stimulation séquentielle de petits volumes de roche a été développé. Cette approche devrait permettre la réalisation d'un système intrinsèquement sûr et offrant un rendement énergétique supérieur. Qui plus est, la sismicité naturelle faible à modérée, ainsi qu'une densité du bâti incomparable aux grands centres urbains, rendent le Canton du Jura très approprié à l'échelle nationale pour la réalisation d'un projet pilote de géothermie pétrothermale.

Notre étude a permis de mettre en évidence une dizaine de sites dans le Canton du Jura potentiellement favorables à l'implantation d'une centrale géothermique pilote. Les trois meilleurs sites retenus l'ont été à cause de leur géologie, de leurs infrastructures, des plans d'affectation et du potentiel de valorisation de la chaleur. Ces sites se situent à proximité des communes de Delémont, Bassecourt et Porrentruy. La mention dans le plan directeur cantonal de l'encouragement au développement de la géothermie profonde permettrait de définir le cadre réglementaire nécessaire à la réalisation de tels projets sur les sites étudiés.

Cette étude a également montré qu'une paire de forages d'injection et de production (doublet géothermique) couplée à un générateur électrique de type ORC aurait une puissance thermique de 25 MW<sub>th</sub> et une puissance électrique nette de près de 3 MW<sub>e</sub>, représentant une production électrique annuelle nette de 22 GWh. En cas de succès, il serait possible de réaliser plusieurs doublets à partir d'un même site afin d'optimiser la production d'énergie.

L'étude « Consommation et approvisionnement en énergie du canton du Jura » de Weinmann-Energie SA a établi un besoin annuel en nouvelles énergies renouvelables à l'horizon 2035 de quelques 386 GWh sur une consommation d'électricité totale estimée à 690 GWh par an, le solde étant fourni par les énergies renouvelables disponibles aujourd'hui et les sources non renouvelables. La réalisation à terme de trois centrales géothermiques exploitant chacune cinq doublets sur les trois meilleurs sites du canton permettrait la production annuelle de courant électrique de ruban et sans émissions de CO<sub>2</sub> d'environ 334 GWh, représentant ainsi la majorité des besoins en nouvelles énergies renouvelables et près de 50% de la consommation électrique cantonale annuelle estimée en 2035.

La valorisation de la chaleur résiduelle pourrait se faire par le biais de réseaux de chauffage à distance. La mise à disposition d'une grande quantité de chaleur pourrait justifier la mise en place d'un réseau interurbain couvrant par exemple la vallée de la Sorne (Glovelier à Delémont). Les technologies actuelles permettent en effet le transport de la chaleur sur de grandes distances sans pertes considérables. Une étude plus approfondie de la question serait toutefois requise. Il est à noter que des projets interurbains similaires sont actuellement à l'étude en Suisse.

Nous sommes convaincus que cette source d'énergie renouvelable indigène, propre, non-émettrice de CO<sub>2</sub> et possédant qui plus est un faible impact sur le paysage sera amenée à jouer un rôle croissant dans l'approvisionnement énergétique de notre pays. Ces avantages évidents, combinés à un immense potentiel de développement, justifient à notre avis largement les risques immanquablement associés à une technologie encore immature. Il faut enfin relever le rôle absolument pionnier que jouera la région accueillant le premier projet-pilote. La République et Canton du Jura possède des caractéristiques en termes de géologie et d'infrastructures qui le rendent attractif pour la réalisation d'un projet-pilote de géothermie profonde basé sur la technologie des réservoirs stimulés. Le succès d'un tel projet aurait à n'en pas douter une visibilité bien au-delà des frontières cantonales et représenterait une opportunité en terme d'emplois et de savoir-faire.

---

## 6. Références

---

- AXPO, 2007: Strom für heute und morgen. Studie Stromperspektiven 2020.
- Baujard, C., Signorelli S. & Kohl T., 2007. Atlas des ressources géothermiques de la Suisse occidentale. Contribution à la géologie de la Suisse, Géophysique, N° 40, 68 pp.
- 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). Bull. géol. appl. 11/1, 19-34.
- Bossart, P. & M. Thury, M (2008) : Mont Terri Rock Laboratory Project. Programme 1996 to 2007 and Results". – Rep. Swiss Geological Survey 3.
- Brailard, L. (2006) : Morphogenèse des vallées sèches du Jura tabulaire d'Ajoie (Suisse): rôle de la fracturation et étude des remplissages quaternaires. GeoFocus, 14, Thèse N°1517, Univ. Fribourg, 19 mai 2006, p. 224.
- BRGM (données acquises en ligne) :  
1958. Rapport de fin de sondage: Montbouton 1, 1961. Rapport de fin de sondage: Knoeringue 1, 1961.  
Rapport de fin de sondage: Buez.
- Flury, F., Kubler, B. Rey, J.-PH. & Schindler, B. (1983) : Galerie Delémont-Bellerive. Observations géologiques et hydrogéologiques. Eclogae Geol. Helv., 76/3, p. 507-522.
- Flury, F., Allemann, R. & Lachat, R. (1991) : Recherche d'eau par forages dans l'aquifère profond du Malm à Delémont. – Résultats de la phase d'exploration. Gaz-Eaux-Eaux usées, SSIGE. Zurich, 12, p. 841-849.
- Guignard, J. (1974) : Rapport de fin de sondage: Orsans 1". SNPA, France.
- Häring, M.O., Schanz, U. Ladner, F., & Dyer, B. C. (2008) : "Characterization of the Basel 1 enhanced geothermal system". Geothermics (2008) Volume: 37, Issue: 5, Pages: 469-495
- Häring M.O., Schanz U., Ladner F., Dyer B.C., 2008. Characterization of the Basel 1 Enhanced Geothermal System. Geothermics (2008), doi:10.1016/j.geothermics.2008.06.002.
- Häring M.O., Schanz, U. Ladner, F., Dyer, B.C. 2008. Characterization of the Basel 1 enhanced geothermal system. Geothermics (2008) Volume: 37, Issue: 5, Pages: 469-495
- Häring, M.O., Schanz, U. Ladner, F., & Dyer, B. C. (2008) : "Characterization of the Basel 1 enhanced geothermal system". Geothermics (2008) Volume: 37, Issue: 5, Pages: 469-495
- Hauber, L. (1991) : "Ergebnisse der Geothermiebohrungen Riehen 1 und 2 sowie Reinach 1 im Südosten des Rheingrabens". Geol. Jb. E 48, p.167-184, Hannover.
- Hessenauer M., Rieben Ch. & Flury F. (2001) : Prospection d'eau souterraine par forages profonds à Muriaux (canton du Jura). Bull. Géol. Appl. 6/2, déc. 2001.
- Hessenauer M. & Flury F. (2010) : Prospection d'eau souterraine par forage profond incliné à Miécourt (Canton du Jura, Suisse). Swiss Bulletin de Géol. appl., Vol 15/1 2010.
- Ladner, F., Häring, M.O., 2009. Hydraulic characteristics of the Basel 1 enhanced geothermal system. GRC Transactions, Vol. 33. 199- 203 pp.

- Medici F. & Rybach L., (1995) : Geothermal map of Switzerland 1995 (heat flow density). Matér. Géol. Suisse, Géophysique, 30, ETH Zürich, 36 pp.
- MFR Géologie - Géotechnique SA (1993) : Gisement géothermique du bassin de Delémont. Etude préliminaire.
- Müller, W. H., Huber, M., Isler, A., & Kleboth, P. (1984) : NAGRA Technischer Bericht 84-25.
- OFEN, 1998. Géothermie : exploitation de l'énergie géothermique. Guide pour concepteurs, maîtres d'ouvrages, investisseurs et décideurs. Brochure, 23 pp.
- OFEN, 2011. Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates; Frühjahr 2011. Aktualisierung der Energieperspektiven 2035 (energiewirtschaftliche Modelle)
- Pfiffner, O. A. (2009) : Geologie der Alpen. UTB Haupt Verlag Bern, Stuttgart, Wien. Bern, 2009.
- PSI, 2005: Neue erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen: Potenziale und Kosten. PSI-Bericht Nr. 05-04.
- Rieben Ch. (2010) : Mise en valeur des aquifères profonds du Jura suisse pour l'alimentation en eau potable. Une synthèse de ces 20 dernières années. Journées de printemps de la Soc. suisse des hydrogéologues, 16 & 17 avril 2010, Fribourg.
- Schmidt, C, Braun, L., Paltzer, G., Mühlberg, M., Christ, P., & Jacob, F. (1924) : Die Bohrungen von Buix bei Pruntrut und Allschwil bei Basel". Geologie der Schweiz.
- Signorelli S. & Kohl T., 2006. Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik, N° 39, 107 pp.
- Suter, M. (1978) : Geologische Interpretation eines reflexionsseismischen W-E-Profiles durch das Delsberger Becken (Faltenjura). Eclogae Geol. Helv., Basel, 07.1978, p. 267-275.
- Swiss Seismological Service, 2004. Seismic Hazard Assessment of Switzerland, 2004. <http://www.seismo.ethz.ch>
- Ustaszewski, K. (2004) : Reactivation of pre-existing crustal discontinuities: the southern Upper Rhine Graben and the northern Jura Mountains - a natural laboratory. PhD Thesis, University of Basel, Faculty of Science.

Porrentruy, le 2 mai 2012

Groupement d'étude géothermie profonde Jura  
par RWB Jura SA

Daniel Urfer

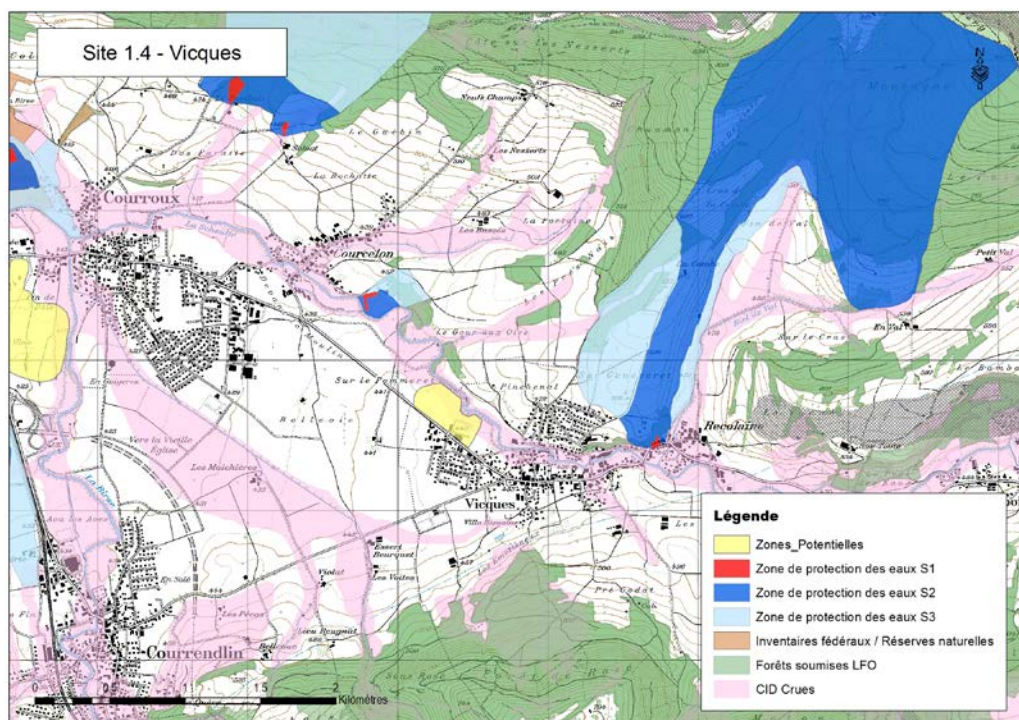


## Annexes

### Liste des annexes

|    |   |   |
|----|---|---|
| 1. | Fiche de Vicques                          | 2 |
| 2. | Fiche de Saignelégier Sud                 | 3 |
| 3. | Fiche de Choindez                         | 4 |
| 4. | Fiche de Courgenay Est                    | 5 |
| 5. | Fiche de Glovelier ZI Est / Boécourt SEOD | 6 |

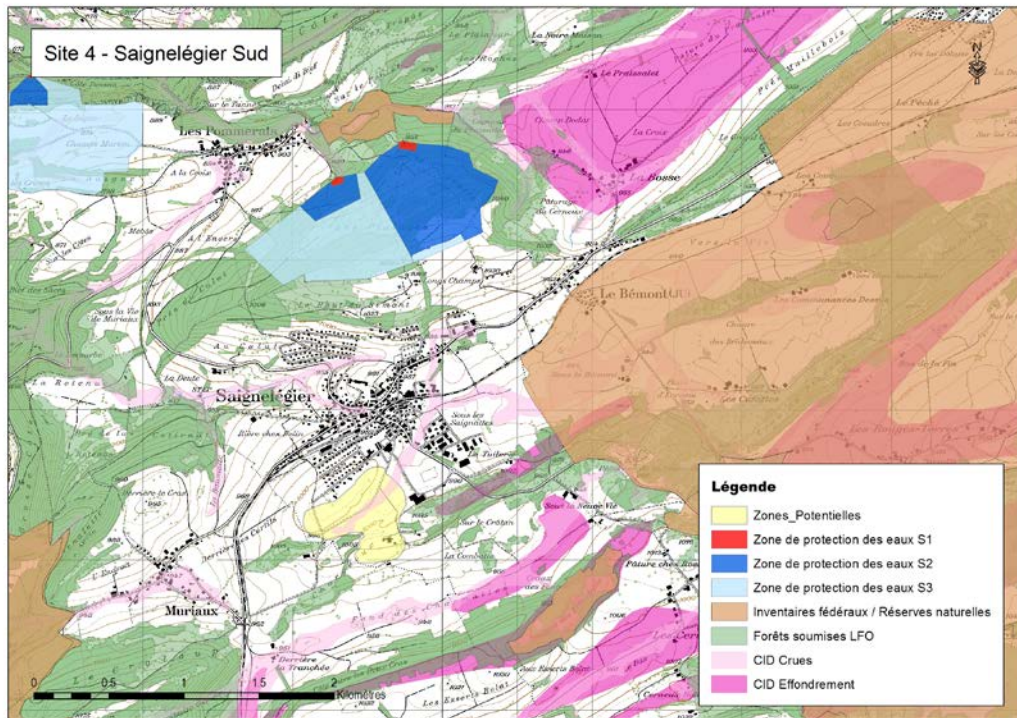
# 1. Fiche de Vicques



| ID_Site | Sites potentiels   | Géologie 30%    |      | Mise en valeur de l'énergie 50% |                                    |                           |                        |      | Divers 20%                    |              |      | Note globale |
|---------|--------------------|-----------------|------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------|------|-------------------------------|--------------|------|--------------|
|         |                    | Risque sismique | Note | Distance à un centre urbain     | Station de distribution électrique | Source de refroidissement | Thermoréseau potentiel | Note | Dangers naturels particuliers | Type de zone | Note |              |
| 1.4     | Vicques - ZI Ouest | 1.5             | 1.5  | 1                               | 2                                  | 1                         | 1                      | 1.25 | 2                             | 2            | 2    | 1.5          |

- En comparaison suisse, le risque sismique est faible à modéré dans tout le canton. Afin de refléter ce fait, des notes entre 1.5 (modéré) et 3 (faible) ont été attribuées aux différents sites. Vicques se voit attribuer la note 1.5.
- Le site de Vicques se situe à environ 5 kilomètres de Delémont. De plus, sa position est désavantageuse si on la compare aux sites retenus comme principaux à l'intérieur de la ville de Delémont. Les coûts supplémentaires nécessités ne permettent que de lui attribuer la note minimale.
- Il existe une sous-station capable de recevoir l'électricité au nord de Courrendlin. Néanmoins, sa distance ne peut lui accorder que la note 2.
- La rivière de la Scheulte traverse le site. Son faible débit (débit moyen : 1.54m<sup>3</sup>/s / Q347 : 0.38m<sup>3</sup>/s) ne rendrait pas possible la contribution au refroidissement d'un ORC et reçoit donc pour ce critère la note 1.
- Il n'existe aucun thermoréseau pour ce site et le potentiel est très faible.
- La carte indicative des dangers présente des dangers de crues. Des mesures sont envisageables mais présentent un coût supplémentaire non-négligeable. La note de 2 a donc été attribuée.
- Le site de Vicques est localisé en partie en zone industrielle et en partie en zone agricole. Cette situation ne lui permet que d'obtenir la note 2 pour ce critère.

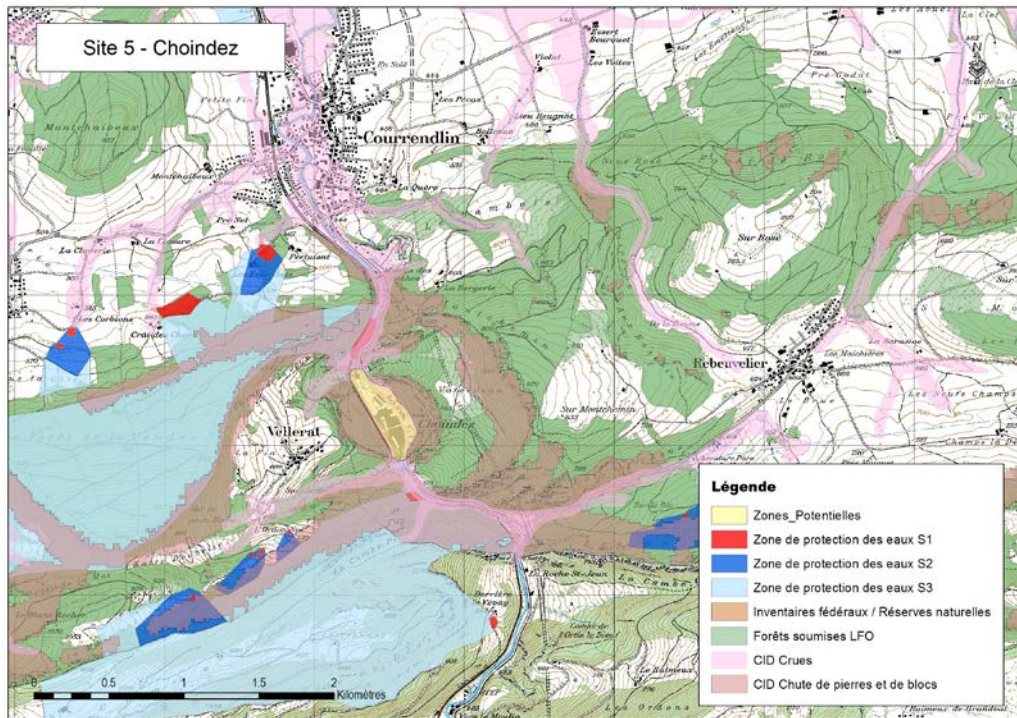
## 2. Fiche de Saignelégier Sud



| ID_Site | Sites potentiels | Géologie 30%    |      | Mise en valeur de l'énergie 50% |                                    |                           |                        | Divers 20% |                               |              | Note globale |      |
|---------|------------------|-----------------|------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------|------------|-------------------------------|--------------|--------------|------|
|         |                  | Risque sismique | Note | Distance à un centre urbain     | Station de distribution électrique | Source de refroidissement | Thermoréseau potentiel | Note       | Dangers naturels particuliers | Type de zone |              | Note |
| 4       | Saignelégier Sud | 3               | 3    | 1                               | 2                                  | 1                         | 2                      | 1.5        | 2                             | 1            | 1.5          | 2.0  |

- En comparaison suisse, le risque sismique est faible à modéré dans tout le canton. Afin de refléter ce fait, des notes entre 1.5 (modéré) et 3 (faible) ont été attribuées aux différents sites. La région de Saignelégier se voit attribuer la note maximale de 3.
- Le bassin de population de Saignelégier est nettement inférieur à Porrentruy et Delémont, on ne peut pas le considérer comme un centre urbain, une note de 1 a donc été attribuée pour ce critère.
- Il existe deux sous-stations possédant la capacité de recueillir l'électricité issue de la géothermie. Elles sont situées au Noirmont et à Tramelan. Leur distance par rapport à Saignelégier ne leur permet pas d'obtenir la note maximale.
- Il n'existe aucune rivière permettant de refroidir un ORC dans les alentours de Saignelégier.
- Il n'existe pas de projet de thermoréseau pour Saignelégier, mais un potentiel moyen existe. Une note de 2 a donc été mise pour ce critère.
- Les dangers naturels indiqués sont principalement des dangers de crue. Il existe également des dangers d'effondrement, mais ceux-ci se situent à une distance raisonnable du village, ou alors dans des zones de forêts.
- La zone potentielle définie à Saignelégier se trouve sur des zones agricoles. Pour cette raison, la note minimale de 1 a été attribuée.

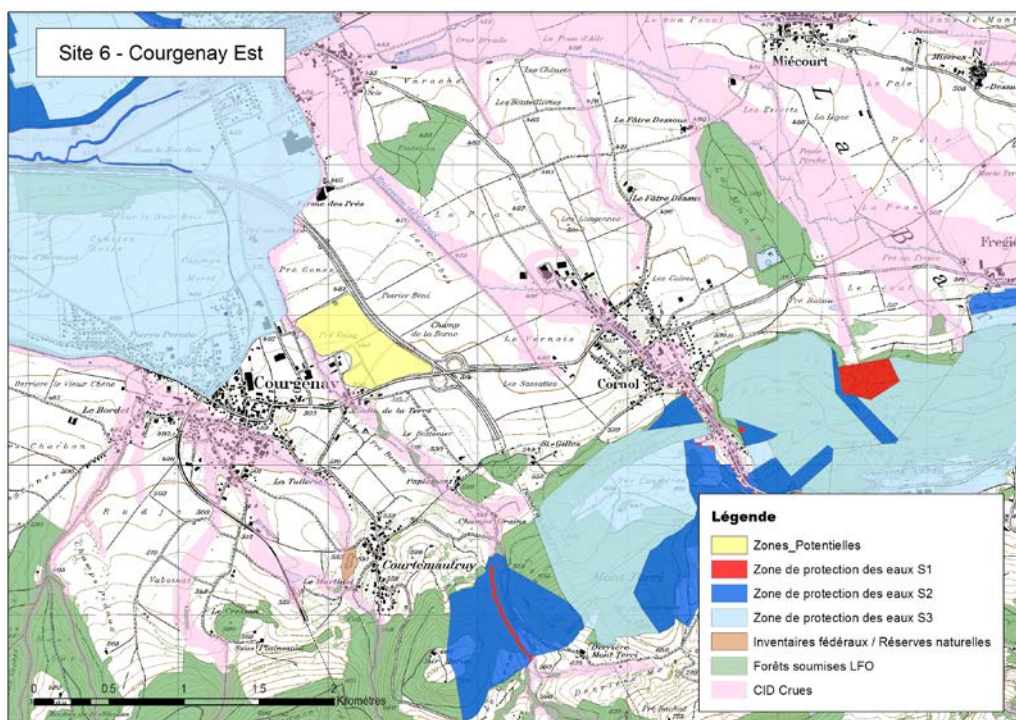
### 3. Fiche de Choindez



| ID_Site | Sites potentiels | Géologie 30%    |      | Mise en valeur de l'énergie 50% |                                    |                           |                        | Divers 20% |                               |              | Note globale |      |
|---------|------------------|-----------------|------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------|------------|-------------------------------|--------------|--------------|------|
|         |                  | Risque sismique | Note | Distance à un centre urbain     | Station de distribution électrique | Source de refroidissement | Thermoréseau potentiel | Note       | Dangers naturels particuliers | Type de zone |              | Note |
| 5       | Choindez         | 2               | 2    | 1                               | 2                                  | 2                         | 1                      | 1.5        | 1                             | 3            | 2            | 1.8  |

- En comparaison suisse, le risque sismique est faible à modéré dans tout le canton. Afin de refléter ce fait, des notes entre 1.5 (modéré) et 3 (faible) ont été attribuées aux différents sites. Choindez, au vu de sa proximité avec Delémont, se voit attribuer la note 2.
- Le site de Choindez se situe à environ 2.5 kilomètres de Courrendlin, et à environ 5 kilomètres de Delémont. De plus, sa position excentrée est fortement désavantageuse si on la compare aux sites retenus comme principaux à l'intérieur de la ville de Delémont. Les coûts supplémentaires nécessités ne permettent que de lui attribuer la note minimale.
- Il existe une sous-station capable de recevoir l'électricité au nord de Courrendlin. Néanmoins, sa distance ne peut lui accorder que la note 2.
- La rivière de la Birse traverse le site. Elle rendrait possible la contribution au refroidissement d'un ORC et reçoit donc pour ce critère la note 2.
- Il n'existe aucun thermoréseau pour ce site et son potentiel est inexistant.
- La carte indicative des dangers présente des dangers de crues, ainsi que de chute de pierres et de blocs. Des mesures sont envisageables mais présentent un coût supplémentaire non-négligeable.
- Le site de Choindez est presque exclusivement localisé en zone industrielle. Cette situation lui permet d'obtenir la note maximale pour ce critère.

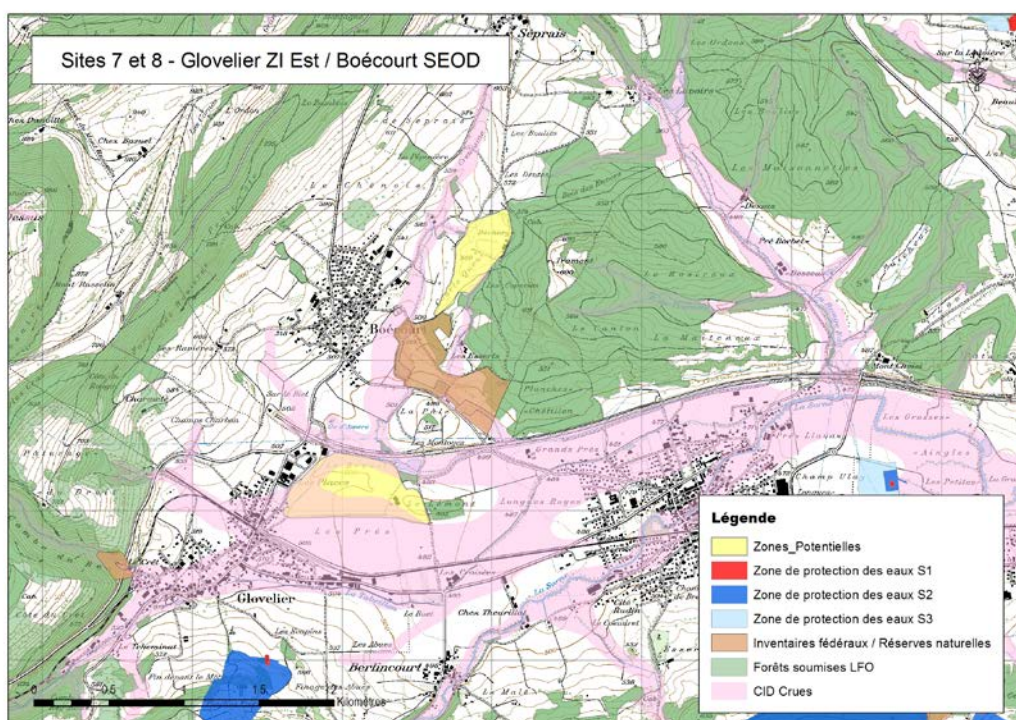
## 4. Fiche de Courgenay Est



| ID_Site | Sites potentiels                    | Géologie 30%    |      | Mise en valeur de l'énergie 50% |                                    |                           |                        |      | Divers 20%                    |              |      | Note globale |
|---------|-------------------------------------|-----------------|------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------|------|-------------------------------|--------------|------|--------------|
|         |                                     | Risque sismique | Note | Distance à un centre urbain     | Station de distribution électrique | Source de refroidissement | Thermoréseau potentiel | Note | Dangers naturels particuliers | Type de zone | Note |              |
| 6       | Courgenay - Nord Moulin de la Terre | 2.5             | 2.5  | 1                               | 1                                  | 1                         | 1                      | 1    | 3                             | 2            | 2.5  | 1.8          |

- En comparaison suisse, le risque sismique est faible à modéré dans tout le canton. Afin de refléter ce fait, des notes entre 1.5 (modéré) et 3 (faible) ont été attribuées aux différents sites. La région de Courgenay se voit attribuer la note 2.5.
- Le nombre d'habitants de la commune de Courgenay et sa distance par rapport à un centre urbain (Porrentruy) ne permettent à ce site que d'obtenir la note minimale.
- La sous-station la plus proche de Courgenay se situe entre Porrentruy et Fontenais. La distance entre le site de Courgenay ainsi que le caractère désavantageux de la topographie entre ces deux endroits ne permettent pas d'envisager de réinjecter le courant dans cette station. La note de 1 a donc été attribuée.
- Aucune rivière n'est présente dans les alentours de Courgenay.
- Il n'existe aucun thermoréseau existant à Courgenay et il n'y a pas de projet allant dans ce sens.
- La carte indicative des dangers présente des dangers des crues pour ce site, mais seule une infime partie est touchée. Pour cette raison, la note de 3 a quand même été attribuée.
- Le site de Courgenay est principalement situé en zone agricole, mais une zone d'activité industrielle non bâtie est également disponible et pourrait représenter une zone intéressante.

## 5. Fiche de Glovelier ZI Est / Boécourt SEOD



| ID_Site | Sites potentiels | Géologie 30%    |      | Mise en valeur de l'énergie 50% |                                    |                           |                        |      |                               | Divers 20%   |      |     | Note globale |
|---------|------------------|-----------------|------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------|------|-------------------------------|--------------|------|-----|--------------|
|         |                  | Risque sismique | Note | Distance à un centre urbain     | Station de distribution électrique | Source de refroidissement | Thermoréseau potentiel | Note | Dangers naturels particuliers | Type de zone | Note |     |              |
| 7       | Glovelier ZI Est | 2.5             | 2.5  | 2                               | 3                                  | 1                         | 2                      | 2    | 2                             | 2            | 2    | 2.2 |              |
| 8       | Boécourt SEOD    | 2.5             | 2.5  | 2                               | 3                                  | 1                         | 1                      | 1.75 | 3                             | 2            | 2.5  | 2.1 |              |

- En comparaison suisse, le risque sismique est faible à modéré dans tout le canton. Afin de refléter ce fait, des notes entre 1.5 (modérée) et 3 (faible) ont été attribuées aux différents sites. La région de Boécourt se voit attribuer la note 2.5.
- Les sites de Boécourt et de Glovelier ne représentent à eux seuls pas une population importante, mais lorsque ils sont combinés entre eux ainsi qu'à Bassecourt, ils peuvent représenter un potentiel intéressant. Pour cette raison, une note de 2 a été définie pour ce critère.
- Une sous-station électrique capable de recueillir l'électricité produite est présente entre Boécourt et Glovelier. La note pour ce critère pour les deux sites est donc maximale.
- Le cours d'eau du Tabeillon au sud de Glovelier ne présente pas de débit suffisamment important pour refroidir un ORC. Il n'existe pas de source de refroidissement non plus pour Boécourt. La note pour ces deux sites est donc de 1.
- Un projet de thermoréseau à relativement faible capacité thermique est en cours de réalisation dans la zone de la ZAM à Glovelier. La note obtenue pour ce site est donc de 2.
- La carte indicative des dangers ne mentionne aucun danger potentiel pour le site de Boécourt, et des dangers de crues sur une portion du site de Glovelier. Les notes obtenues sont respectivement de 3 et 2.
- Le site de Boécourt se situe en partie en zone de décharge, ce qui peut convenir pour l'implantation d'une centrale de géothermie. Le reste du site est affecté aux zones agricoles. Pour Glovelier, la zone comporte une zone d'activité industrielle et également de la zone agricole. Ces sites peuvent être appropriés dans une certaine mesure. La note de 2 a été décernée pour ces deux sites.