



Direction générale
de l'environnement

État de Vaud

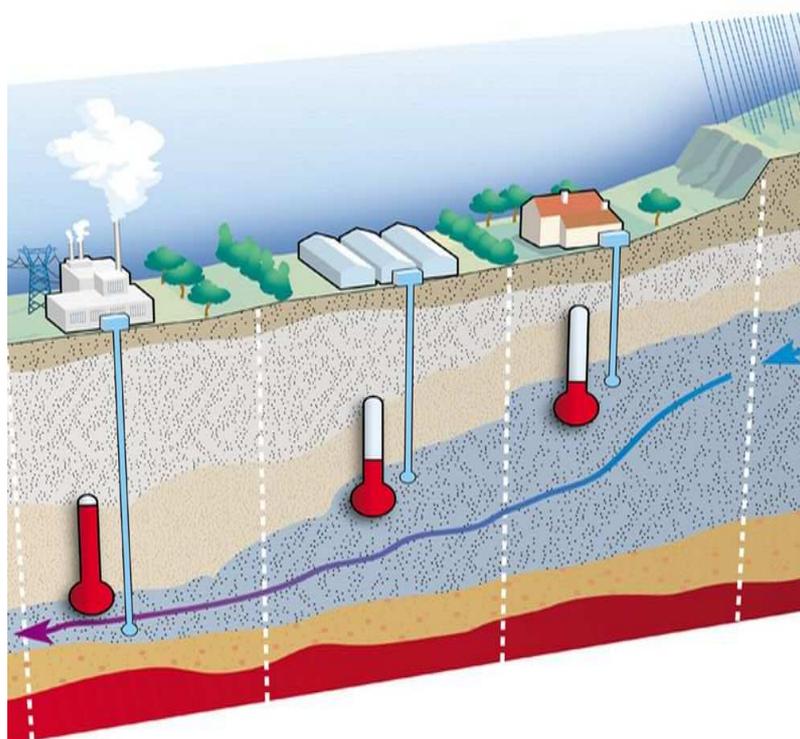
Division géologie, sols et déchets (GEODE)

Division approvisionnement et planification énergétique (APEN)

* * *

POTENTIEL GÉOTHERMIQUE EXPLOITABLE DES AQUIFÈRES DE MOYENNE ET GRANDE PROFONDEUR DANS LE CANTON DE VAUD

Lot : Bassin molassique



Augmentation de la température avec la profondeur (source : [Graphies.tèque-] sur RTS.ch publié le 16 octobre 2017)

Contact :

Direction générale de l'environnement (DGE)

Division Géologie, Sols et Déchets (GEODE)

Rue Valentin 10

CH-1014 Lausanne

Tel. : +41 21 316 75 25

[info.dge\(at\)vd.ch](mailto:info.dge(at)vd.ch)

www.vd.ch/dge

Image page de titre : Modifiée d'après <http://www.lausanne.ch/thematiques/services-industriels/les-sil/production/geothermie/>

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES	3
RÉSUMÉ – QU'EST-CE QUE LA GÉOTHERMIE PROFONDE ?	4
1 INTRODUCTION ET CONDITIONS CADRES	7
2 ÉTAT DE LA TECHNIQUE ET DES CONNAISSANCES DU SOUS-SOL	11
3 MÉTHODE ET HYPOTHÈSES POUR LA DÉTERMINATION DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE	15
4 DONNÉES DU CADASTRE DE GÉOTHERMIE PROFONDE	18
5 INCERTITUDES ET FIABILITÉ DES DONNÉES DU CADASTRE DE GÉOTHERMIE PROFONDE	25
6 PERSPECTIVES ET CONCLUSIONS	25
7 SOURCES UTILES	26

Ce document a pour objectif de faire un état des lieux des connaissances actuelles concernant la géothermie profonde pour le canton de Vaud, afin de stimuler le développement et l'émergence de nouveaux projets.

Résumé – Qu'est-ce que la géothermie profonde ?

Qu'est-ce que la géothermie en général?
(OFEN, 2017)

La géothermie, mot provenant du grec gêo (terre) et thermos (chaud), désigne non seulement les phénomènes thermiques se produisant à l'intérieur du globe terrestre, mais aussi la science qui étudie ces phénomènes thermiques ainsi que la source d'énergie qu'ils représentent.

Le terme géothermie est aussi utilisé pour les procédés techniques qui permettent d'exploiter cette ressource afin d'en tirer de l'énergie sous forme de chaleur ou d'électricité.

La géothermie représente actuellement 1 % de la consommation d'énergie (Chaleur et électricité dans le monde).

D'où provient la chaleur ?
(OFEN, 2017)

La chaleur est présente de manière naturelle dans le sous-sol. Elle provient de la désintégration d'isotopes naturellement radioactifs retrouvés dans et sous la croûte terrestre.

La température se trouvant dans le sous-sol va dépendre de trois facteurs principaux : la structure géologique, la circulation d'eaux souterraines et la profondeur.

Dès 10 à 20 m de profondeur, les effets du rayonnement solaire ainsi que des conditions et variations climatiques n'ont plus d'incidence sur la température du sous-sol (OFEN, 2017). À cette profondeur, la température du sous-sol est stable et s'élève à environ 12 °C en Europe centrale. Puis, elle augmente avec la profondeur de manière régulière. En d'autres termes : Plus on progresse en direction du centre de la terre, plus le sous-sol se réchauffe. C'est ce que l'on appelle le gradient géothermique.

Gradient géothermique pour la région du plateau vaudois
(OFEN, 2017)

L'augmentation de la température est dépendante des propriétés géologiques du sous-sol. Sur le plateau suisse, la température augmente d'environ 3 à 3.5 °C par 100 mètres de profondeur (Bassin sédimentaire). En absence d'anomalie géothermique, cela implique qu'une température supérieure à 100 °C pourrait être retrouvée dès 3'000 m de profondeur.

Différents types de géothermie

En fonction de la profondeur, on distingue dans le canton de Vaud :

- la géothermie de faible profondeur (< 400 mètres) ;
- la géothermie profonde (moyenne et grande profondeur).

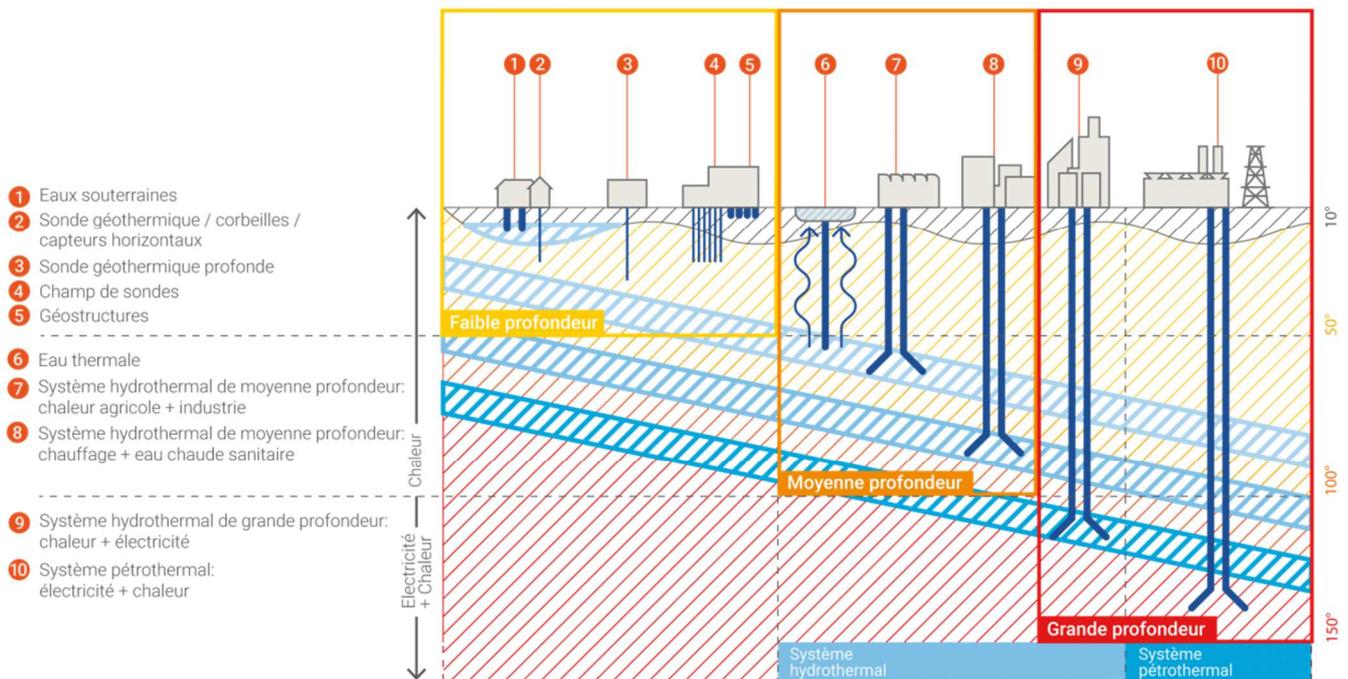


Figure 1 : Différents types de captages géothermiques (source : GEOTHERMIE-SUISSE.ch)

Sonde géothermique (système fermé)

Les sondes géothermiques verticales (SGV) sont utilisées dans le cadre de la géothermie de faible profondeur. Il s'agit d'un système fermé où l'énergie thermique du sous-sol est récupérée par conduction thermique en installant verticalement un échangeur de chaleur en forme de tube en U (ou parfois coaxial) dans lequel circule un fluide caloporteur. La chaleur accumulée par le fluide lors de son passage en profondeur est extraite à l'aide d'une pompe à chaleur (PAC) pour répondre aux besoins en chauffage et eau chaude sanitaire.

Systèmes hydrothermal et pétrothermal de moyenne et grande profondeur (systèmes ouverts)

Les systèmes hydrothermaux utilisent l'eau souterraine circulant naturellement dans les réservoirs aquifères du sous-sol. L'eau est extraite au moyen d'un forage puis, après valorisation de l'énergie contenue, elle est réinjectée par l'intermédiaire d'un deuxième forage installé à distance du premier (système ouvert). Ce système de doublet géothermique est utilisé dans le cadre de la géothermie de moyenne profondeur pour un réseau de chauffage à distance entre autres. Il est également considéré pour de la géothermie de grande profondeur avec pour objectif principal d'extraire de la chaleur pour le chauffage et, sous certaines conditions, de l'électricité (OFEN, 2017).

Contrairement au système hydrothermal, où l'énergie est extraite de l'eau déjà présente dans le sous-sol, le système pétrothermal, système ouvert, exploite la chaleur existante à grande profondeur dans les roches cristallines du soubassement. Pour ce faire, de l'eau est injectée par un premier forage jusqu'à un réservoir géothermique fissuré (échangeur de chaleur) dans lequel l'eau va se réchauffer, puis elle est pompée par un deuxième forage situé à l'autre extrémité du réservoir. Ce système de doublet géothermique est généralement utilisé pour de la géothermie de grande profondeur avec comme objectif principal, pour une telle installation,

de produire de l'électricité. Dans un deuxième temps et si c'est envisageable, la valorisation de la chaleur résiduelle avec un réseau de chauffage à distance est réalisée (OFEN, 2017).

Qu'est-ce que la géothermie profonde ?

Dans le canton de Vaud, la loi sur les ressources naturelles du sous-sol et son règlement d'application définissent par géothermie profonde (art. 2 LRNSS et art. 1 RLNRSS) :

- a. l'utilisation de la chaleur du sous-sol et celle des eaux souterraines dépendant du domaine public à partir de forages de plus de quatre cent mètres de profondeur, l'exclusion de la chaleur extraite par des sondes géothermiques en circuit fermé ;
- b. l'utilisation de la chaleur des eaux souterraines ayant une température naturelle supérieure à vingt degrés Celsius.

Cette ressource est la propriété de l'État qui a seul le droit d'en disposer. Elle ne peut être recherchées ou exploitées sans un permis de recherche ou une concession (art. 3 LRNSS).

1 INTRODUCTION ET CONDITIONS CADRES

Stratégie énergétique 2050 Dans le cadre de la stratégie énergétique 2050 et de l'entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2018 de la loi fédérale sur l'énergie (LEne), l'approvisionnement en chaleur et en électricité de la Suisse va subir des changements profonds.

Cette stratégie s'articule selon quatre piliers qui sont :

- accroître l'efficacité énergétique ;
- développer les énergies renouvelables tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre ;
- sortir progressivement du nucléaire ;
- développer et adapter les réseaux électriques dans un souci d'efficacité énergétique.

CoCEn 2019 Dans ce contexte, une nouvelle Conception cantonale de l'énergie (CoCEn) a été publiée en 2019, permettant d'actualiser ce document stratégique vaudois dont la dernière version datait de 2011. Tout en considérant les orientations ressortissant de la politique énergétique fédérale, le Conseil d'État y pose les bases de la politique énergétique qu'il a l'intention de développer afin de promouvoir un approvisionnement énergétique suffisant, diversifié, sûr, économique et respectueux de l'environnement. La CoCEn a pour but d'encourager l'utilisation des énergies indigènes, de privilégier le recours aux énergies renouvelables, d'encourager les technologies nouvelles permettant d'atteindre ses objectifs et renforce les mesures propres à la réduction des émissions de CO₂ ainsi que d'autres émissions nocives. Elle a pour objectif d'établir une utilisation économe et rationnelle de l'énergie (Site officiel de l'État de Vaud, 2019 ; CoCEn, 2019).

La géothermie profonde fait partie des énergies renouvelables indigènes à développer dans le cadre de cette transition énergétique. Le Canton se fixe pour objectif la réalisation d'une vingtaine de centrales géothermiques d'ici à 2050, ce qui permettra de fournir 300 GWh/an de chaleur et 40 GWh/an d'électricité.

Deux études ont été réalisées à l'échelle du canton, la première pour le plateau molassique et la deuxième pour la région Riviera-Chablais vaudois, concernant le potentiel géothermique existant au sein des aquifères de moyenne et de grande profondeur. Ces études ont mis en évidence une source d'approvisionnement importante pour le canton.

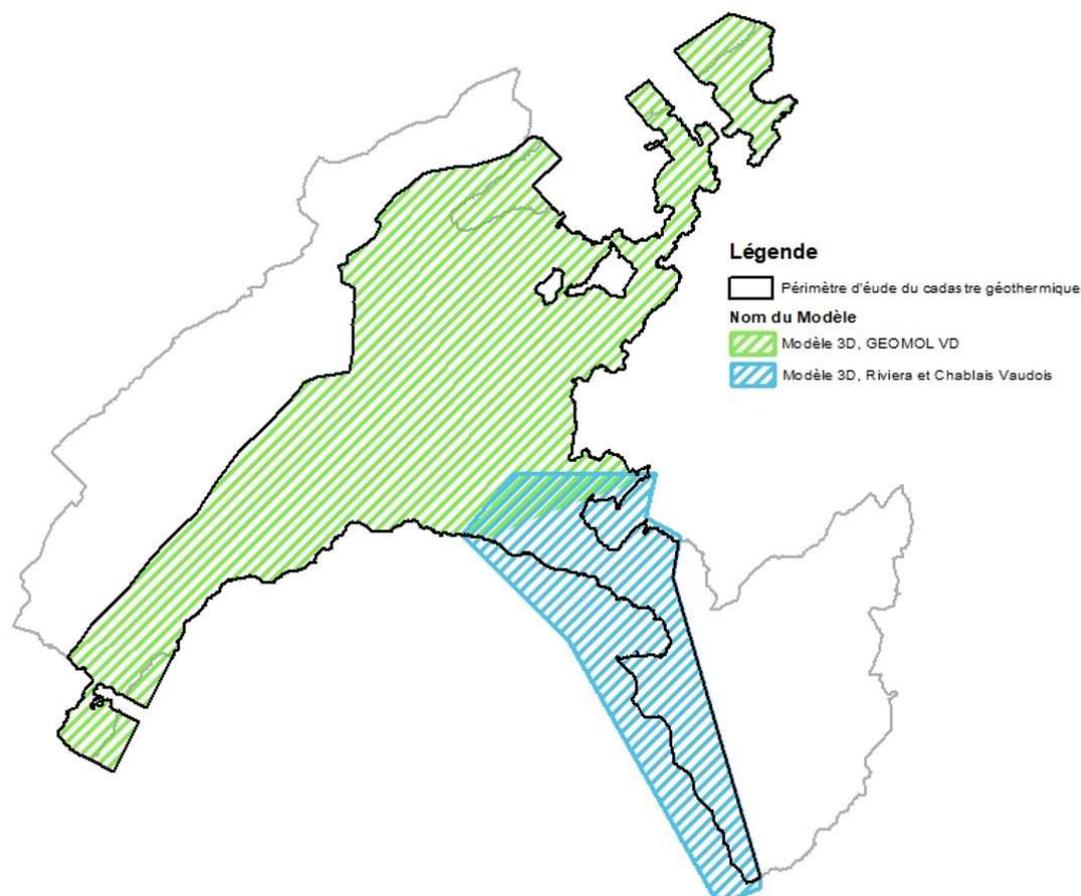


Figure 1 : Périmètres des modèles géologiques tridimensionnels utilisés par les études du potentiel géothermique profond. L'étude concernant le plateau molassique a employé le modèle GeoMol, alors que l'étude se consacrant à la Riviera et au Chablais vaudois a utilisé le modèle homonyme.

Procédures d'autorisation

La nouvelle loi sur les ressources naturelles du sous-sol (BLV 730.02 ; LRNSS) est entrée en vigueur le 1er avril 2019. Elle fixe notamment un cadre clair et encourageant pour le développement des projets de géothermie profonde. En particulier, les porteurs de projets bénéficient d'une l'exclusivité territoriale et de l'absence de redevance sur la recherche et l'exploitation d'énergie géothermique.

La LRNSS prévoit, pour une ressource spécifique sur un territoire donné, les étapes suivantes :

- a. l'octroi d'un **permis de recherche en surface (PRSU)** ; il permet d'effectuer les premières investigations superficielles ainsi que l'étude de faisabilité du projet géothermique par le biais d'une compilation ou du traitement de données existantes dans un périmètre défini. Le Canton procède à un appel d'offres lorsqu'il entend confier la recherche d'une ressource à un tiers.

Ce permis apporte une exclusivité territoriale pour une ressource donnée au bénéficiaire. Ce permis est valable 2 ans. Si la preuve est apportée qu'un prolongement de la durée du permis est nécessaire pour la réalisation du programme détaillé des

travaux et des investigations y relatives, une prolongation peut être accordée. Mais la durée totale du permis ne dépassera pas cinq ans.

- b. l'octroi d'un **permis de recherche en sous-sol (PRSS)** ; une fois les premières investigations réalisées et le lieu d'implantation de l'exploitation géothermique davantage défini, le permis de recherche en sous-sol permet de poursuivre les investigations en profondeur à l'aide, par exemple, d'un forage exploratoire. Il octroie le droit exclusif de procéder à des travaux et à des forages, dans le périmètre déterminé, en vue de déceler la présence de la ressource. Il permet de définir plus précisément les paramètres et caractéristiques du sous-sol dans le but de dimensionner de manière optimale le dispositif d'exploitation de la ressource tel que la centrale géothermique. Ce permis est également valable deux ans avec les mêmes conditions de prolongation que le permis de recherche en surface.
- c. l'octroi d'une **concession** ; elle permet la construction de la centrale puis l'exploitation de la ressource. Elle accorde le droit exclusif d'exploiter la ressource qui y est mentionnée, dans un périmètre déterminé. Une concession est valable trente ans. Si la preuve est apportée qu'un prolongement de la durée de concession est inévitable afin d'assurer l'amortissement de l'investissement pendant la durée ordinaire, alors une prolongation peut être accordée. Mais la durée totale de la concession ne dépassera pas cinquante ans.

**Autorité
compétente**

Le département en charge du domaine de la recherche et de l'exploitation des ressources naturelles du sous-sol est l'autorité compétente dans le cadre des procédures, cela y compris pour les autorisations de construire. Il s'agit à l'heure actuelle du Département de la sécurité et de l'environnement (DES).

**Contributions
financières**

La loi fédérale sur l'énergie (LEne) prévoit des contributions à la recherche de ressources géothermiques. Celles-ci peuvent être fournies pour couvrir les coûts relatifs à la recherche de ressources géothermiques destinées à la production électrique. Toutefois, le montant de ces contributions ne peut dépasser 60 % des coûts d'investissement imputables (LEne, art. 33).

Des garanties peuvent aussi être allouées afin de couvrir les investissements consentis dans le cadre de la recherche de ressources géothermiques et de la réalisation d'installations géothermiques destinées à la production électrique. Cependant, le montant de ces garanties ne peut excéder 60 % des coûts d'investissement imputables (LEne, art. 33).

Les contributions et les garanties ne peuvent être accumulées pour un même projet de recherche de ressources géothermiques (LEne, art. 33).

Par ailleurs, la production d'électricité issue de la géothermie est encouragée par le Système de Rétribution de l'Injection (SRI). Ses modalités sont décrites dans l'ordonnance sur l'encouragement de la production d'électricité issue d'énergies renouvelables (OEnR) et sa gestion est assurée par Pronovo.

Finalement, en vertu de l'art. 34, al. 2, de la loi sur le CO₂, la Confédération soutient les projets d'utilisation directe de la géothermie dans le cadre de la production de chaleur. Les articles 112 à 113b de l'ordonnance sur le CO₂ précisent les caractéristiques de ce soutien. Le montant des contributions ne peut dépasser 60 % des coûts d'investissement liés à la prospection, l'exploration et la mise en valeur du puits géothermique.

En complément aux contributions fédérales, des aides financières cantonales peuvent être octroyées pour la création de réseaux thermiques alimentés majoritairement par de énergies renouvelables ou des rejets de chaleur, l'extension d'un tel réseau existant et le raccordement des bâtiments à ces réseaux thermiques. La mesure M18 du Programme Bâtiments offre une subvention aux propriétaires de ces réseaux thermiques alors que la mesure M07 s'adresse aux propriétaires des bâtiments qui se raccordent à ces réseaux thermiques. Les deux subventions peuvent être octroyées simultanément pour un même projet.

En outre, le Canton de Vaud octroie des subventions pour les études de faisabilité préalables à la création d'un réseau thermique multi-énergies. Cette subvention, qui peut couvrir jusqu'à 60% des coûts de l'étude, est plafonnée à CHF 30'000.-

Pour plus d'informations sur les subventions cantonales :

<https://www.vd.ch/themes/environnement/energie/subventions-programme-batiments/>

2 ÉTAT DE LA TECHNIQUE ET DES CONNAISSANCES DU SOUS-SOL

2.1 Les différents aquifères profonds potentiellement exploitables

Actuellement, les connaissances du sous-sol vaudois amènent à privilégier six cibles géothermiques distinctes pour le développement de projets de géothermie profonde. Ces cibles sont des réservoirs essentiellement calcaires datant de trois périodes géologiques différentes qui sont respectivement, du plus récent au plus ancien : le Crétacé inférieur, le Malm (Jurassique supérieur) et le Dogger (Jurassique moyen). Les roches de ces trois périodes se retrouvent dans deux unités tectoniques différentes, le bassin molassique autochtone et les nappes helvétiques, et forment au total six cibles. Il convient de signaler qu'un autre horizon plus profond du bassin molassique (Muschelkalk) pourrait également constituer une cible mais peu de données sont actuellement disponibles.

Les aquifères du bassin molassique plongent progressivement depuis le Jura en direction des Alpes. Sous la Riviera vaudoise, la couverture mésozoïque présente un bombement anticlinal (convexe) qui diminue la profondeur des aquifères, et de ce fait leurs températures. Dans les parties alpines plus internes, les aquifères autochtones s'inclinent sous les nappes helvétiques qui les chevauchent avec une géométrie faite d'écaillés plissées.

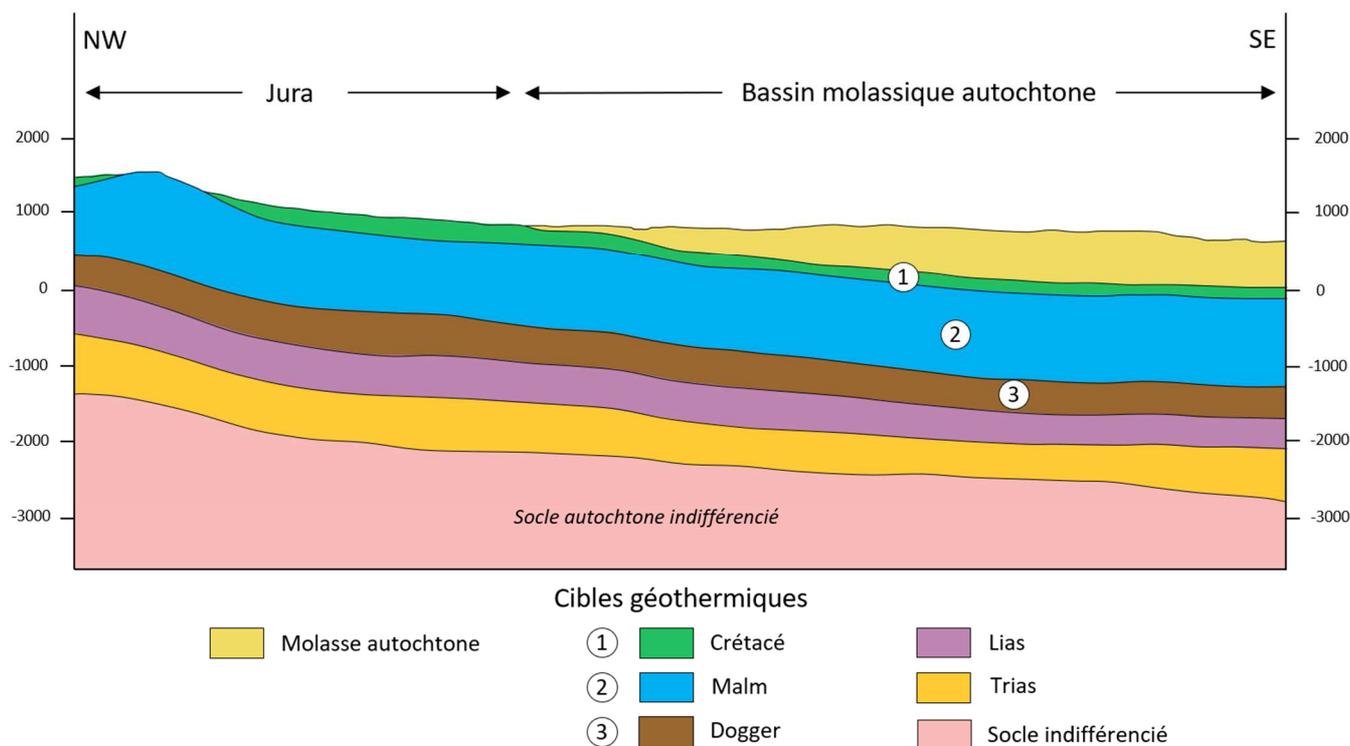


Figure 2 : Coupe géologique schématique du Jura et du bassin molassique autochtone. Les numéros font références aux trois cibles géothermiques présentes dans cette zone. Adaptée de Swisstopo (2017): GeoMol: Modèle géologique 3D du bassin molassique suisse – rapport final.

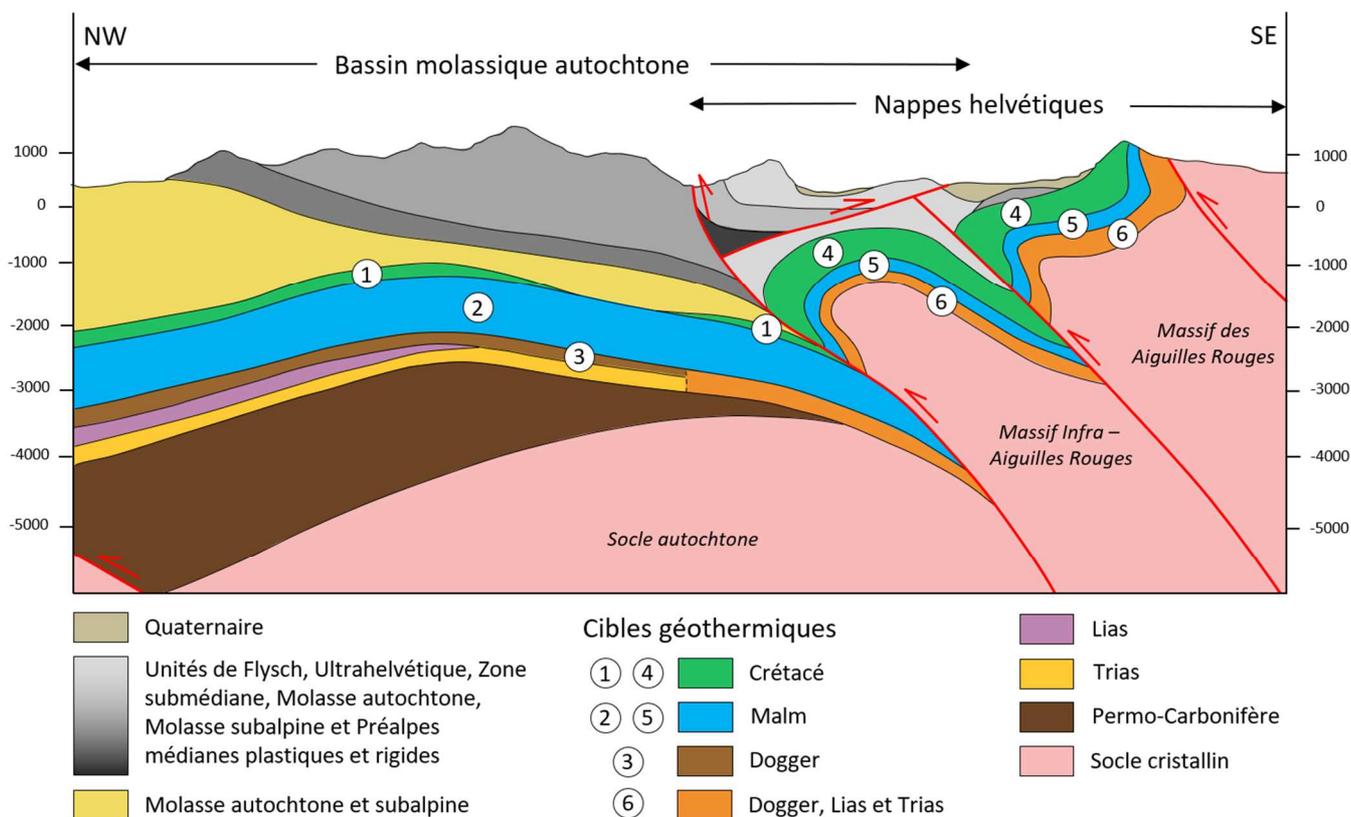


Figure 3 : Coupe géologique schématique des régions de la Riviera et du Chablais vaudois, montrant les deux unités tectoniques considérées dans le cadastre de géothermie profonde (bassin molassique autochtone et nappes helvétiques), ainsi que les six cibles géothermiques privilégiées dans le cadastre de géothermie profonde. Figure extraite et adaptée de Groupement RCV (2021) : Evaluation du potentiel géothermique profond exploitable dans les régions de la Riviera et du Chablais Vaudois.

Crétacé (Crétacé inférieur)

Dans le bassin molassique et les nappes helvétiques, les aquifères du Crétacé sont les plus proches de la surface. L'horizon aquifère présente une karstification bien développée ainsi qu'une perméabilité globalement élevée. Entre Villeneuve et Aigle, le Crétacé autochtone semble être complètement érodé. Les températures déterminées pour cet aquifère sont moins importantes que pour les deux aquifères suivants.

Malm (Jurassique supérieur)

Sur le plateau molassique, l'aquifère du Malm a une épaisseur très importante et est localement fracturé. Il s'agit de l'aquifère comportant globalement le plus d'avantages en regard des débits qu'il peut fournir, des températures élevées qui y règnent et du fait que sa profondeur est inférieure à celle du Crétacé. Dans les nappes helvétiques, le Malm présente une épaisseur beaucoup plus réduite ainsi qu'une profondeur variable par la géométrie des plis helvétiques.

Dogger (Jurassique moyen)

Les aquifères du Dogger ont une épaisseur et une perméabilité plus faible que les aquifères du Malm. Pour chaque unité tectonique, le Dogger est le plus profond des aquifères présentés, bien qu'il soit nettement plus profond dans le bassin molassique que dans les nappes helvétiques. Cependant, les faibles épaisseurs et perméabilités de cette formation induisent des débits exploitables potentiellement moins importants que ceux des aquifères sus-jacents.

Autres cibles potentielles Dans la vallée du Rhône, des aquifères quaternaires profonds détiennent aussi un potentiel géothermique intéressant. Des cônes alluviaux graveleux ainsi qu'un probable sillon fluvio-glaciaire (reliquat du glacier du Rhône) pourraient se trouver à des profondeurs assez élevées pour détenir des eaux exploitables par un système hydrothermal. La présence, géométrie, profondeur et lithologie de ces corps sédimentaires sont en revanche encore trop incertains pour les qualifier de cibles géothermiques.

Fiches de ressources Des tables de propriétés de ressources, résumant les caractéristiques de chaque aquifère cible, sont mises à disposition à la division GEODE de la Direction Générale de l'Environnement (DGE).

2.2 Valorisation énergétique des aquifères profonds et fonctionnement d'un doublet géothermique

Système hydrothermal La valorisation énergétique des aquifères profonds est réalisée selon le système d'exploitation hydrothermal. Ce système utilise l'eau circulant naturellement dans les réservoirs aquifères du sous-sol (OFEN, 2017).

Doublet géothermique L'eau est extraite au moyen d'un forage puis, après valorisation de l'énergie contenue, elle est réinjectée par l'intermédiaire d'un deuxième forage installé à distance du premier (système ouvert). Ce système de doublet géothermique est utilisé dans le cadre de la géothermie de moyenne profondeur pour un réseau de chauffage à distance entre autres. Il est également considéré pour de la géothermie de grande profondeur avec pour objectif principal d'extraire de la chaleur pour le chauffage et, sous certaines conditions, de l'électricité (OFEN, 2017).

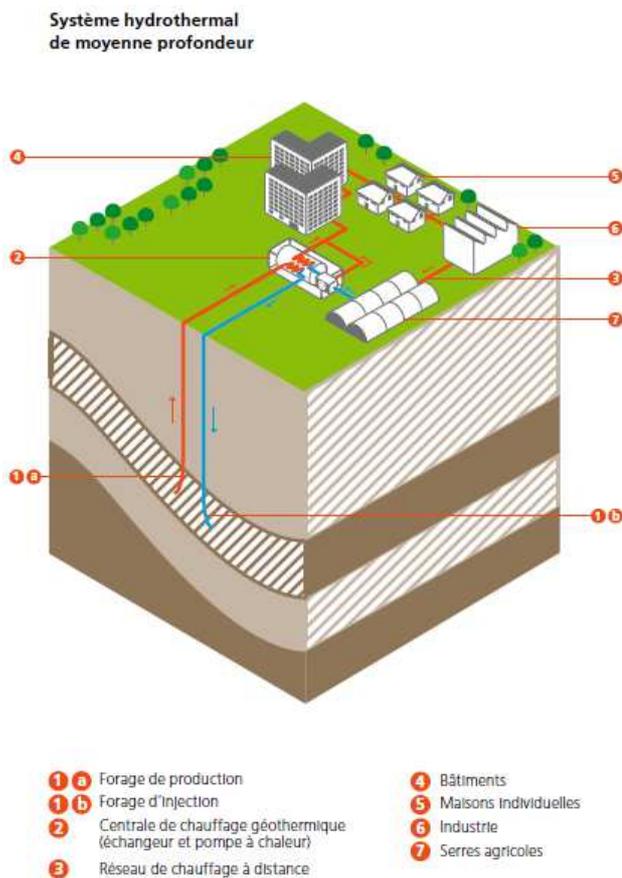


Figure 4 : Schéma d'un doublet géothermique - système hydrothermal de moyenne profondeur (source : GEOTHERMIE-SUISSE.ch)



Figure 5 : Illustration des installations de surface restantes pour un doublet géothermique - système hydrothermal (source : www.energeo.ch).

3 MÉTHODE ET HYPOTHÈSES POUR LA DÉTERMINATION DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE

Méthode d'évaluation du potentiel

La méthode appliquée pour déterminer le potentiel géothermique exploitable a consisté dans un premier temps à identifier les zones possédant suffisamment de **besoins thermiques** pour justifier le déploiement d'un réseau de chauffage à distance. Une fois ces **zones propices** identifiées, un calcul a été effectué au droit des zones propices pour connaître la puissance géothermique exploitable par un doublet géothermique pour les aquifères du Crétacé, du Malm et du Dogger du bassin molassique et des nappes helvétiques. Ensuite, il a fallu estimer l'emprise d'un doublet géothermique pour chaque aquifère, afin de calculer le nombre de doublet qu'il était possible d'implanter selon la surface de chaque zone propice. Pour finir, un ratio a été calculé entre le potentiel de production géothermique des différents aquifères et les besoins thermiques en surface, permettant d'estimer le **taux de couverture des besoins en chaleur par la ressource**.

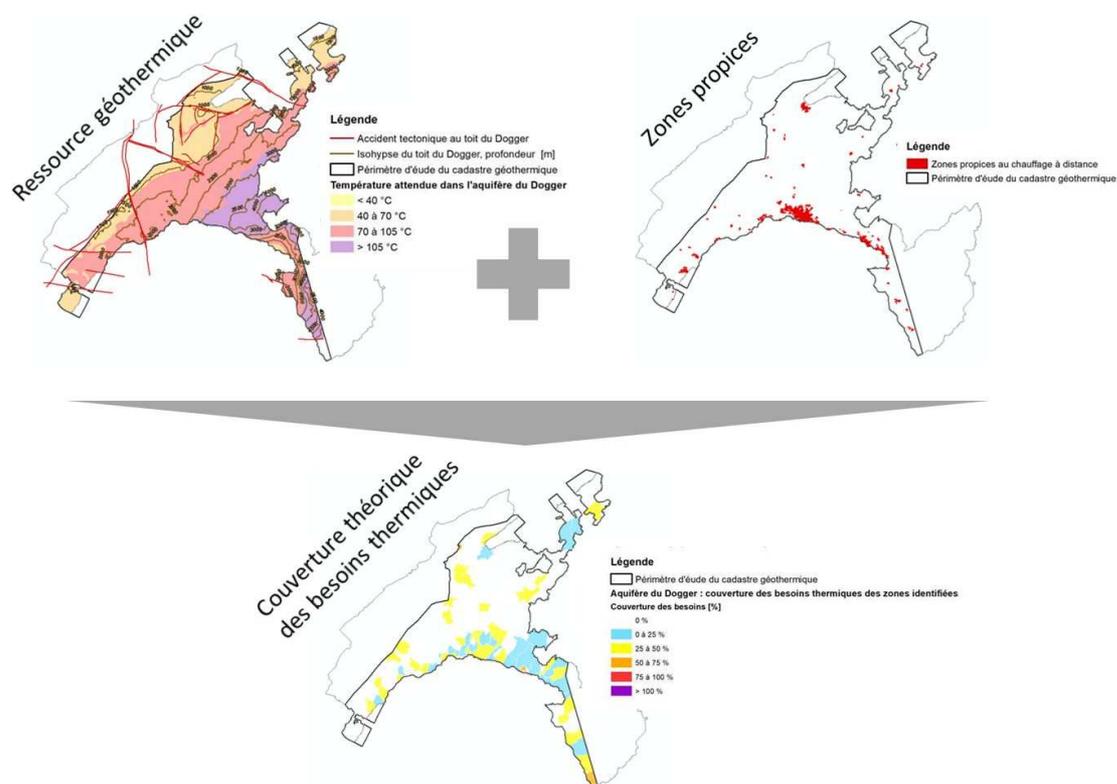


Figure 6 : L'estimation du taux de couverture théorique des besoins thermiques par commune est déterminée à partir de la compilation des données géothermiques avec les besoins thermiques ainsi que de la faisabilité technique et économique d'un réseau de distribution (zones propices au chauffage à distance).

Pour un meilleur aperçu de cette figure, voir www.vd.ch/themes/environnement/geologie/ressources-naturelles-du-sous-sol/geothermie

Besoins thermiques

La détermination des **besoins thermiques** est effectuée sur la base du cadastre thermique des besoins de chaleur du territoire cantonal vaudois. Ce cadastre est issu de référentiels cantonaux

(registre cantonal des bâtiments, base de données relative aux certificats énergétiques des bâtiments et registre des ramoneurs).

Les besoins thermiques des grands consommateurs ont été calculés uniquement pour le périmètre Riviera-Chablais vaudois et sont manquant pour le plateau molassique. De ce fait, la détermination des zones propices au chauffage à distance, ainsi que celle de la couverture de leurs besoins sont sous-estimées dans la région du plateau.

Zones propices au chauffage à distance

Situées à proximité de régions habitées, les **zones propices au chauffage à distance** correspondent à des surfaces pour lesquelles une valorisation thermique des aquifères profonds est techniquement et économiquement réalisable.

Ainsi, les secteurs dont les **besoins de chaleur** sont supérieurs à 500 MWh/ha/an ont été pris en considération pour la détermination des zones propices (hors grands consommateurs). Les secteurs dont les besoins sont compris entre 300 et 500 MWh/ha/an et qui sont à proximité directe de secteurs avec des besoins supérieurs à 500 MWh/ha/an ont également été retenus.

Seuil de puissance minimale

Le **seuil de puissance minimale pour un doublet géothermique** a été fixé à 1 MW. Il a été établi de telle façon que la puissance de l'installation soit suffisante pour atteindre la viabilité économique de celle-ci. Par ailleurs, pour assurer une bonne valorisation de la chaleur géothermique, la puissance de pointe des besoins thermiques doit être d'au moins deux fois la puissance minimale d'un doublet.

Emprise d'un doublet

L'**emprise d'un doublet** correspond à la surface nécessaire à la prévention de tout court-circuit thermique ou toute interférence hydraulique avec d'autres installations exploitant la même cible géothermique. Cette emprise permet ainsi de déterminer le nombre de doublets qu'il est possible de concevoir par zone propice.

Potentiel de production, taux de couverture et plafonnement

Le **potentiel de production** géothermique correspond à l'énergie qui peut être extraite annuellement de la cible géothermique exploitée. Étant donné que cette énergie doit être distribuée par un réseau de chauffage à distance pour être valorisée, elle ne permet pas de satisfaire des besoins thermiques en dehors des zones propices. C'est pourquoi le potentiel de production géothermique est plafonné lorsque sa valeur dépasse celle des besoins thermiques pour la zone propice considérée. Cela signifie que si l'énergie géothermique disponible dans la zone propice est supérieur aux besoins identifiés dans la zone propice, alors c'est l'énergie géothermique correspondant à la couverture des besoins de l'entier de la zone propice qui est utilisée pour calculer le taux de couverture des besoins thermiques de toute la commune.

Dans le cas d'une **zone propice intercommunale**, le potentiel géothermique est réparti auprès des communes concernées au pro rata des besoins thermiques.

Hypothèses et paramètres

La **géométrie ou profondeurs des cibles géothermiques** ont été déterminées grâce aux deux modèles géologiques tridimensionnels réalisés à l'échelle du Canton. Le premier a été effectué dans le cadre du projet *GeoMol* couvrant le bassin molassique vaudois, tandis que le deuxième complète le premier dans la zone Riviera-Chablais vaudois et a été réalisé afin d'étendre

l'évaluation du potentiel géothermique profond aux limites sud-est du canton. Ces modèles ont été établis par compilation des données géologiques tirées des prospections sismiques et des forages profonds qui ont été réalisés lors des campagnes de prospection pétrolière notamment.

Quant aux **températures** au sein des aquifères, elles ont été déduites en croisant un modèle de température (Geowatt AG, 2015) avec les profondeurs des aquifères cibles (Crétacé, Malm et Dogger) issues du modèle géologique *GeoMoI* dans le périmètre de ce dernier, tandis que le modèle géologique Riviera-Chablais vaudois a bénéficié d'une estimation de gradient géothermique régional pouvant être utilisé pour les unités tectoniques internes du canton.

Les paramètres pris en considération pour la détermination de la **puissance géothermique exploitable** au sein des différents aquifères sont les suivants :

- réinjection de l'eau dans l'aquifère à une température de 10°C (rendu possible grâce à l'utilisation d'une pompe à chaleur) ;
- un débit exploitable théorique de 20 l/s pour les aquifères du Crétacé et du Malm ;
- un débit exploitable théorique de 15 l/s pour l'aquifère du Dogger.

Les débits exploitables sont déterminés indépendamment des propriétés physiques des aquifères (perméabilité, épaisseur) et sont considérés comme homogènes pour chacune des formations à l'échelle du canton. Les zones faillées peuvent se distinguer des zones saines avec un débit légèrement plus élevé, mais cela n'a pas été pris en considération dans les calculs effectués.

Calcul de la puissance géothermique pour un doublet

Le potentiel géothermique pour chaque aquifère a été **calculé** selon la formule suivante :

$$Q_{Géo} = \rho \cdot C \cdot D \cdot \Delta T$$

Avec : ρ la masse volumique de l'eau (environ 1 kg/l) ;

C la chaleur spécifique de l'eau (environ $4.180 \cdot 10^{-3}$ MJ / kg K) ;

$Q_{Géo}$ la puissance extraite de l'aquifère en MW_{th} ;

D est le débit exploité en l/s ;

ΔT la différence entre la température de l'aquifère et la température de rejet (10°C).

Exceptions : Zones propices de Bex et de Lavey-les-Bains

Deux zones ont été appréhendées différemment : la zone propice de Bex contient un contexte structural complexe, qui ne permet pas d'afficher les profondeurs et températures de ses aquifères de manière pertinente ; une fiche signalétique créée à partir d'un forage fictif permet de présenter toutes les ressources existantes au droit de cette zone.

La zone de Lavey-les-Bains a également été traitée de manière séparée, car les aquifères mésozoïques mentionnés ci-dessus n'y sont pas présents. Son aquifère cristallin a été considéré, avec les débits et températures connus des puits existants dans la commune.

4 DONNÉES DU CADASTRE DE GÉOTHERMIE PROFONDE

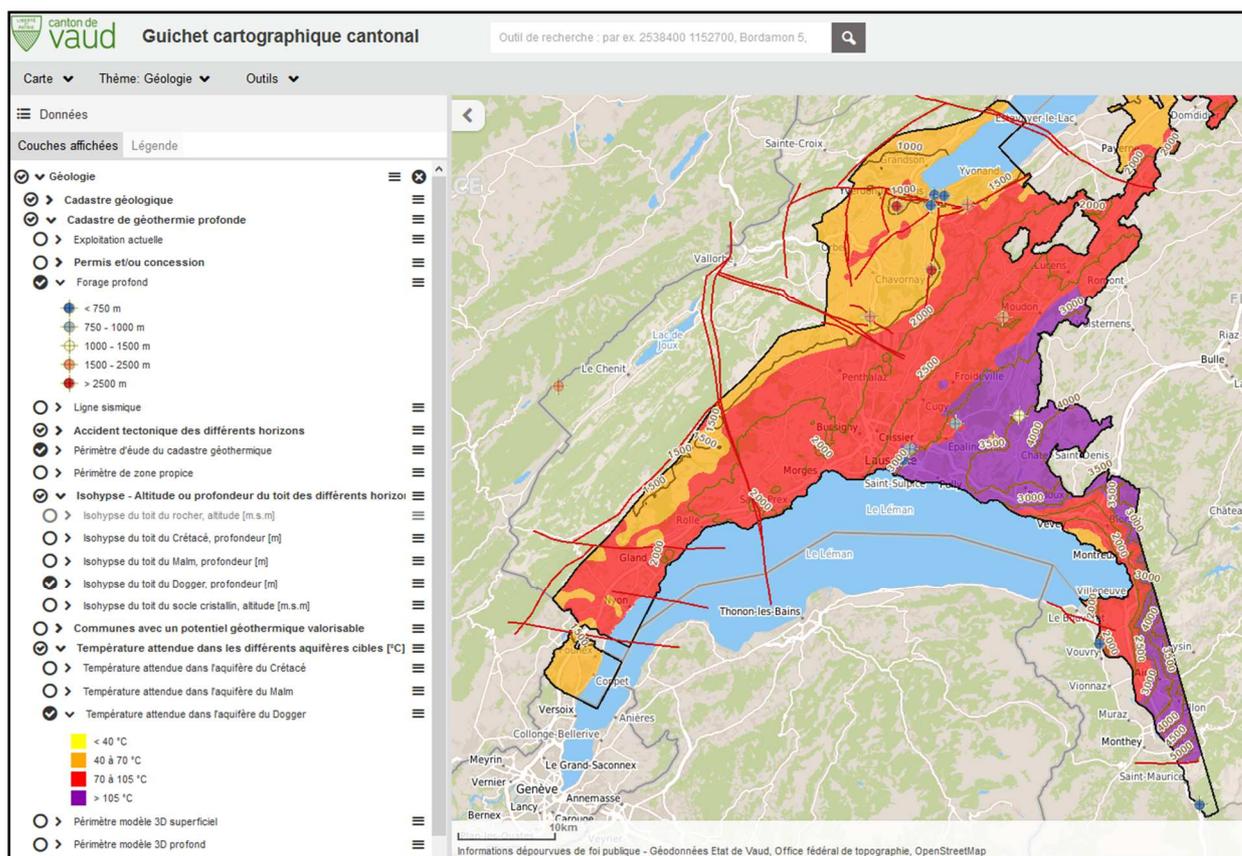


Figure 7 : Aperçu du guichet cartographique cantonal (www.geo.vd.ch) et des données du cadastre de géothermie profonde (Thème GEOLOGIE).

4.1 Périmètre du cadastre géothermique

Bassin molassique, Riviera et Chablais Vaudois

Actuellement et comme exposé au chapitre précédent, le cadastre de géothermie profonde repose sur les données issues des modèles géologiques tridimensionnels du bassin molassique vaudois (*GeoMol* vaud) et de la Riviera et Chablais vaudois (RCV). La structure ainsi que les principaux niveaux des horizons géologiques du bassin molassique jusqu'à une profondeur d'environ 5'000 m sous le niveau du terrain naturel (dans le périmètre vaudois) y sont représentés.

4.2 Exploitations existantes

Centres thermaux d'Yverdon-les-Bains et de Lavey Les exploitations actuellement en fonction dans le canton de Vaud sont celles qui alimentent les thermes d'Yverdon-les-Bains et de Lavey-les-Bains. Les eaux souterraines sont soutirées par des puits (forages) avec ou sans pompage.

4.3 Permis et concessions

PRSU, PRSS et concessions Comme vu au chapitre 1 concernant les procédures d'autorisation, la LRNSS prévoit, pour une ressource spécifique sur un territoire donné, l'octroi par étape d'un permis de recherche en surface (PRSU), d'un permis de recherche en sous-sol (PRSS) et d'une concession.

4.4 Forages profonds

Recueil de forages profonds À l'heure actuelle, le canton compte 17 forages profonds compris entre 500 et 3'200 m de profondeur environ. Ils ont été réalisés entre 1936 et 2015. Pour chacun de ces forages, un relevé (log synthétique) a été réalisé avec l'ensemble des mesures effectuées dans le forage. De plus, une fiche technique permet d'avoir une vue d'ensemble de toutes les informations et analyses effectuées dans le forage ou à partir d'échantillons prélevés (carottes ou cuttings).

4.5 Lignes sismiques

Recueil de lignes sismiques Actuellement, plusieurs centaines de lignes sismiques ont été effectuées sur le territoire vaudois. Elles ont été réalisées dans le cadre de prospection d'hydrocarbures ainsi que pour des études académiques. Leur longueur varie de quelques kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres. Parmi celles-ci, une centaine a été sélectionnées. Elles ont été réinterprétées afin de permettre la construction du modèle géologique 3D *GeoMol*. Pour chacune de ces lignes il est possible d'obtenir une planche synthétique (figure 8) qui présente la donnée brute et la donnée interprétée.

Qu'est-ce que la sismique par réflexion ? La méthode consiste à envoyer des ondes dans le sous-sol via la génération de vibrations depuis la surface. Il existe différentes sources de vibrations (camion vibreurs, explosifs, chutes de poids).

Une partie des ondes propagées est réfléchiée au niveau des interfaces situées entre les différents horizons géologiques et est captée à la surface par des appareils de mesures appelés géophones.

Une fois que les données collectées sont soigneusement traitées, le résultat permet de représenter les profils géologiques et de mettre en évidence les différentes interfaces ainsi que la structure du sous-sol. Elle permet d'en avoir une représentation générale jusqu'à plusieurs kilomètres de profondeur.

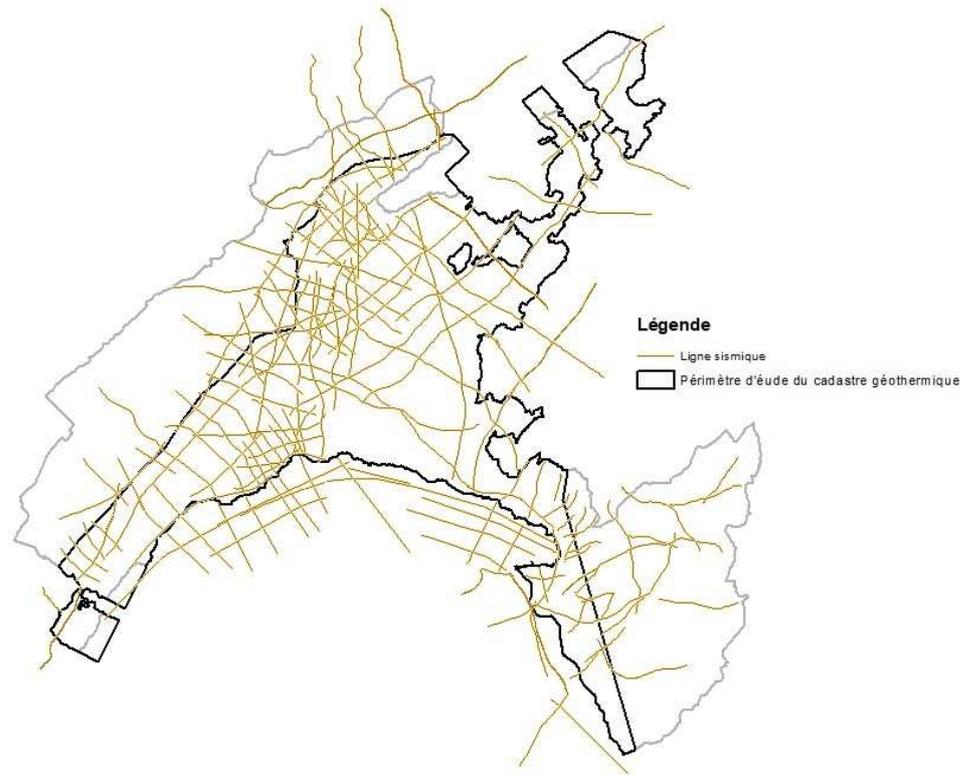
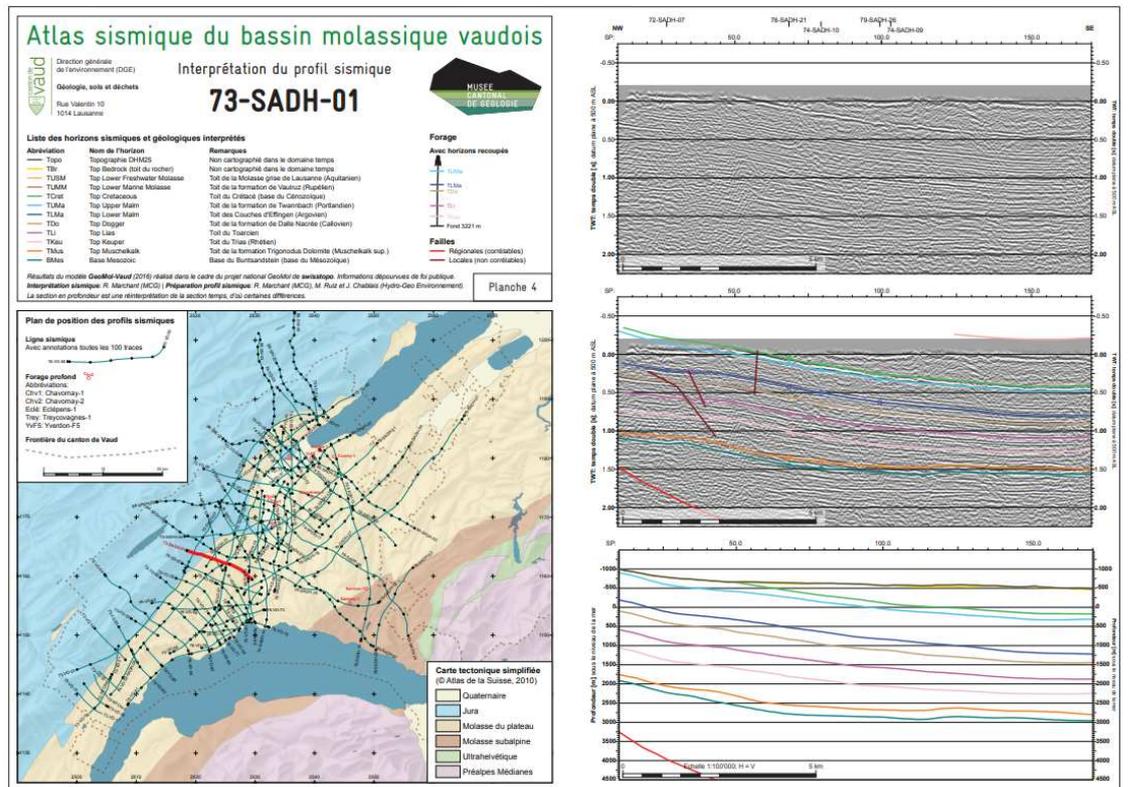


Figure 8 : Lignes sismiques



4.6 Accidents tectoniques dans les différents horizons cibles

Provenance Les accidents tectoniques sont issus du modèle géologique *GeoMol*. Ils ont été localisés sur la base de données existantes (atlas géologique et carte tectonique de la Suisse, atlas sismique du bassin molassique suisse, Modèle numérique de terrain, etc.) et de leur correspondance avec les résultats obtenus via l'interprétation des lignes sismiques.

Une simplification des accidents tectoniques a été réalisée afin de concorder au mieux avec l'échelle de l'étude du projet *GeoMol*.

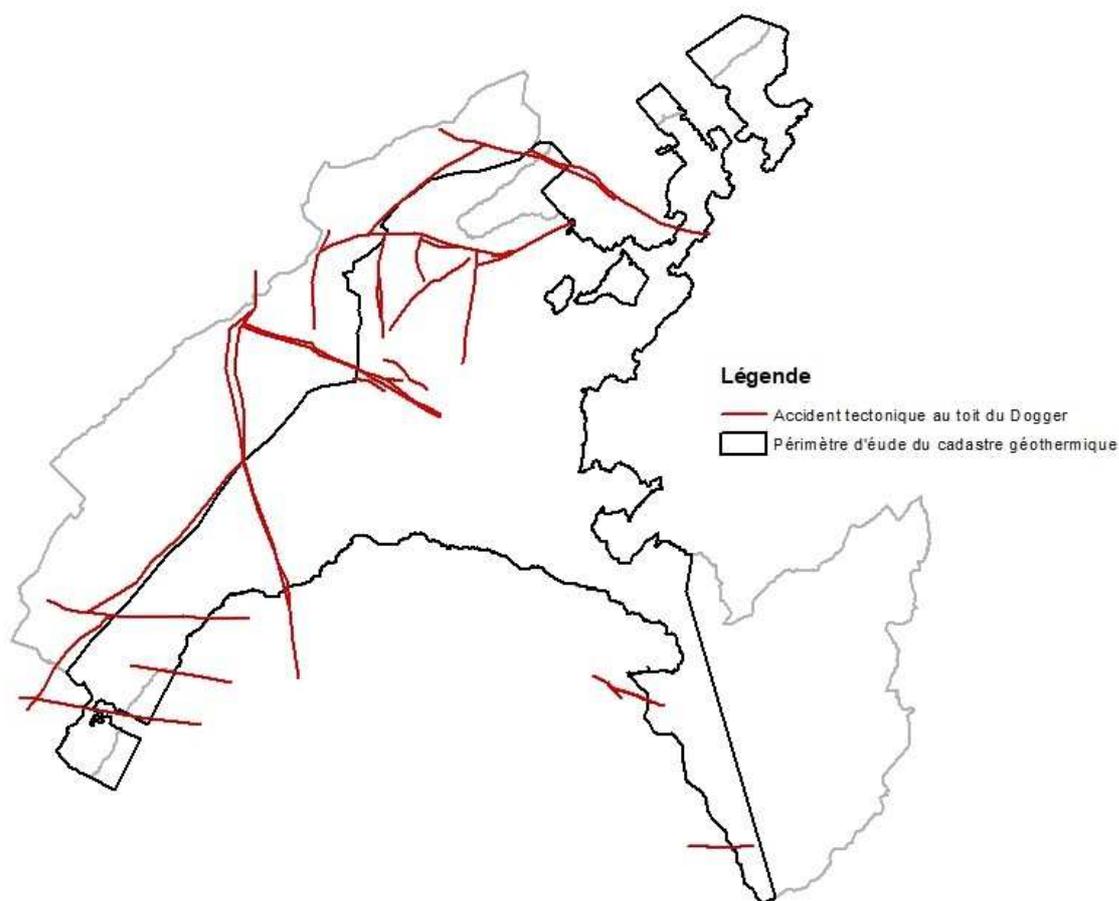


Figure 10 : Principaux accidents tectoniques (toit du Dogger)

Recueil des accidents tectoniques

Un peu moins d'une trentaine d'accidents tectoniques sont répertoriés actuellement dans le cadastre de géothermie profonde. Ils sont principalement situés sur une bande orientée sud-ouest à nord-est le long du Jura vaudois. Il a été décidé de représenter ces accidents tectoniques dans le cadastre de géothermie profonde seulement s'ils sont identifiables sur au moins deux lignes sismiques distinctes. Ils sont représentés au toit (sommets) des aquifères cibles. Une multitude d'autres accidents tectoniques existent néanmoins.

Les accidents tectoniques peuvent représenter des zones favorables à la géothermie et à la circulation d'eaux chaudes. Leur présence peut significativement accroître le potentiel

géothermique d'un aquifère, en constituant des chenaux d'écoulement préférentiels des eaux géothermales, augmentant le débit et potentiellement la température de ces eaux.

4.7 Toits des horizons cibles, toit du rocher et socle cristallin

Toits des horizons cibles

À l'instar des accidents tectoniques, les surfaces des toits des différents horizons sont issues du modèle géologique *GeoMol* et ont été localisées, sur la base de données existantes (forages, atlas géologique et carte tectonique de la Suisse, atlas sismique du bassin molassique suisse, Modèle numérique de terrain, etc.) et de leur correspondance avec les résultats obtenus via l'interprétation des lignes sismiques. Cette donnée représente une carte des profondeurs estimées du toit des cibles identifiées.

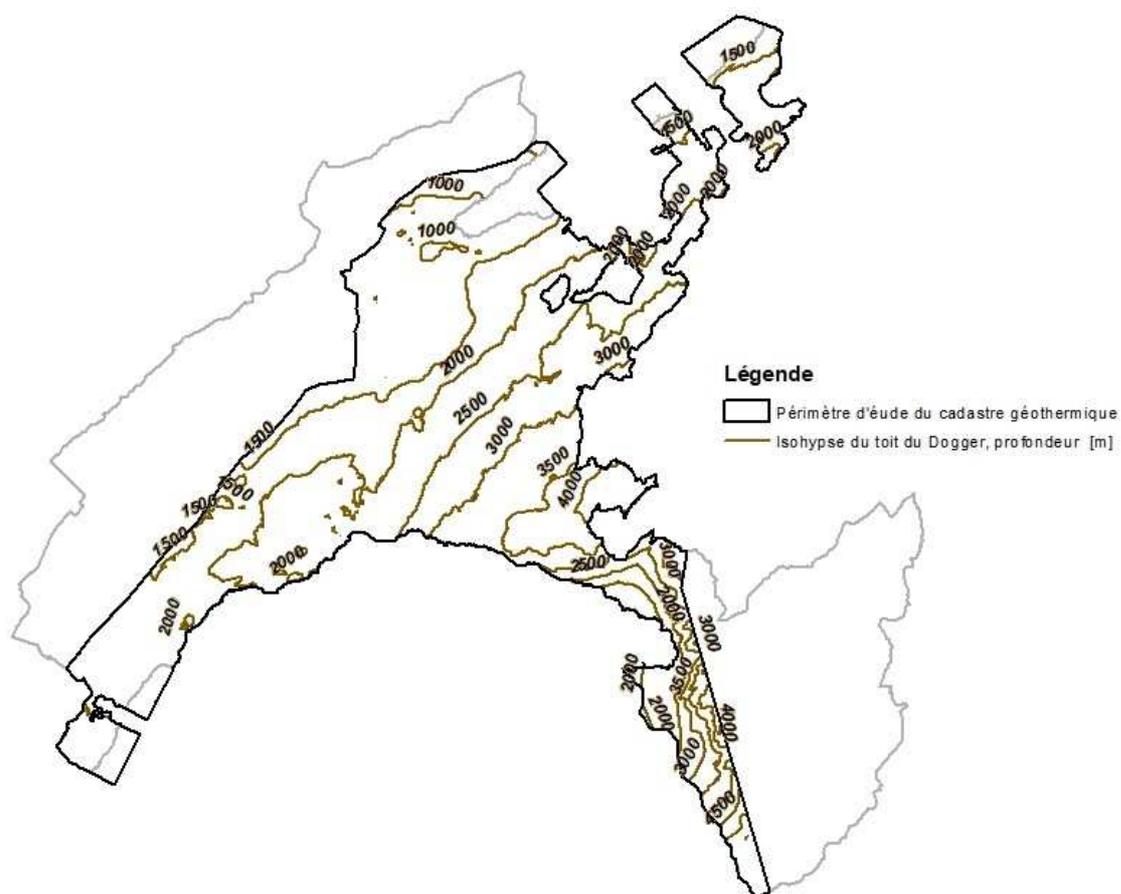


Figure 11 : Courbes de niveau du toit du Dogger

Toit du rocher

Le toit du rocher représente l'interface se trouvant entre les terrains rocheux et les terrains meubles de couverture quaternaire. Ce niveau a été déterminé sur la base, entre autres, de l'atlas géologique, de données géophysique (profils gravimétriques et profils sismiques) ainsi que de sondages géologiques.

Toit du socle cristallin Le socle du cristallin est constitué de roches métamorphiques et magmatiques sur lequel repose les différents horizons sédimentaires.

Représentation dans le cadastre Le toit du rocher, du socle cristallin ainsi que des cibles potentiellement exploitables sont représentés dans le cadastre de géothermie profonde sous forme de courbes de niveaux représentant les profondeurs en mètres depuis la surface.

4.8 Températures attendues dans les différents aquifères cibles

Températures Les températures au sein des aquifères ont été déduites à partir du modèle de température (établi sur la base de l'atlas sismique du bassin molassique suisse, 2012), du modèle géologique *GeoMol* ainsi que par estimation d'un gradient géothermique régional et uniforme pour le périmètre Riviera-Chablais vaudois.

Au vu des informations géologiques à disposition quant à l'emplacement des zones aquifères, les températures ont été estimées au niveau du toit de l'horizon géologique cible pour le Crétacé et 100 m en-dessous du niveau du toit de l'horizon pour le Malm et pour le Dogger.

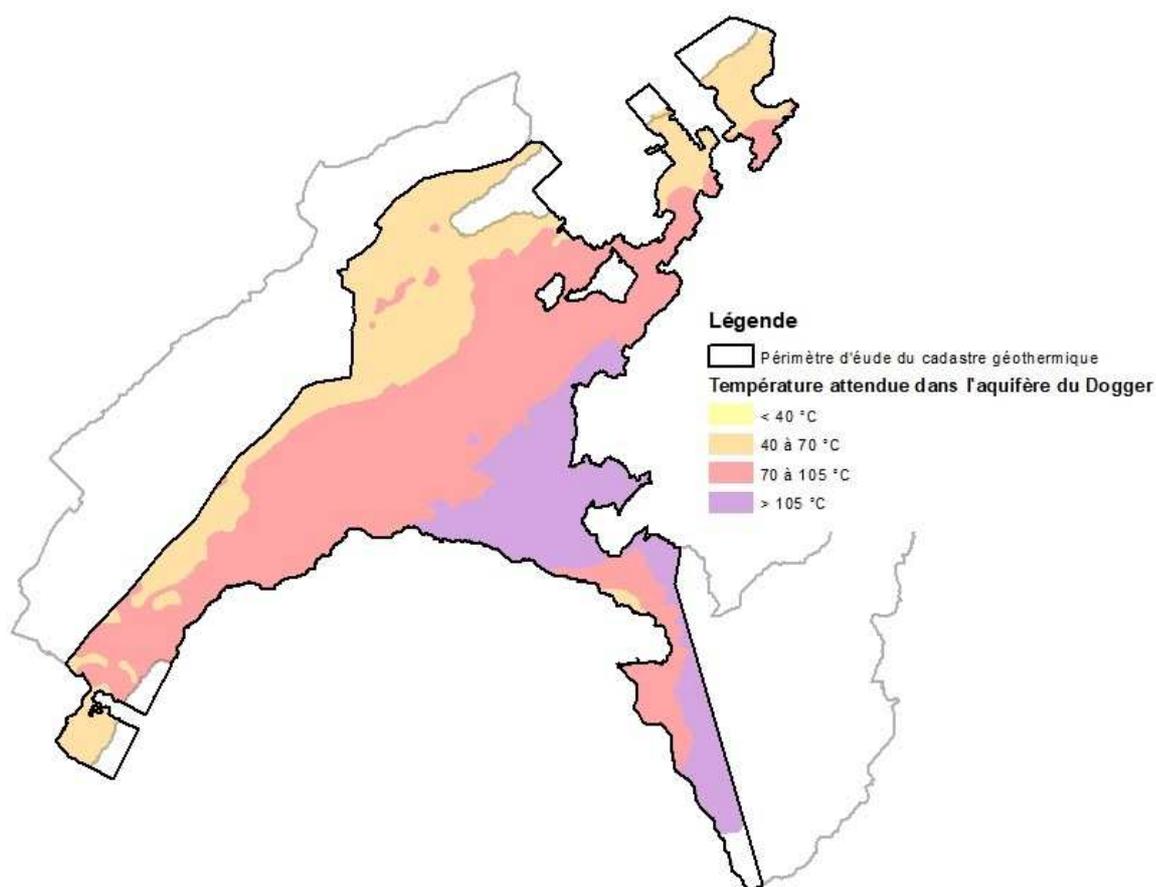


Figure 12 : Températures déduites pour l'aquifère du Dogger

4.9 Couverture des besoins thermiques

Taux de couverture

Le taux de couverture des besoins thermiques est défini en confrontant les besoins de chaleur identifiés au sein des communes avec le potentiel de production des différents aquifères tel que décrit dans le chapitre 3 ci-avant. Il sont calculés pour les cibles géothermiques du Crétacé, Malm et Dogger. Les besoins thermiques des grands consommateurs ont uniquement été intégrés pour la partie sud-est du canton (Riviera et Chablais vaudois).

Selon les conditions géologiques locales et la présence éventuelle de grands consommateurs de chaleur, il est possible qu'un projet de géothermie profonde se révèle avantageux, même dans les communes où aucun potentiel n'a été identifié. Par ailleurs, un faible taux de couverture des besoins thermiques n'indique pas que la commune est peu favorable à un projet de géothermie profonde mais que cette ressource devra être combinée à d'autres pour satisfaire les besoins thermiques en questions.

Fiches de ressources par commune

Des fiches de ressources par communes, détaillant le potentiel géothermique des aquifères s'y trouvant, peuvent être consultées à la division GEODE de la Direction Générale de l'Environnement.

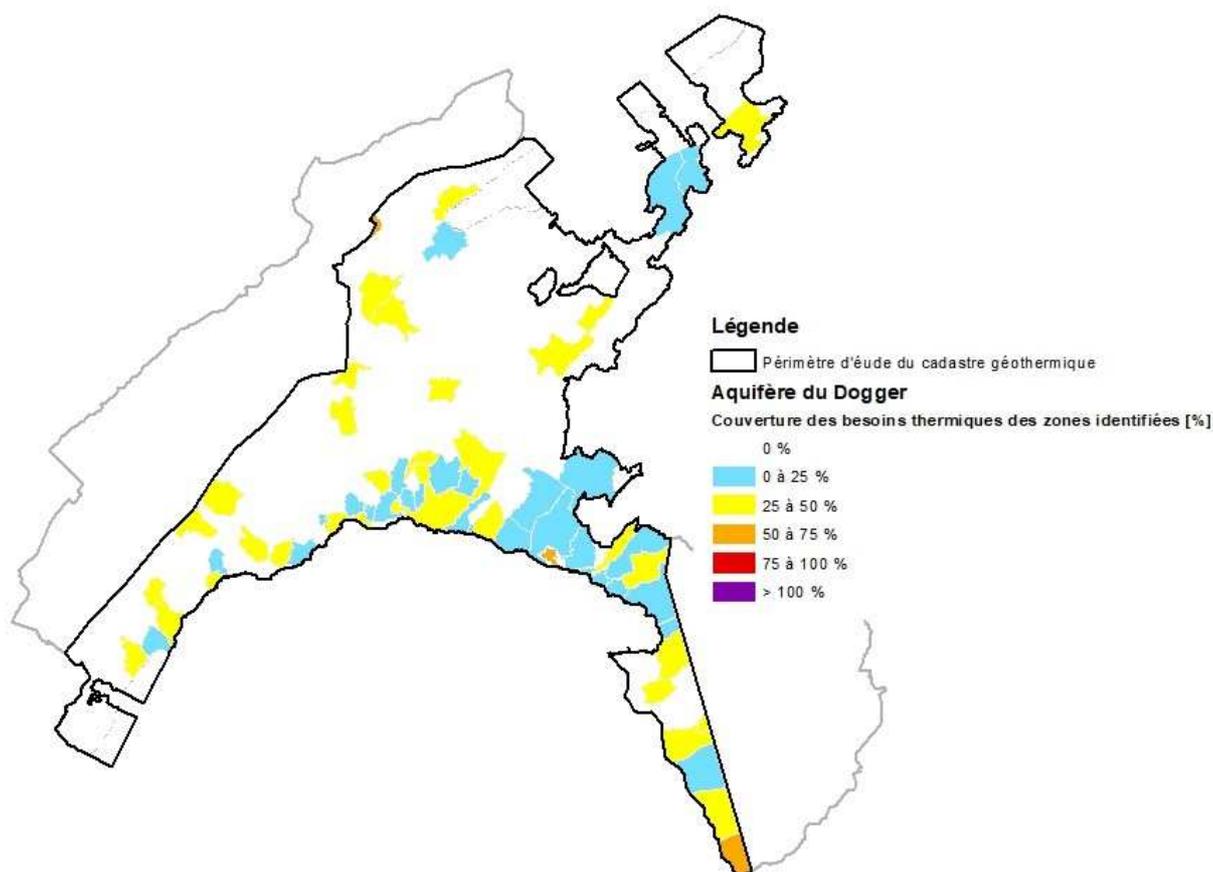


Figure 13 : Couverture théorique des besoins thermiques des zones identifiées pour l'aquifère du Dogger

5 INCERTITUDES ET FIABILITÉ DES DONNÉES DU CADASTRE DE GÉOTHERMIE PROFONDE

Incertitudes et fiabilité Le cadastre de géothermie profonde contient des informations issues de données géologiques dont certaines sont obtenues au moyen de forages profonds et d'autres à partir de méthodes indirectes ou de modélisation. Les profondeurs, températures et taux de couverture indiqués dépendent aussi des hypothèses de calcul exposées au chapitre 3. Une des incertitudes principales reste par ailleurs la perméabilité des aquifères profonds et les débits qui peuvent être exploités.

Ces données sont donc indicatives. Elles résultent d'un traitement aussi soigné que possible des données à disposition à l'échelle du canton de Vaud, toutefois des incertitudes demeurent.

Des études locales de faisabilité sont nécessaires pour préciser le potentiel et définir des suites à donner.

Il peut encore être utile de faire remarquer que le taux de couverture des communes pourrait être plus élevé si l'on considère que plusieurs cibles géothermiques pourraient être exploitées en même temps sur un même territoire. L'exploitation d'une cible géothermique n'exclut pas nécessairement l'utilisation d'autres cibles géothermiques sur un même territoire.

6 PERSPECTIVES ET CONCLUSIONS

Perspectives et conclusions L'amélioration des connaissances géologiques et hydrogéologiques profondes, notamment grâce aux projets de forages profonds en cours ou à venir ainsi qu'à de nouvelles campagnes sismiques, permettront progressivement de mettre à jour et réévaluer ce cadastre avec une meilleure fiabilité.

À l'heure actuelle, bien que des incertitudes demeurent, le cadastre de géothermie profonde indique que les aquifères profonds peuvent potentiellement représenter une source d'énergie importante pour le canton de Vaud.

Dans le contexte de transition énergétique actuel, la géothermie pourrait donc devenir un atout précieux dans la mise en place de la stratégie 2050 et le développement des énergies renouvelables.

7 SOURCES UTILES

Guichet cartographique cantonal avec publication du cadastre de géothermie profonde (Thème GEOLOGIE) : www.geo.vd.ch

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

Pronovo (organe d'exécution pour les programmes d'encouragement des énergies renouvelables) : <https://pronovo.ch/fr/financement/>.

Service Sismologique Suisse (SED) : <http://www.seismo.ethz.ch/fr/knowledge/things-to-know/geothermal-energy-earthquakes/geothermal-energy-in-a-nutshell>.

Société suisse pour la géothermie (GEOTHERMIE-SUISSE.CH) : <https://geothermie-schweiz.ch/geothermie/geothermie-uebersicht/?lang=fr>.

Publication de l'OFEN sur la géothermie (Géothermie en Suisse, une source d'énergie polyvalente, 2017, SuisseEnergie, n°805.016.F, 40 p) :

https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/energies-renouvelables/geothermie/_jcr_content/par/tabs/items/tab/tabpar/externalcontent.external.exturl.pdf/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZnIvcHVibGJiYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMjE4NC5wZGY=.pdf