Hydrogéologie
Eaux minérales
Dangers naturels
Environnement

Alpgeo GEOTHERMIE
Passionnés de géothermie profonde depuis 1987

ALPGEO Sàrl
Hydrogéologues Conseils

Av. des Alpes 6 CH - 3960 SIERRE
Tél. : +41 (0)27 456 94 56 info@alpgeo.ch
Fax : +41 (0)27 456 94 58 www.alpgeo.ch

Service de l'Urbanisme et des Bâtiments d'Yverdon-les-Bains

Plan de quartier de Verdan
Analyse d'opportunités énergétiques
Géothermie

Evaluation du potentiel de valorisation thermique de la nappe phréatique et des aquifères de faible-moyenne profondeur

---

Juillet 2017

Rapport établi par :	Thibaud Roux et Gabriele Bianchetti	
Collaboration :		
Contrôlé par :	Gabriele Bianchetti	
Draft du :	11 juillet 2017	
Version N° 1 du :		
Version N° 2 du :		
Version N° 3 du :		
Version finale du :	23 juillet 2017	
Nom fichier :	[Z:\MANDATS-ACTUELS\1-Puits de pompage\2017-Quartier Verdan Yverdon\Rapports ALPGEO\Rapport Verdan 201707 gb.docx]	
Remarques :		
Distribution :	Service de l'Urbanisme et des Bâtiments	3 x
	Bureau focus-E Sàrl à la Rippaz	1 x
	Bureau ALPGEO Sàrl, Sierre	3 x
	Archives ALPGEO Sàrl, Sierre	1 x

1. INTRODUCTION ET OBJECTIF DU MANDAT

La commune d'Yverdon-les-Bains entend planifier l'approvisionnent énergétique d'un nouveau quartier au lieu-dit Verdan. Plusieurs scénarios ont été pris en considération, incluant aussi la valorisation de la géothermie. Les valeurs suivantes de puissance thermique nous ont été communiquées par Mme Céline Weber du bureau focus-E Sàrl à La Rippe :

- Puissance requise pour le chauffage et l'ECS au condenseur (puissance géothermique) : **1'907 kW;**
- Puissance requise pour le froid : **811 kW**.

Notre bureau a été mandaté par le Service de l'Urbanisme et des Bâtiments en date du 2 juin 2017 pour compiler et proposer une synthèse des informations géologiques et hydrogéologiques, ainsi que des valeurs nécessaires dans les domaines suivants de la géothermie (présentation schématique à la Figure 1):

- Exploitation thermique de la nappe phréatique (pompage et rejet);
- Exploitation thermique des aquifères de faible-moyenne profondeur (calcaires fracturés aquifères du Crétacé, profondeurs de l'ordre de 500 à 700 m).

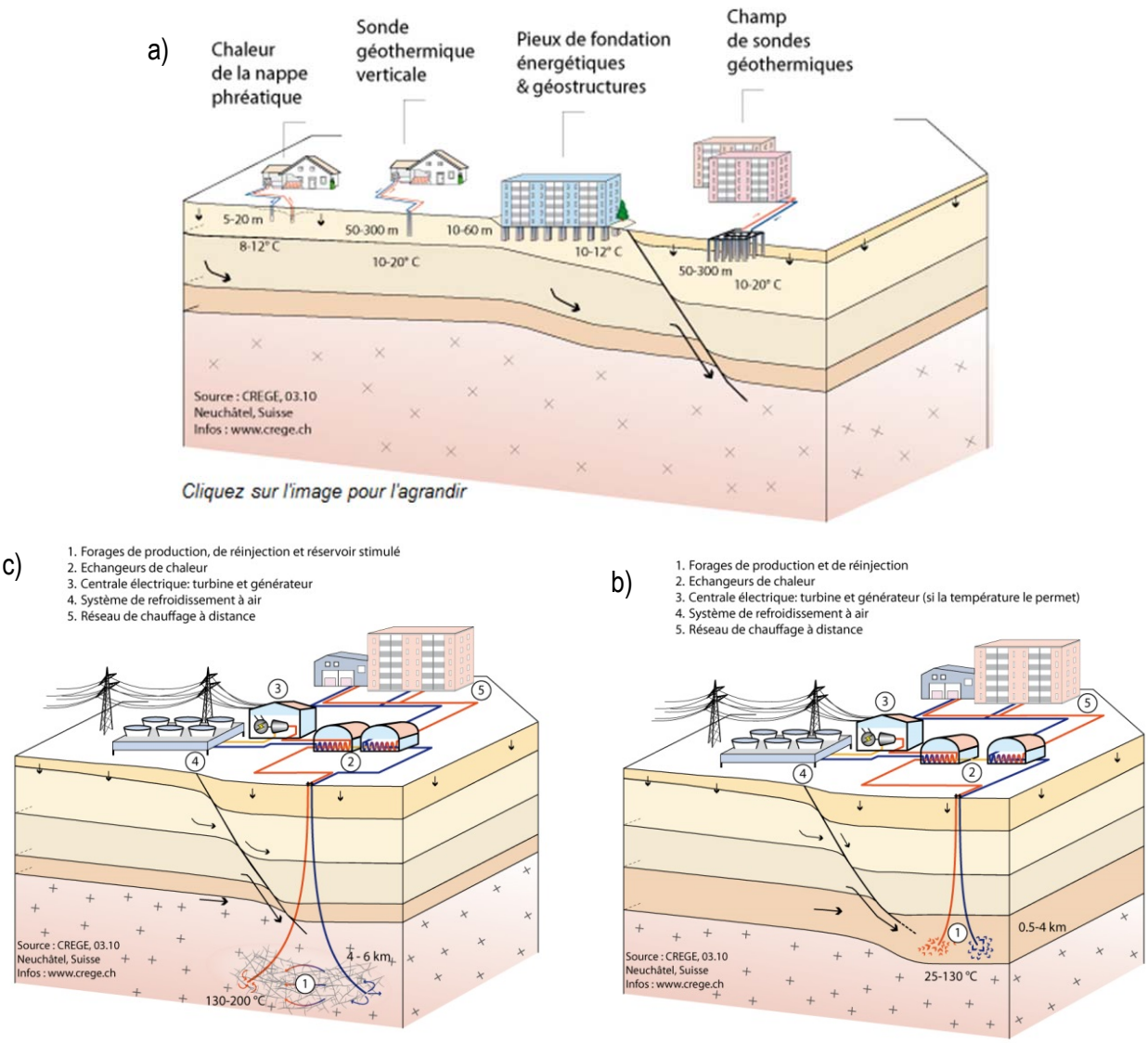


Figure 1 : *Types d'exploitation de la géothermie : a) géothermie de faible profondeur; b) géothermie de faible-moyenne profondeur c) géothermie de grande profondeur (CREGE 2010)*

2. NAPPE PHREATIQUE

2.1 DONNEES DISPONIBLES

Cette étude préliminaire est basée principalement sur les données de forages (Annexe 9), disponibles sur le cadastre géologique du canton de Vaud [4] ainsi que sur l'Atlas géologique de la Suisse au 1 : 25'000 [6]. Un seul forage a été réalisé à moins de cinquante mètres des parcelles du quartier de Verdan, mais les informations disponibles sont limitées par sa faible profondeur (4.5 m). De ce fait, les informations provenant des forages ont été répertoriées dans un rayon de 2 kilomètres.

Des profils géologiques (coupes AA' et BB') au niveau de l'Autoroute d'Yverdon-Neuchâtel ont été mis à disposition par le Bureau ARConseils à Buchillon (Annexes 5 et 6) [8 et 9]. Enfin, pour déterminer la nature et l'épaisseur des terrains quaternaires et des formations rocheuses sous-jacentes, des logs de forage et des coupes géologiques N-S et E-W virtuelles, situés au centre du plan de quartier de Verdan (Figure 1), ont été élaborés à la demande d'ALPGEO par le bureau Terreplus Sàrl à Bevaix, accompagnés d'une brève note technique (Annexe 13) [10]. Ces documents ont été élaborés à partir d'un modèle géologique structural 3D de la région d'Yverdon, réalisé en 2013 sous mandat de l'Etat de Vaud

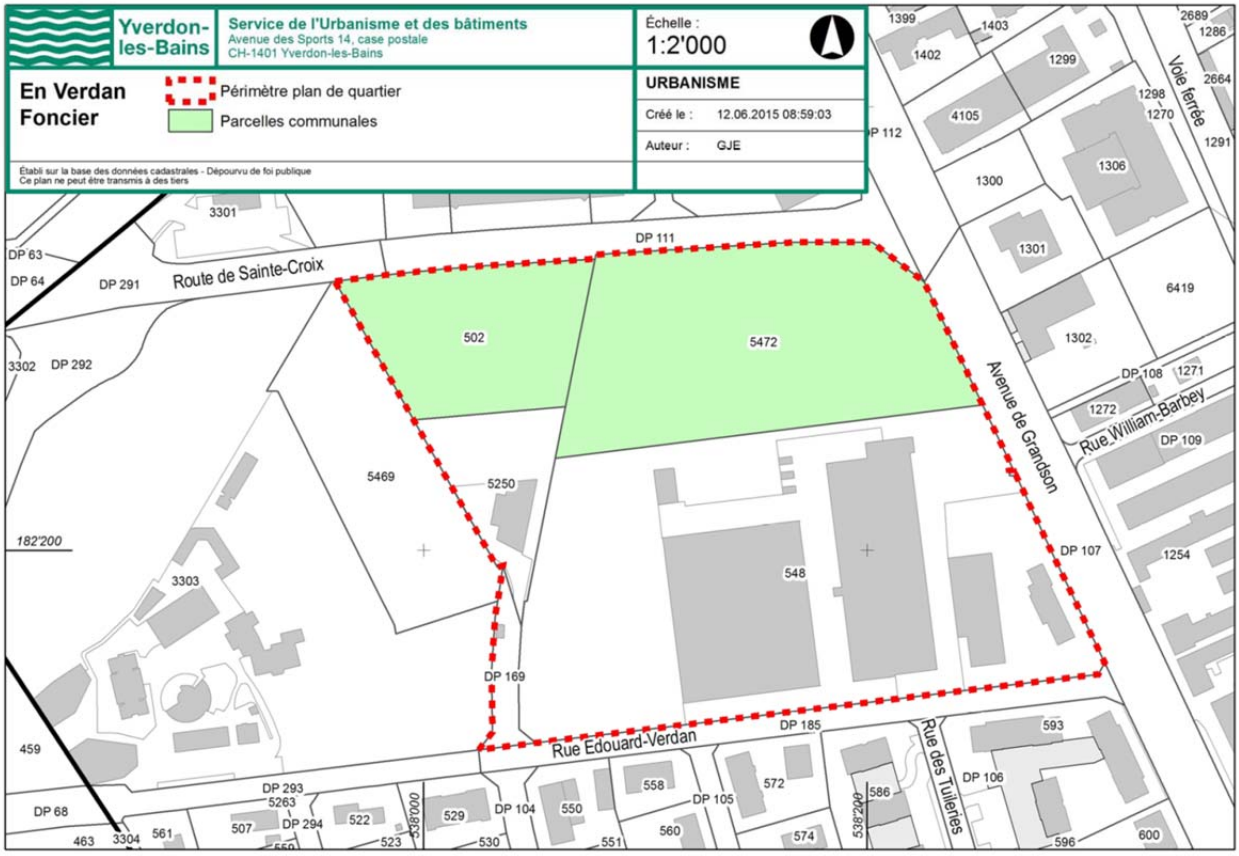


Figure 2 : *Périmètre du plan de Quartier de Verdan et parcelles communales en vert*

2.2 GEOLOGIE DES TERRAINS QUATERNAIRES

La région d'Yverdon –les-Bains est caractérisée par une grande hétérogénéité des terrains quaternaires (terrains meubles, Annexe 2), conséquence d'une conjonction sédimentaire (dépôts deltaïques, fluvio-glaciaires, glaciaires et lacustres). La plaine alluviale environnante est encaissée dans un synclinal (structure géologique en cuvette), dont le versant Nord est constitué en surface de sédiments fluvio-glaciaires (formation des Tuileries et formation de Granson) et morainiques. Au sud de la plaine, les roches du Crétacé (essentiellement calcaires et marnes) affleurent au niveau du Mont de Chamblon.

De manière générale, l'épaisseur des dépôts sédimentaires du Quaternaire augmente en direction du Lac de Neuchâtel. A l'Ouest, le toit de la Molasse se trouve à 12 m seulement (*forage STOLL P1*), tandis qu'elle se situe à plus de 120 m à l'Est (*forage 838 F1*). L'épaisseur a également tendance à diminuer en direction du Nord (*YV112*, toit de la Molasse à 5.2 m de profondeur).

2.3 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Afin de simplifier l'approche, trois zones géographiques ont été délimitées (Annexe 2), caractérisées par la présence de deux aquifères :

2.3.1 Quartier du Verdan

Les deux parcelles communales concernées par le projet sont représentés en surface par une alternance d'anciens cordons littoraux/terrasses lacustres (sables fins) et de terrains palustres (tourbières), correspondant aux dépôts sédimentaires du lac de Neuchâtel. Cette alternance se prolonge d'Ouest en Est jusqu'aux rives du lac. Ces faciès de sédiments fins s'étendent également en direction du Sud.

Ces cordons littoraux correspondent à quelques rares bancs de sables moyens de faible épaisseur, retrouvés localement en-dessus de 10 m de profondeur, **moyennement perméables**, composant ce qu'on a appelé **"nappe supérieure"** (Annexe 3).

Un aquifère plus profond, qu'on a appelé **"nappe inférieure"** est présent dans d'autres bancs de sables moyens aussi **moyennement perméables,** d'une épaisseur maximale de 20 m, situés au-delà de 12 m de profondeur (Annexe 4).

2.3.2 Cône de déjection

Au N-W des terrains précités, le cône d'alluvions de La Brine est présent au lieu-dit *Chamard*. Il se compose de moraine remaniée et altérée (graviers sablo-limoneux) et d'alluvions glacio-lacustres de type sables limoneux et limons argileux (forage YV115, Annexe 9). Ces sédiments sont **très peu perméables**. Le toit de la Molasse, composée essentiellement de marnes et de grès, se trouve à faible profondeur (4 à 5 m), étant dans une situation de pied de versant. Les roches de la Molasse sont réputées **peu perméables.** Cette zone n'est donc pas du tout favorable pour une exploitation thermique de la nappe phréatique.

2.3.3 Zone de l'autoroute

Dans cette zone, une masse deltaïque gravelo-sableuse préwürmienne occupe les terrains quaternaires, délimitée par de la moraine latérale et recoupée par des dépôts lacustres plus récents (Annexe 5). Cette masse deltaïque est large d'environ 1'500 m en direction du sud et d'environ 500 m en direction de l'est. Son extension est fortement biseautée en direction de l'Est et n'est pas présente dans la zone du Verdan (coupe BB', Annexe 6).

Ces sédiments deltaïques comportent deux aquifères, respectivement nommés nappe supérieure (aquifère libre) et nappe inférieure (aquifère captif). Ces aquifères sont séparés par des sédiments lacustres et/ou de la moraine de fond **très peu perméables**, dont l'épaisseur maximale est d'une quinzaine de mètres. Ces deux aquifères sont essentiellement composés de graviers sableux peu limoneux, **à perméabilité assez élevée**. L'aquifère supérieure ne fait que quelques mètres d'épaisseur et se situe à moins de 6 m de profondeur. L'aquifère inférieur comporte une épaisseur importante, avec un maximum connu de 22.5 m au forage YV125 (Annexe 9), limité en profondeur par de la moraine de fond. Selon la coupe géologique BB' (Annexe 6), l'épaisseur de ces graviers sableux pourrait être plus importante au niveau des forages YV10 et 124. Il est à noter que ces aquifères sont entièrement situés au-delà de la limite communale d'Yverdon-les-Bains, sur le territoire de la commune de Montagny.

Il est également à noter qu'au niveau des serres de Stoll Production SA (nord du Mont de Chamblon), les graviers sableux de la masse deltaïque constituent une nappe phréatique captive épaisse de 4 à 6 m, dont le niveau d'eau se trouve à environ 1.4 m de profondeur. Cette nappe (aquifère supérieur) est actuellement capté par deux puits (forages STOLL P1 et P2), qui alimentent les serres de Stoll Production SA à Montagny en eau d'arrosage avec un débit d'environ 580 l/min chacun (Stoll, communication personnelle).

2.4 POTENTIEL THERMIQUE DISPONIBLE

L'exploitation thermique des eaux souterraines de la nappe phréatique nécessite la réalisation de deux puits (**doublet géothermique**) l'un pour le pompage, l'autre pour le rejet des eaux dans la nappe après valorisation thermique. La nature des terrains potentiellement aquifères et leur épaisseur ont été identifiées sur la base de la synthèse des données de forages (Annexes 2 et 9). Comme aucune valeur de perméabilité obtenue par essai de pompage n'est disponible concernant les forages d'intérêt (l'essentiel des forages concerne des sondes géothermiques ou des investigations géotechniques), la perméabilité des terrains a été estimée à partir des lithologies rencontrées (Annexe 9) et de la table de correspondance de l'annexe E de la norme SIA 384/7 "Utilisation de la chaleur de l'eau souterraine".

Dans un premier temps, le potentiel des aquifères présents au droit du quartier du Verdan a été calculé (nappe supérieure et inférieure). Il s'est avéré qu'en raison d'une prévalence de sédiments fins peu à moyennement perméables, les débits exploitables (< 1'000 l/min) y sont largement insuffisants pour assurer les besoins du projet (9'100 l/min, Annexe 1), même en prenant en compte une batterie de doublets. Tout au plus, on pourrait couvrir 10 à 15% des besoins thermiques. C'est pourquoi la zone d'investigation a été étendue et le potentiel de la zone de l'autoroute (Annexes 3 et 4), où la perméabilité des terrains est nettement meilleure, a également été évalué.

La puissance thermique exploitable de la nappe dépend directement de la valeur de débit maximal que peut fournir un puits, le Δ°T étant normalement fixé à 3°C. Ce débit est limité par les critères suivants :

- Le rabattement induit par le pompage ne doit pas dépasser 1/3 de l'épaisseur de l'aquifère (nappe libre) out 3/4 de la hauteur piézométrique (nappe captive). Pour les aquifères inférieurs (captifs), le choix a été fait de limiter le niveau rabattu à la profondeur de la zone aquifère, soit environ 8 m.

- Le niveau d'eau doit toujours rester au moins 2 m au-dessus des crépines d'aspiration de la pompe, afin d'éviter que le moteur ne surchauffe;
- Le coefficient d'ouverture et la longueur du tube filtrant doivent être suffisants pour que la quantité d'eau nécessaire puisse pénétrer dans le forage avec une vitesse de circulation adéquate, afin de limiter les pertes de charge et la mobilisation de sable fin;
- Le diamètre du puits est conditionné par le diamètre de la pompe (plus le débit est grand, plus ce dernier est important).

La puissance correspondant aux débits calculés est déterminée sur la base d'un COP de 4.5 et avec un Δ°T de 3 ou 5°C. L'ensemble des résultats sont synthétisés dans le Tableau 1 ci-dessous et présentés de manière détaillée aux Annexes 7 et 8.

Tableau 1: *Potentiel d'exploitation de la nappe phréatique (débit maximum d'un doublet géothermique unique)*

Zone	Aquifère	Débit [l/min]	Puissance géothermique [kW_{th}]	Puissance installée [kW_{th}]
Verdan	Nappe supérieure	25	5 à 9	7 à 11
	Nappe inférieure	870	182 à 304	234 à 390
Autoroute	Nappe supérieure	75	16 à 26	20 à 35
	Nappe inférieure	8'870	1'860 à 3'100	2'390 à 3'980

La nappe inférieure de la zone de l'autoroute (≥ 22 m de graviers fins sableux et peu limoneux) serait le seul aquifère identifié qui pourrait fournir un débit proche de celui nécessaire au projet. En revanche, il est important de signaler que des incertitudes subsistent concernant la valeur de perméabilité réelle des terrains et les modes de réalimentation de la nappe, **ne permettent pas à ce stade de garantir que les débits élevés calculés de manière préliminaire puissent réellement être exploités durablement.** De plus, la distance importante qui sépare la zone de l'autoroute du quartier de Verdan (≥ 500m) et le fait que la zone favorable se situe entièrement sur la commune de Montagny tempèrent l'aboutissement de cette solution alternative. A moins que les deux communes ne s'accordent sur un projet commun et centralisé d'exploitation de la nappe phréatique dans ce secteur, avec distribution de la chaleur et du froid par un chauffage à distance …

Les autres aquifères identifiés ne sont quant à eux de loin pas suffisamment productifs pour assurer les besoins thermiques du projet.

Ainsi, compte-tenu de ce qui précède, **l'exploitation thermique de la nappe phréatique sur le site de Verdan ne permet de loin pas d'assurer les besoins thermiques du futur quartier.**

3. AQUIFERES DE FAIBLE-MOYENNE PROFONDEUR

3.1 DONNEES DISPONIBLES

La carte géologique et la notice explicative de la feuille N° 94 de l'Atlas géologique de la Suisse fournissent des informations sur la géologie et l'hydrogéologie de la région [6].

Plusieurs rapports et publications décrivent les aquifères et les écoulements d'eaux profondes qui alimentent les sources froides et subthermales du Mont de Chamblon, ainsi que les eaux thermales des Bains et du forage d'Arkina [3, 5, 7, 12, 13, 15].

L'évaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud réalisée en 2003 [14] met en évidence plusieurs sites favorables pour la géothermie de moyenne et grande profondeur, dont celui de la région d'Yverdon-les-Bains.

Deux études exhaustives récentes sur la géothermie profonde de la région ont été réalisées en 2013 et 2014 sur mandat du Service des Energies d'Yverdon-les-Bains par un groupement de bureaux sous la conduite d'ALPGEO. La première était une étude préliminaire de phase A qui a pris en considération tous les aquifères profonds potentiels jusqu'à une profondeur de 5'000 m et a proposé un concept de valorisation de la chaleur pour produire de l'électricité et pour alimenter un chauffage à distance avec la chaleur résiduelle [2]. La seconde était une étude de faisabilité de phase B1 qui s'est intéressée à une valorisation de la chaleur uniquement pour du chauffage à distance, en visant une exploitation des aquifères moins profonds du Malm et du Dogger, avec dimensionnement préliminaire de forages profonds et estimation des coûts et de la production d'énergie thermique [1].

Pour terminer, en marge des deux études précitées, le Canton a mandaté les bureaux Terreplus à Bevaix et ARConseils pour établir un modèle géologique 3D de la région d'Yverdon-les-Bains jusqu'à une profondeur de 5'000 m [11].

On peut ainsi conclure que le contexte structural, géologique et hydrogéologique de la région d'Yverdon-les-Bains est assez bien connu, notamment en raison de nombreuses lignes sismiques réalisées dans le cadre de la prospection d'hydrocarbures, de plusieurs forages pétroliers profonds de prospection et de trois forages pour capter des eaux thermales (forages des Bains F4 et F5 et forage d'Arkina).

3.2 JUSTIFICATION DE VALORISER LA GEOTHERMIE DES AQUIFERES DU SOUBASSEMENT ROCHEUX FISSURE DANS LA REGION D'YVERDON

La prise en compte de la géothermie de faible-moyenne profondeur dans la région d'Yverdon-les-Bains prend tout son sens à la lumière des recommandations des études réalisées par la Ville en 2013-2014, des études du potentiel géothermique vaudois et neuchâtelois, et suite aux résultats prometteurs des études de faisabilité pour les projets de géothermie de moyenne profondeur EnergeÔ (région entre Aubonne et Nyon) et GP Eclépens, situés dans des contextes géologiques similaires à celui d'Yverdon.

En effet, l'existence de grands accidents tectoniques qui recoupent profondément la chaîne du Jura et qui se prolongent en direction d'Yverdon (Figure 3, zone décrochante du Chamblon) a été validée par des investigations géophysiques de type sismique réflexion. A proximité de ces accidents, la circulation et la remontée d'eaux chaudes profondes sont démontrées par la source thermale d'Yverdon et par des forages d'exploration et d'exploitation (forage Arkina, forages des Bains F4 et F5).

De plus, des forages pétroliers non loin d'Yverdon ont mis en évidence des températures anormalement élevées, notamment ceux d'Essertines (39°C à 340 m de profondeur), de Treycovagnes (48°C à 890 m) et d'Eclépens (110°C à 2'100 m). Ces températures anormales indiquent des circulations d'eaux chaudes dans des zones à forte perméabilité liées aux accidents tectoniques majeurs précités.

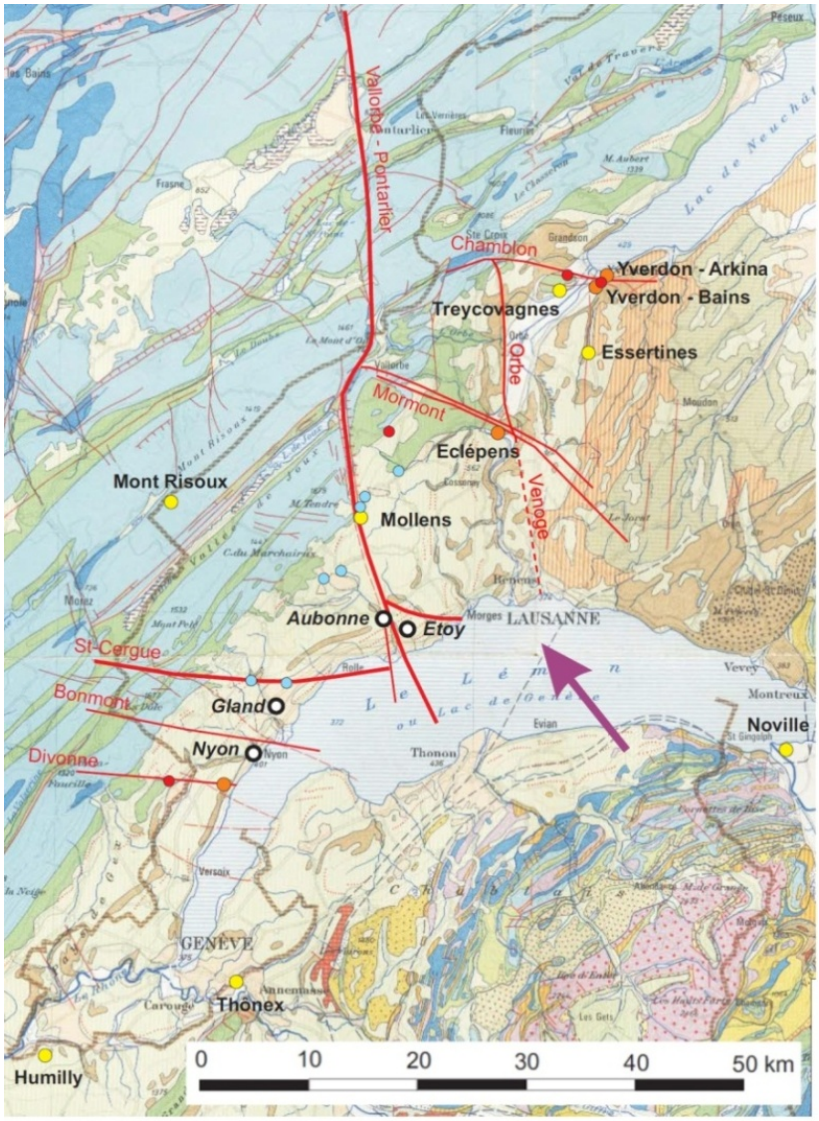


Figure 3 : *Carte tectonique du Nord-Ouest de la Suisse avec report des accidents géologiques majeurs au pied du Jura dans le canton de Vaud [14].*

3.3 CONTEXTE STRUCTURAL, GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE REGIONAL

3.3.1 Tectonique

Une carte tectonique simplifiée de la région d'Yverdon figure à l'Annexe 10 et partiellement en Figure 4. Elle illustre bien la densité des nombreux accidents tectoniques qui recoupent cette zone. Les Annexes 11 et 12 montrent en coupe l'interprétation géologique la plus récente tirée de l'étude préliminaire sur le potentiel géothermique profond à Yverdon-les-Bains [2], ainsi que la position approximative d'un forage de reconnaissance implanté sur le site de Verdan.

La ville d'Yverdon-les-Bains est traversée par un accident majeur connu sous le nom de **"Faille de Pipechat-Chamblon-Chevressy"** (ci-après *"zone faillée de PCC"*), qui se compose de plusieurs failles et dont la largeur globale peut atteindre 800 à 900 mètres (Figure 4). Cette zone faillée régionale prend naissance dans la région de Cuarny pour se résoudre dans celle de Baulmes. Cet accident a pour effet de décaler le compartiment Sud (plaine de l'Orbe, Mont de Chamblon) d'au moins un km vers l'Ouest et surtout de surélever d'une hauteur pouvant atteindre jusqu'à 600 m ce compartiment par rapport à celui situé au Nord de l'accident. Ces conditions géologiques ont notamment pour conséquence qu'un horizon aquifère donné sera plus profond et donc plus chaud au Nord de la *zone faillée de PCC*, là où se situe justement le quartier de Verdan.

Les observations sur le terrain et l'examen des profils sismiques montrent que la *zone faillée de PCC* est composée de plusieurs failles de type et probablement d'âge différents. Sont distinguées [1]:

- Le **"Grand accident d'Yverdon",** qui provoque les principaux rejets horizontaux et verticaux. Il est indiqué en bleu foncé sur l'Annexe 10 et la Figure 4. Il traverse Yverdon d'Ouest en Est;
- Les **trois failles convergentes d'Essert, du Moulinet et de Chamblon,** qui sont subverticales et semblent un peu postérieures au grand accident d'Yverdon;
- La grande **faille inverse d'Essertines,** avec laquelle le Grand accident d'Yverdon vient se confondre au Nord-Est de Cuarny;
- Les **failles normales du Buron et d'Ependes.**

Le Grand accident d'Yverdon joue un rôle essentiel dans la circulation des eaux thermales alimentant les Bains. La faille du Moulinet alimente la source éponyme située au Nord-Ouest du Mont de Chamblon, de même que la source du Cossaux jaillissant au Nord-Est de cette même colline et exploitée pour l'approvisionnement en eau potable de la Ville d'Yverdon-les-Bains.

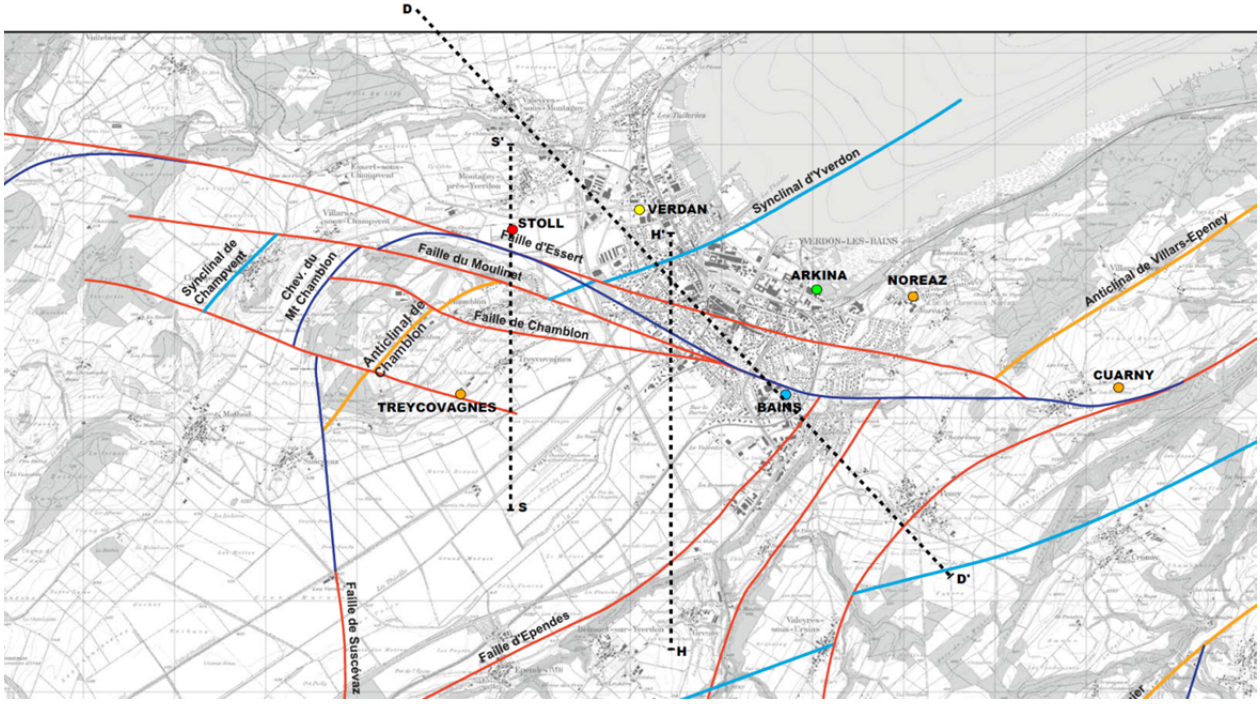


Figure 4 : *Extrait de la carte structurale simplifiée de la région d'Yverdon-les-Bains. Y sont représentés les principaux accidents tectoniques, les forages pétroliers et d'eau thermale, ainsi que le tracé des coupes géologiques figurant aux Annexes 11 et 12.*

3.3.2 Lithostratigraphie et formations potentiellement aquifères

Une description de la succession lithologique et géologique prévisionnelle des formations situées sous le quartier de Verdan est synthétisée dans les coupes géologiques des Annexes 11 et 12. Le log virtuel d'un forage de reconnaissance vertical de 750 m de profondeur sur le site de Verdan et la description des terrains qui seraient traversés par celui-ci (Annexe 13) figurent ci-après. La cible géothermique est représentée par les **formations calcaires et fracturées du Crétacé.**

Log virtuel d'un forage de reconnaissance de 750 m

0 – 105 m :	Quaternaire (terrains meubles fins)
105– 541 m :	Molasse (marnes et grès)
541– 747 m :	Crétacé (alternance de calcaires et marnes)
747 m :	Toit du Malm (Purbeckien, calcaire argileux)

Quaternaire

Selon le modèle géologique 3D [10 et 11], les terrains meubles du Quaternaire ont une épaisseur d'environ 105 m. Comme déjà indiqué dans le § 2.4, la perméabilité de ces formations est faible et ne permet pas d'envisager une exploitation thermique d'une nappe phréatique. A remarquer que l'épaisseur du Quaternaire diminue fortement en direction du Nord.

Cénozoïque

Le sous-bassement rocheux attendu dès 105 m de profondeur est représenté par la Molasse Tertiaire, qui se compose, de haut en bas, par : l'Aquitatien (marnes et grès), le Chattien supérieur (grès et marnes à gypse, calcaire et dolomies) et une dizaine de mètres de Sidérolitique (grès et argilites). C'est un étage avec une prépondérance de marnes et qui est réputé **peu perméable**. La base de la Molasse est attendue à ~540 m de profondeur.

Mésozoïque

Le sous-sol profond est constitué de roches calcaires ou marneuses d'origine marine. Les plus calcaires sont aussi les plus aquifères en raison de leur compétence à la fracturation et à la karstification. Les unités du Mésozoïque qui seront probablement traversées par le forage de 750 m sont, de haut en bas :

Crétacé

- Les **calcaires du Barrémien et de l'Hauterivien** (Urgonien jaune, pierre jaune de Neuchâtel), attendus dès 541 m de profondeur et constituant souvent un (des) aquifère(s) distinct(s).
- Les marnes de l'Hauterivien inférieur (épaisseur de 30 à 35 m) représentant un aquitard potentiel.
- Les **calcaires et marbres du Valanginien et Berriasien,** constituant souvent au niveau régional un (des) aquifère(s) distinct(s) et important(s). Les sources du Mont de Chamblon émergent de ces formations calcaires, mais dans le compartiment au Sud de la *zone faillée de PCC*.

Malm

- Calcaires argileux peu perméables du Purbeckien (Malm supérieur).

3.3.3 Identification des principaux aquifères potentiels

Le modèle géologique régional 3D (Annexe 13) [11], ainsi que les coupes géologiques passant à proximité du site de forage (Annexes 11 et 12) permettent d'établir la colonne litho-stratigraphique détaillée (Tableau 2), ainsi que la séquence des formations potentiellement aquifères.

Tableau 2 : *Unités litho-stratigraphiques prévues au droit du forage de reconnaissance vertical sur le site de Verdan (prévisions à partir du modèle géologique 3D).*

Formation géologique	Type de roche	Epaisseur	Profondeur	Remarques, réservoirs
Quaternaire	Sables fins et argiles, moraine de fond	~105 m	0 à ~105 m	**Terrains peu perméables**
Molasse	Marnes et grès	~436 m	~105 à ~541 m	**Terrains peu perméables**
Crétacé	Alternance de calcaires et marnes	~206 m	~541 à ~747 m	**Aquifères** (si matrice calcaire et roche fracturée)
Malm sup.	Calcaires argileux (Purbeckien)	~15 m	~747 à ~762 m	**Terrains peu perméables**

Le projet de géothermie de faible-moyenne profondeur sur le site de Verdan viserait à capter, dans le compartiment Nord délimité par l'*accident majeur de PCC*, des eaux thermales dans les formations calcaires du **Crétacé** (de haut en bas : Barrémien, Hauterivien, Valanginien et Bérriasien), qu'on estime naturellement fracturées et donc perméables et aquifères.

Dans le contexte de fracturation intense attendu de part et d'autre de la *zone faillée de PCC*, et avec les rejets très importants observés, **une liaison hydraulique verticale est susceptible d'exister au sein du Crétacé entre le Valanginien et l'Hauterivien / Barrémien**.

Une telle liaison est également possible entre les aquifères du Crétacé et ceux plus profonds du Malm supérieur (Portlandien), qui ne sont séparés que par le mince aquitard du Purbeckien (env. 15 m). Des remontées rapides d'eaux profondes à la faveur de fractures associées à la *zone faillée de PCC* sont donc possibles, aussi bien dans le compartiment Sud (composante subthermale démontrée à la source du Cossaux) que dans le compartiment Nord (remontées d'eau thermale au forage d'Arkina). En raison de ce type de by-pass hydraulique, les eaux captées dans le Crétacé pourraient être légèrement plus chaudes que les prévisions du scénario probable (cf. § 3.4).

3.3.4 Schéma conceptuel des écoulements

Toutes les eaux thermales et subthermales de la région d'Yverdon-les-Bains se sont infiltrées dans les affleurements du Malm et/ou du Crétacé de la première chaîne du Jura (Mont Suchet, Aiguilles de Baulmes, Le Chasseron). L'eau subthermale du Mont de Chamblon est partiellement diluée par de l'eau froide s'infiltrant dans la région de Baulmes (perte de La Feurtille). Le schéma en Figure 5 montre les différents écoulements souterrains et les zones d'exutoire entre le pied du Jura et la région d'Yverdon-les-Bains.

Il est acquis que la partie centrale de la *zone faillée de PCC* (gouge de faille) est peu perméable. Elle sépare ainsi hydrauliquement et de manière efficace les aquifères multicouches du Crétacé et du Malm de part et d'autre de l'accident en deux systèmes aquifères distincts:

- Le **système aquifère du Centre thermal et du Mont de Chamblon** au **Sud de la *zone faillée de PCC***, auquel appartiennent les eaux subthermales du Mont de Chamblon et les eaux thermales des Bains d'Yverdon.
- Le **système aquifère d'Arkina** au **Nord de la *zone faillée de PCC***, auquel appartiennent les eaux des forages La Grève-1 (Arkina) et Noréaz-1. Le forage de reconnaissance sur le site de Verdan appartient à ce système aquifère.

Le système aquifère d'Arkina dans le Malm/Crétacé n'a pas d'exutoire naturel. Sans les forages de La Grève-1 et Noréaz-1, on n'aurait pas eu connaissance de ces eaux souterraines. Contrairement au système aquifère du Centre thermal, les eaux du système aquifère d'Arkina n'ont pas de caractère karstique et sont très anciennes.

La relation hydraulique existant entre les forages La Grève-1 et Noréaz-1, le gradient hydraulique supérieur dans l'aquifère du Crétacé, ainsi que les compositions chimiques des eaux laissent supposer que l'eau produite au forage La Grève-1 d'Arkina est un mélange entre les eaux du Portlandien (Malm) et celles des aquifères moins profonds du Crétacé.

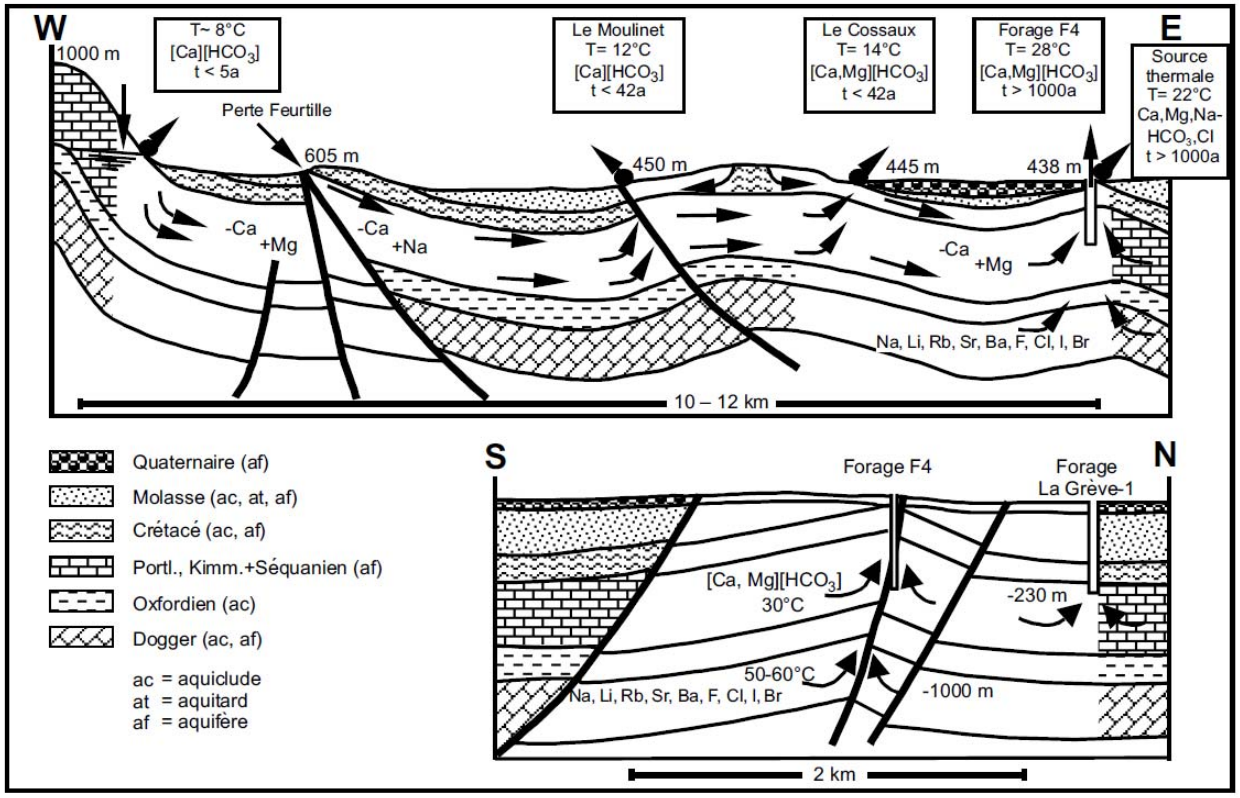


Figure 5 : *Modèle conceptuel des écoulements souterrains de l'eau thermale du système aquifère du Centre thermal d'Yverdon-les-Bains (compartiment au Sud de la zone faillée de PCC). Les coupes sont schématiques et ne sont pas à l'échelle (tiré de [5]). Le forage de reconnaissance sur le site de Verdan se situe dans le compartiment Nord, tout comme le forage La Grève-1 d'Arkina (cf. coupe orientée Sud-Nord).*

3.4 POTENTIEL GEOTHERMIQUE DISPONIBLE

3.4.1 Paramètres à la base des calculs de potentiel géothermique

L'estimation du potentiel géothermique se base sur les deux paramètres suivants :

- **Température de l'eau** en tête de puits, paramètre qui dépend de la profondeur et du gradient géothermique local, influencé par l'effet thermique des circulations d'eau sur le massif rocheux.
- **Débit d'exploitation**, paramètre qui dépend de la perméabilité de l'aquifère (fracturation ouverte du rocher) et du niveau d'eau stabilisé dans le puits pendant l'exploitation par pompage (rabattement).

Les scénarios de calcul prenant en compte ces deux paramètres figurent dans l'Annexe 14. Les **valeurs moyennes de débit et de température de l'eau en tête de puits** ont été calculées sur la base des hypothèses suivantes :

- **Gradient géothermique :** valeur moyenne de 35.4°C par km, cf. rapport hydrogéologique du 8 septembre 2014 [1].
- **Température moyenne de l'eau au sein des aquifères du Crétacé :** calculée au centre de celui-ci (valeur moyenne entre la température au toit de l'aquifère et celle à sa base).
- **Potentiel hydraulique dans le forage au repos :** forage supposé artésien, mais juste pas jaillissant. Le niveau d'eau statique (sans pompage) se situe proche de la surface.
- **Perméabilité de l'aquifère** : valeurs moyennes choisies à partir des données de la littérature.
- **Transmissivité de l'aquifère** : calculée en multipliant la perméabilité moyenne par l'épaisseur de l'aquifère.
- **Facteur d'augmentation de la transmissivité** : ce facteur empirique a été introduit pour tenir compte du fait que les forages sont censés traverser des zones faillées et à forte perméabilité, les données de transmissivité provenant de la littérature correspondant à des forages verticaux réalisés en dehors des grands accidents tectoniques. Il permet de corriger à la hausse les valeurs de transmissivité connues attendues et n'a été utilisé que pour le scénario favorable.
- **Potentiel hydraulique dans le puits exploité :** rabattement du niveau d'eau suite au pompage compris entre 75 et 300 m.
- **Durée minimale d'exploitation du doublet** : 40 ans.
- **Température de l'eau en tête de puits :** calculée sur la base d'une perte thermique de 1 à 2°C par km entre la zone aquifère captée et la surface.

En plus des valeurs moyennes représentant le scénario probable, des scénarios "défavorable" et "favorable" ont été pris en considération avec des valeurs de base moins ou plus élevées (cf. Annexe 14). Pour éviter d'avoir deux cas trop différenciés, les températures les plus élevées ont été croisées avec les débits les plus faibles, et vice-versa. Cela permet d'avoir une situation plus proche de la réalité même pour ces deux cas extrêmes.

3.4.2 Estimation de la température de l'eau en tête de puits et du débit d'exploitation

Température de l'eau

Elle dépend de la profondeur des aquifères et du gradient géothermique local, essentiellement déterminé, en absence de chambres magmatiques peu profondes (ce qui est le cas en Suisse), par le flux thermique diffusif provenant essentiellement du socle cristallin sous-jacent (**effet conductif**) et des circulations d'eau descendantes (froides) ou remontantes (chaudes) à la faveur de grands accidents tectoniques (**effet convectif**).

Une **valeur moyenne de 35.4°C/km** a été retenue pour les calculs [1], située dans une fourchette de 30.0°C/km (gradient géothermique normal) à 36.7°C/km. Des valeurs de température moyenne ont été calculées au sein des aquifères potentiels du Crétacé et **corrigées ensuite en tête de puits** (Annexe 14).

Les valeurs de température de l'eau en tête de puits calculées pour les aquifères potentiels du Crétacé sont les suivantes :

Scénario	Défavorable	**Probable**	Favorable
Température	33°C	**32°C**	29°C

L'incertitude sur les valeurs données est de l'ordre de 3 à 5 %, en raison de l'erreur possible sur l'épaisseur et la profondeur des séries sédimentaires.

Débit d'exploitation

Le débit dépend non seulement de la fracturation du massif rocheux, mais aussi du nombre et de l'ouverture des fractures recoupées par le forage profond. Il est donc important, dans le cadre d'un doublet d'exploitation, de prévoir une **déviation du forage de production** dans les cibles aquifères, afin de les recouper sur une longueur autant importante que possible. Idéalement, la traversé des réservoirs du Crétacé calcaire devrait se faire avec des forages subhorizontaux, pour traverser de manière optimale les fractures subverticales. En réalité, l'angle de déviation ne devrait pas dépasser 45° par rapport à la verticale, pour éviter autant que possible des problèmes de stabilité du trou de forage.

Les valeurs de débit d'exploitation calculées pour les aquifères potentiels du Crétacé sont les suivantes :

Scénario	Défavorable	**Probable**	Favorable
Température	6 l/s	**18 l/s**	34 l/s

L'incertitude sur les valeurs de débit est d'au moins 50 %.

3.4.3 Estimation des puissances géothermiques

Sur la base des hypothèses de température de l'eau et de débits d'exploitation, des puissances géothermiques ont été calculées avec un refroidissement des eaux jusqu'à 5°C. Les besoins en énergie thermique du futur quartier de Verdan seraient amplement couverts dans les scénarios "probable" et "favorable" (Annexe 15).

3.4.4 Mode d'exploitation des aquifères et valorisation de l'eau refroidie

En principe, l'exploitation thermique des eaux du Crétacé devrait se faire avec un doublet, permettant le rejet des eaux refroidies après valorisation thermique dans ces aquifères de faible-moyenne profondeur. Toutefois, si la qualité chimique des eaux souterraines en permet le rejet dans des eaux de surface et si les aquifères sont naturellement bien réalimentés, la possibilité d'une exploitation avec un seul puits (singlet) pourrait être envisagée. C'est déjà le cas par exemple de l'exploitation du forage F4 aux Bains.

Une **synergie très intéressante** pourrait alors être trouvée entre la valorisation thermique des eaux souterraines et l'approvisionnement en eau potable de la commune. En effet, l'eau captée par forage profond pourrait être doublement valorisée, d'abord **thermiquement** avec des pompes à chaleur et ensuite pour alimenter le réseau de distribution **d'eau potable,** sous réserve d'une qualité satisfaisante de l'eau.

3.5 ESTIMATION DES COUTS POUR UN FORAGE DE RECONNAISSANCE

Faute d'espace suffisant en milieu urbain, depuis quelques années on assiste de plus en plus à la réalisation de champs de sondes géothermiques dont les forages dépassent 500 m de profondeur. Un forage vertical de reconnaissance pour reconnaître les formations aquifères du Crétacé (750 m) pourrait ainsi être réalisé avec une foreuse pour sondes géothermiques surdimensionnée, limitant ainsi les coûts de perforation. De tels forages ont déjà été réalisés récemment avec succès dans la région de Lausanne jusqu'à 800 m (projets KEPI-Plaines du Loup et Ecole hôtelière de Lausanne).

Sur la base de ces forages, les coûts d'investissements attendus pour un forage d'exploration de 750 m sont de l'ordre de 200 à 250 kCHF. En cas de succès, le coût supplémentaire pour le chemisage final du forage avec tubages en INOX est de l'ordre de 80 à 100 kCHF. Ce type de forage pourrait faire l'objet d'un soutien financier de l'Office fédéral de l'énergie dans le cadre de son programme d'exploration du sous-sol profond, ainsi que du Canton dans le cadre de la valorisation des énergies renouvelables.

3.6 VALORISATION THERMIQUE D'AUTRES EAUX SOUTERRAINES

Au pied du Mont de Chamblon, jaillissent les deux grandes sources karstiques suivantes, représentées par de nombreuses émergences groupées sur deux sites ponctuellement bien délimités :

- **Source du Cossaux :** captées depuis 2001 par 8 forages inclinés, les eaux de cette émergence participent à l'approvisionnement en eau potable de la ville d'Yverdon-les-Bains. Le débit total varie de 42 à 90 l/s et les eaux sont subthermales (12.3 à 13.6 °C) et faiblement minéralisées.
- **Source du Moulinet :** située à 1.5 km du Cossaux, elle jaillit également des calcaires du Crétacé par 8 émergences. Ces eaux alimentaient jadis la ville d'Yverdon-les-Bains en eau potable. La qualité bactériologique médiocre récurrente a entraîné la mise hors service de cette source. Toutefois, un projet de valorisation de ces eaux pour l'approvisionnement en eau potable est à l'étude. Le débit total de ce groupe d'émergences varie entre 19 et ~750 l/s et la température des eaux évolue entre 8.6 et 11.9 °C.

En raison des débits élevés (total de 60 à 840 l/s), un **projet d'envergure**, prévoyant la valorisation thermique de ces eaux avec pompes à chaleur pour alimenter un réseau de chauffage à distance et le réseau d'eau potable de la Ville, pourrait être envisagée. Les serres Stoll, situées à 600 m de la source du Cossaux, représentent d'ailleurs un grand consommateur de chaleur qui justifierait à lui tout seul la mise en place d'une centrale thermique. Avec un Δ°T de 4°C, des **puissances géothermiques de l'ordre de 1.3 à 17.6 MW_{th}** pourraient être produites (Annexe 16).

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Nappe phréatique

Au niveau du site du futur quartier de Verdan, en raison de la faible perméabilité des sédiments à granulométrie prédominante fine, l'**exploitation thermique de la nappe phréatique** avec des doublets géothermiques **ne représente pas une solution énergétique adéquate pour fournir de la chaleur (PAC) et du froid (free cooling)**. Les débits estimés sont **largement insuffisants** par rapport aux débits requis par le projet pour assurer les besoins en chauffage et ECS. Tout au plus, on pourrait garantir 10 à 15% des besoins thermiques.

Par contre, à l'Ouest du site de Verdan (zone de l'autoroute), une masse aquifère gravelo-sableuse assez épaisse par endroits (>20 m) et avec des perméabilités nettement meilleures pourrait être exploitée thermiquement. Les débits d'exploitation estimés pour la nappe inférieure sont proches de ceux nécessaires au projet du quartier de Verdan (~9'100 l/min pour produire 1'907 kW_{th} au condenseur de la PAC). Une certaine incertitude subsiste, à ce stade du projet, quant à la recharge effective de cet aquifère ainsi qu'aux perméabilités estimées de manière préliminaire à partir de la description lithologiques des sédiments dans les divers forages existants. L'emplacement de cet aquifère sur la commune de Montagny, ainsi que sa distance au quartier de Verdan (>500 m) sont également des éléments qui rendement moins attractive cette variante. A moins que les deux communes ne s'accordent sur un projet commun et centralisé d'exploitation de la nappe phréatique dans ce secteur, avec distribution de la chaleur et du froid par un chauffage à distance …

Aquifères de faible-moyenne profondeur

La région d'Yverdon-les-Bains est caractérisée par un **contexte géothermique favorable**, avec la présence de deux aquifères majeurs de faible à moyenne profondeur, le **Crétacé** et le **Malm**, reconnus pour leur productivité. Ces formations calcaires sont recoupées par la "zone faillée de PCC", accident majeur qui traverse la région d'Ouest en Est et dont la largeur globale peut atteindre 800 à 900 mètres. Cette zone faillée favorise la circulation des eaux souterraines et détermine des perméabilités de fracture élevés. Ces aquifères peuvent donc fournir des débits intéressants (à titre d'exemple, 15 à 30 l/s pour les forages d'Arkina et F4 aux Bains), avec des températures comprises entre 25 et 35°C. Le site du Verdan se situe, tout comme le forage d'Arkina, dans le compartiment au Nord de la zone faillée de PCC, caractérisé par une profondeur plus importante des formations géologiques, synonyme de températures plus élevées par rapport au compartiment Sud.

Sur le site du futur quartier de Verdan, **l'aquifère du Crétacé représente la cible géothermique**. Il alimente dans le compartiment Sud de la zone faillée de PCC les sources du Mont de Chamblon (débits totaux compris entre 60 et 840 l/s !) et se situe **entre 540 et 750 m de profondeur**, avec une incertitude de l'ordre de 10%. Avec des débits raisonnables de l'ordre de **15 à 23 l/s** et des températures de l'eau de **25 à 35°C**, la puissance géothermique requise de 1'907 kW pourrait être satisfaite, d'abord par une valorisation directe (échangeur de chaleur) et ensuite par une PAC.

Un forage vertical de reconnaissance pour reconnaître les formations aquifères pourrait être réalisé avec une foreuse pour sondes géothermiques surdimensionnée, de tels forages ayant déjà été réalisés récemment avec succès dans la région de Lausanne jusqu'à 800 m. Sur la base de ces forages, les coûts d'investissements attendus pour un forage d'exploration de 750 m sont de l'ordre de 200 à 250 kCHF. En cas de succès, le coût supplémentaire pour le chemisage final du forage avec tubages en INOX est de l'ordre de 80 à 100 kCHF. Ce type de forage pourrait faire l'objet d'un soutien financier de l'Office fédéral de l'énergie et du Canton.

Une **synergie très intéressante** pourrait être trouvée entre la valorisation thermique des eaux souterraines du Crétacé et l'approvisionnement en eau potable de la commune. En effet, l'eau captée par forage profond et exploitée en singlet, pourrait être doublement valorisée, d'abord **thermiquement** avec des pompes à chaleur et ensuite pour alimenter le réseau de distribution **d'eau potable,** sous réserve d'une qualité satisfaisante de l'eau.

Nous recommandons d'analyser la faisabilité d'une exploitation de l'aquifère du Crétacé sur le site de Verdan. Un tel projet demande au préalable une **étude de faisabilité** pour préciser les prévisions géologiques et hydrogéologiques, les coûts de forage et la possibilité de se raccorder au réseau d'eau potable existant.

Pour terminer, nous signalons que **les sources du Mont de Chamblon pourraient faire l'objet, dans le cadre d'un projet d'envergure, d'une valorisation thermique avec pompes à chaleur pour alimenter un chauffage à distance et le réseau d'approvisionnement en eaux potable de la Ville**, dans le cadre notamment du projet de réhabilitation de la source du Moulinet pour la fourniture d'eau de boisson. En raison des débits élevés (total de 60 à 840 l/s pour les sources du Moulinet et celles du Cossaux) et avec un Δ°T de 5°C, des puissances géothermiques entre 1.1 et 17.6 MW_{th} pourraient être produites, soit une **puissance de chauffage moyenne de l'ordre de 13 MW_{th} !** Les eaux refroidies pourraient ensuite alimenter le réseau d'eau potable de la Ville avec des débits importants.

ALPGEO Sàrl
Géologues et Hydrogéologues Conseils

Thibaud Roux
Géologue diplômé UNIL

Gabriele Bianchetti
Directeur ALPGEO
Hydrogéologue dipl. CHYN-UNINE

Sierre, le 23 juillet 2017

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 Calcul des débits d'exploitation de la nappe phréatique pour obtenir la puissance géothermique requise de 1'907 kW

Annexe 2 Plan de situation des forages, des zones et des coupes

Annexe 3 Distribution des forages en fonction de l'épaisseur supposée et de la composition de l'aquifère supérieur

Annexe 4 Distribution des forages en fonction de l'épaisseur supposée et de la composition de l'aquifère inférieur

Annexe 5 Routes nationales suisses - Coupe géologique A-A'

Annexe 6 Routes nationales suisses - Coupe géologique B-B'

Annexe 7 Exploitation thermique de la nappe supérieure – Estimation du débit maximum d'un puits unique et de la puissance installée correspondante

Annexe 8 Exploitation thermique de la nappe inférieure – Estimation du débit maximum d'un puits unique et de la puissance installée correspondante

Annexe 9 Synthèse des données de forages issues du cadastre géologique du canton de Vaud

Annexe 10 Carte structurale simplifiée de la région d'Yverdon-les-Bains, avec forages profonds existants et tracé des coupes géologiques

Annexe 11 Profil géologique D-D' orienté NW-SE et passant par le quartier de Verdan et par les puits d'eau thermale des Bains d'Yverdon

Annexe 12 Profil géologique H-H' orienté S-N et se terminant à proximité du quartier de Verdan

Annexe 13 Note technique de Terreplus avec extraits du modèle géologique régional 3D

Annexe 14 Aquifères du Crétacé – Estimation des valeurs de débit et de température de l'eau en tête de puits

Annexe 15 Estimation des puissances géothermiques obtenues avec un doublet exploitant les aquifères du Crétacé

Annexe 16 Estimation des puissances géothermiques obtenues en valorisant la géothermie des sources du Mont de Chamblon

BIBLIOGRAPHIE

[1] ALPGEO & ARConseils (2014). *Projet GP Yverdon - Phase B1. Variante "Géothermie de moyenne profondeur – Projet chaleur" – Cibles géothermiques : Malm et Dogger*. Note explicative à l'intention du Service des Energies de la ville d'Yverdon-les-Bains, 8 septembre 2014.

[2] ALPGEO, pour Groupement GP Yverdon (2013). *Projet de géothermie profonde à Yverdon-les-Bains – Phase A : étude préliminaire*. Rapport final de phase A à l'intention du Service des Energies de la ville d'Yverdon-les-Bains, 30 avril 2013.

[3] CSD (2001). *Commune de Chamblon. Services industriels de la ville d'Yverdon-Les-Bains. Recaptage des sources du Cosseaux.* VD2350/VDJDD. Rapport établi par le bureau CSD, 30 avril 2001.

[4] Etat de Vaud. *Cadastre géologique en ligne.*

[5] Muralt R. (1999). Processus hydrogéologiques et hydrochimiques dans les circulations profondes des calcaires du Malm de l'arc jurassien (zones de Delémont, Yverdon-les-Bains, Moiry, Genève et Aix-les-Bains). Matér. géol. Suisse, Géotech, 82, 236 pp.

[6] Office fédéral de la topographie (2017). *Atlas géologique de la Suisse au 1 :25'000, feuille N° 94 Yverdon-les-Bains et feuille N°114 Granson et notice explicative.*

[7] Pronk M. (2009). *Origin and Behaviour of Microorganisms and Particles in Selected Karst Aquifer Systems.* Thèse de doctorat présentée à l'Université de Neuchâtel. Défense de thèse : 27 mars 2008. Présentation public : 6 mars 2009.

[8] Routes nationales suisses (1983). *Autoroute Yverdon-Neuchâtel. Section 503 Commune de Montagny et Yverdon, Route d'accès à la jonction ; Etude géotechnique, profil en long KM 138.0-2525.78*

[9] Routes nationales suisses (date inconnue). *Autoroute Yverdon-Neuchâtel. Référence inconnue.* Document transmis par le bureau ARConseils à Buchillon.

[10] Terreplus Sàrl (2017). *Note pour Alpgeo.- Extraits du modèle géologique structural Yverdon au lieu-dit "Verdan".* Non publié, 7 pages, 30 juin 2017

[11] Terreplus Sàrl (2013). *Modèle géologique structural 3D pour la région d'Yverdon*. Réalisé dans l'étude préliminaire du projet GP Yverdon, sous mandat de l'Etat de Vaud

[12] Vuataz F.-D., Gusset R., Rodriguez A. & Schönborn G. (1999). *Forage géothermique F5 à Yverdon-les-Bains.* Rapport final. Rapport pour l'Office fédéral de l'énergie.

[13] Vuataz F.-D. (1982). *Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes*. Matér. Géol. Suisse, sér. Hydrol., 29, Kümmerly & Frey, Berne, 174 p.

[14] Wilhelm J., Vuataz F.-D. et Bianchetti G., 2003. *Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud*. Etat de Vaud et OFEN.

[15] Zahner P., Mautner J. & Badoux H. (1974). *Etude hydrogéologique des sources thermominérales de Lavey, d'Yverdon et de Saxon*. Mém. Soc. vaud. Sci. nat., 95, 15, 5, 209-234.

Hydrogéologie
Eaux minérales
Dangers naturels
Environnement

Alpgeo GEOTHERMIE

ALPGEO Sàrl
Hydrogéologues Conseils

Av. des Alpes 6 CH - 3960 SIERRE
Tél. : 0041 (0)27 456 94 56 www.alpgeo.ch

Projet : **Quartier de Verdan à Yverdon-les-Bains**

Eploitation thermique d'une nappe phréatique

CALCUL DE DEBITS A PARTIR DE PUISSANCES DE CHAUFFAGE

Formule: **Q = P / (C x ΔT)**

C [KJ/(kg·K)] = **4.187**

COP = **4.0**

Besoins pour chauffage et ECS

Puissance installée 2'542 kW Puissance géothermique **1'907 kW**

	Q [l/mn]	Q [l/s]	Pompe * immergée	Diam. min crépines	ΔT [K = °C]	$P_{géothermique}$ [kW]
A1) Δ°T faible	**9'108**	**151.8**	+10"	>300 mm	**3.0**	**1'907 kW**
A2) Δ°T moyen	**6'833**	**113.9**	+10"	>300 mm	**4.0**	**1'907 kW**
A3) Δ°T élevé	**5'465**	**91.1**	+10"	>300 mm	**5.0**	**1'907 kW**
A4) Δ°T élevé	**4'968**	**82.8**	+10"	>300 mm	**5.5**	**1'907 kW**
A5) Δ°T élevé	**4'205**	**70.1**	+10"	>300 mm	**6.5**	**1'907 kW**

* Modèles GRUNDFOS

Sierre, le 11.07.2017

ANNEXE 2

SERVICE DE L'URBANISME ET DES BÂTIMENTS
VERDAN CET ANALYSE OPPORTUNITÉS ÉNERGÉTIQUES

PLAN DE SITUATION DES FORAGES

RÉPARTITION DES FORAGES DANS LES DIFFÉRENTES ZONES

Plan au 1 : 10'000 (A3)

537 000 538 000 539 000

183 000 182 000 181 000

Zone du cône de déjection

Verdan - parcelles communales concernées

Puits de pompage

Zone de l'autoroute

Zone du quartier du Verdan

YV12 YV115 YV114 YV125 YV124 YV122 YV121 YV120 YV9 YV8 YV131

B' A' A B

S1 KF S2 KF

STOLL P2 STOLL P1

PYVV-3990-6

T1 P1 F2 S4 S3 T20 KR1P T1 S1 Platanes S2 Platanes 159B 838 F1 4093 F1 87 F2 87 368 G S2 4215 8343 563

Coupes
Forages
Quaternaire - tourbière
Quaternaire - ancienne terrasse lacustre
Quaternaire - cône de déjection
Quaternaire - alluvions fluvioglaciaires et sédiments lacustres interglaciaires
Molasse
Crétacé

Géothermie
Eaux minérales
Dangers naturels
Sites pollués
Alpgeo HYDROGEOLOGIE

0 0.5 1 Km

N

\\serveur\Data-ALPGEO\MANDATS-ACTUELS\1-Puits de pompage\2017-Quartier Verdan Yverdon\SIG\3-Projets\1706 Situation forages.mxd

Sierra, le 11.07.2017

SERVICE DE L'URBANISME ET DES BÂTIMENTS
VERDAN CET ANALYSE OPPORTUNITÉS ÉNERGÉTIQUES

PLAN DE SITUATION DES FORAGES

DISTRIBUTION DES FORAGES EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR SUPPOSÉE ET LA COMPOSITION DE L'AQUIFÈRE SUPÉRIEUR

Plan au 1 : 10'000 (A3)

537 000 538 000 539 000

183 000 182 000

Verdan - parcelles communales concernées

Puits de pompage STOLL SA

Zone de l'autoroute

Epaisseur supposée de l'aquifère
- >12m
- entre 6 et 12m
- entre 0 et 6m

- graviers sableux (perméabilité K = 1E-3 m/s)
- sables moyens (perméabilité K = 1E-4 m/s)
- sables fins (perméabilité K = 1E-5 m/s)
- sédiments très peu perméables (perméabilité K < 1E-5 m/s)
- Quaternaire - tourbière
- Quaternaire - ancienne terrasse lacustre
- Quaternaire - cône de déjection
- Quaternaire - alluvions fluvioglaciaires et sédiments lacustres interglaciaires
- Molasse
- Crétacé

Alpgeo HYDROGEOLOGIE
Géothermie
Eaux minérales
Dangers naturels
Sites pollués

0 0.5 1 Km

N

\\serveur\Data-ALPGEO\MANDATS-ACTUELS\1-Puits de pompage\2017-Quartier Verdan Yverdon\SIG\3-Projets\1706 Aquif sup.mxd

Sierra, le 27.06.2017

SERVICE DE L'URBANISME ET DES BÂTIMENTS
VERDAN CET ANALYSE OPPORTUNITÉS ÉNERGÉTIQUES

PLAN DE SITUATION DES FORAGES

DISTRIBUTION DES FORAGES EN FONCTION
DE L'ÉPAISSEUR SUPPOSÉE ET DE LA COMPOSITION DE L'AQUIFÈRE INFÉRIEUR

Plan au 1 : 10'000 (A3)

537 000 538 000 539 000

183 000 182 000 181 000

Puits de pompage STOLL SA

Zone de l'autoroute

Verdan - parcelles communales concernées

Epaisseur supposée de l'aquifère
- >12m
- entre 6 et 12m
- entre 0 et 6m

- graviers sableux (perméabilité K = 1E-3 m/s)
- sables moyens (perméabilité K = 1E-4 m/s)
- sables fins (perméabilité K = 1E-5 m/s)
- sédiments très peu perméables (perméabilité K < 1E-5 m/s)
- Quaternaire - tourbière
- Quaternaire - ancienne terrasse lacustre
- Quaternaire - cône de déjection
- Quaternaire - alluvions fluvioglaciaires et sédiments lacustres interglaciaires
- Molasse
- Crétacé

Géothermie
Eaux minérales
Dangers naturels
Sites pollués
Alpgeo HYDROGEOLOGIE

0 0.5 1 Km

N

\\serveur\Data-ALPGEO\MANDATS-ACTUELS\1-Puits de pompage\2017-Quartier Verdan Yverdon\SIG\3-Projets\1706 Aquif inf.mxd

Sierra, le 27.06.2017

C98

ANNEXE 5

Routes nationales suisses - Coupe A-A'

ROUTES NATIONALES SUISSES
AUTOROUTE YVERDON-NEUCHATEL N. 5

SECTION 503 COMMUNES DE MONTAGNY ET YVERDON — AR 503-532a

Route d'accès à la Jonction

ETUDE GEOTECHNIQUE

Profil en long KM 1380.0-2525.78

	DATE	VISA	CONTR
-	11.7.77	LB	R.T.
+	6.4.83	LB	R.T.
b			
c			
d			
e			
f			

SCHOFFER & KARAKAS S.A. Ingénieurs conseils Bureau d'études et laboratoire de géotechnique 54 bis Grand-Pré LAUSANNE Tél. (021) 37 41 81

3 — ECHELLE 1:1000 / 100 — FORMAT 1590 x 700

LEGENDE

- Terre végétale + limon tarreux
- Limons de pente et/ou éluvions
- Alluvions morénigènes
- Alluvions essentiellement sableuses
- Alluvions essentiellement graveleuses
- Alluvions glacio-lacustres (sols varvés)
- Moraine
- S.P.T. Standard Pénétration Test (STUMP S.A.) — Symbole de chute: 5 cm de pénétration; Poids du mouton: 63 kg; Hauteur de chute: 75 cm; Pointe: 20.5 cm²
- Venue d'eau
- Niveau piézométrique (période février-avril 1977 et décembre 1982)

a) MODIFICATIONS DU KM 1350 au KM 2190 environ SUR LA BASE DES SONDAGES COMPLEMENTAIRES VV 141, VV 142, VV 143 et VV 144, EXECUTES EN DECEMBRE 1982, AINSI QUE DES OBSERVATIONS FAITES SUR PLACE

TRONÇON N°6 KM 1365.00 env. - KM 2525.78 env.

TRONÇON REMARQUES ET RECOMMANDATIONS POUR L'EXECUTION

C'est la présence d'alluvions morénigènes remaniées au droit des sondages VV 141, VV 143 et VV 144, qui nous permettent d'apporter certaines précisions pour les mesures d'exécution de la tranchée en litige rendu:

1) Eboulement de la forte végétation assez bien stable pour tout le tronçon allant du km 2 220 environ au km 2 525.78 (fin de tronçon).
2) Pour tout le tronçon allant du km 1 365 environ au km 2 190 environ, où les alluvions morénigènes sont remaniées (avec sur la base des sondages supplémentaires ainsi que des observations faites sur place), il est recommandé dans le but d'éviter l'ameublissement des angles de prévoir un remblayage en amont par déversement et compactage ameublissant afin de créer une plate-forme stabilisée. De plus, afin d'éviter la mélange des matériaux d'une part, et d'autre part, dans une moindre mesure de limiter les tassements, du pied d'une talus non stable sera favorable.
3) En relation à la faible hauteur du remblai pour tout le tronçon, la pente admissible des talus pourra être de 2/3, ceci même dans le secteur proche du viaduc où les alluvions morénigènes sont observées.
4) Les tassements prévisibles du sol sous l'effet de la surcharge (sur du remblai) seront minimes, par - prétassement subi pour tout le tronçon allant du km 2 220 environ au km 2 525.78 où les alluvions morénigènes ne se trouvent vraisemblablement pas plus proche, pour tout le secteur précité où elles sont observées et compte tenu de la constance de la hauteur du remblai, ces tassements seront minimes et de l'ordre de quelques centimètres, dus à des consolidations secondaires.
Aussi, dans l'attente d'autres, d'une part, un profil en long optimal puisse être établi, afin d'éviter d'éventuels tassements différentiels, d'autre part, d'éviter une surcharge de remblai dont la hauteur pourra être fixée par la DGEV selon les expériences acquises sur les remblais analogues dans les Préalpes vaudoises.
Finalement, afin de définir le moment de la superstructure, quelles pourra être mesurée, des mesures topographiques devront être effectuées pendant et après les travaux de remblayage.
5) A l'exception des mesures d'usage qui devront être prises pour l'assainissement de la forme de l'infrastructure, le drainage du tout-venant ne s'avère pas nécessaire compte tenu du niveau de la nappe d'eau.

CHAMARD — SEYTOREES — PRE NEUF

Profil en long prévu lors de la réalisation du canal du Rhône au Rhin

COMMUNE DE MONTAGNY / COMMUNE D'YVERDON

Cordon littoral

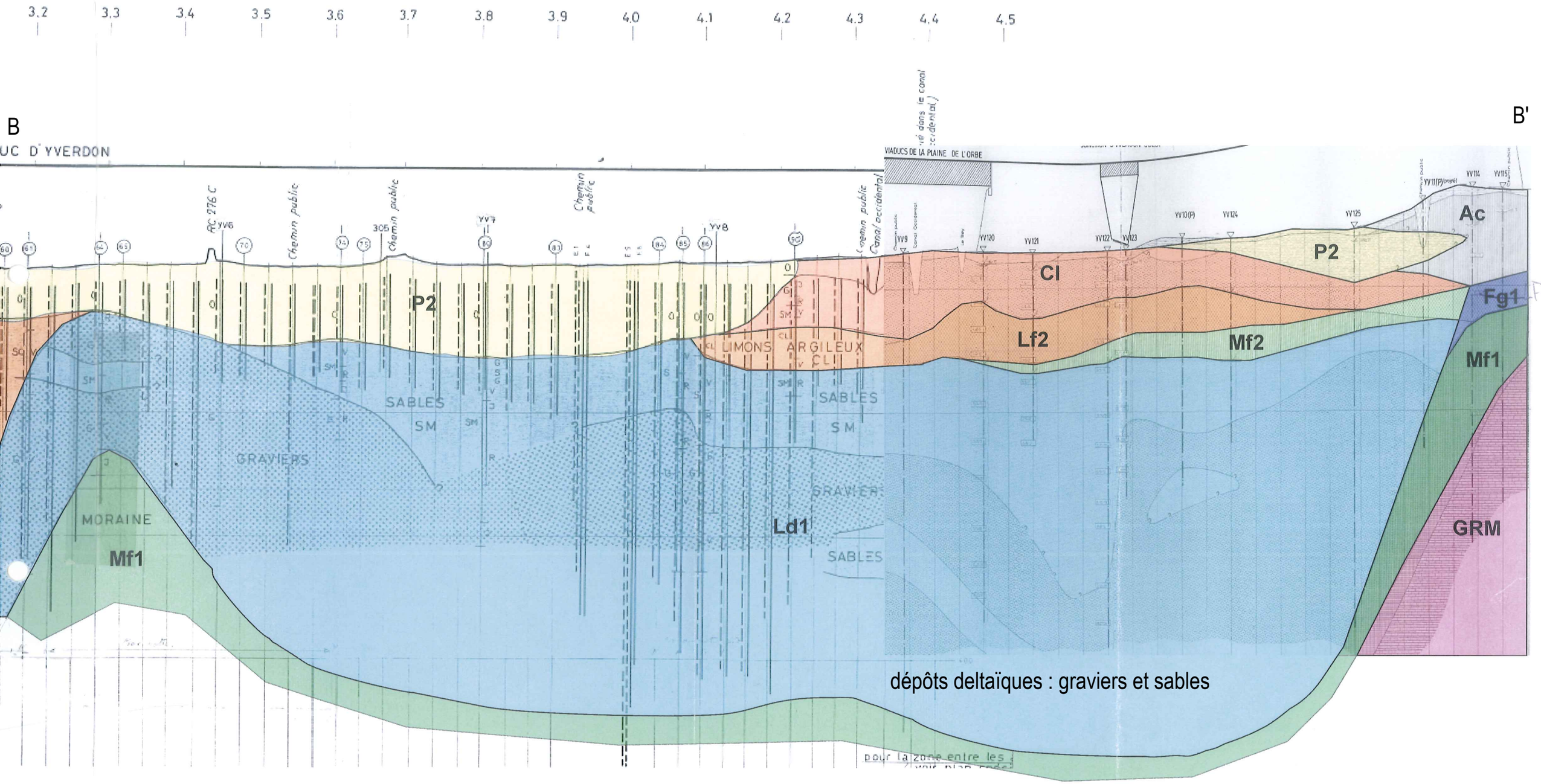
graviers

LD1 LF2 ZD MF2 LD1 NF1

| HORIZON 400 | | |

Routes nationales suisses - Coupe B-B'

ANNEXE 6



Vert. 1:300 ?
Horizont: 1:5000

Alpgeo

ANNEXE 7

Exploitation thermique de la nappe supérieure
Estimation du débit maximum d'un puits unique et de la puissance installée correspondante

				Quartier du Verdan	Zone autoroute
				Forage représentatif : F1(87)	*Forage représentatif : YV9*
Aquifère	Epaisseur	H_0	[m]	6.0	4.5
	Perméabilité	K	[m/s]	5.0E-05	1.0E-03
Puits de pompage	**Débit**	**Q**	**[l/min]**	**25**	**75**
	Diamètre min pompe immergée	D_p min	["]	4 "	4 "
	Diamètre min crépines (interne)	$D_{c\,int}$ min	[mm]	112	112
	Type de crépines *(Entre parenthèses: ouverture fentes)*			PVC 4" 1/2 (1mm)	PVC 4" 1/2 (1mm)
	Diamètre interne de la crépine	$D_{c\,int}$	[mm]	113	113
	Débit au mètre linéaire (valeur théorique)	$Q_{ml\,th}$	[l/min]	50	50
	Réduction $Q_{ml\,th}$ (incrustaion crépines)	α	%	25%	25%
	Débit au mètre linéaire	Q_{ml}	[l/min]	38	38
	Longueur minimale de crépines pour Q	L_c	[m]	1	2
Rabattement Formule de Dupuit nappe libre	Distance où le rabattement est calculé	r	[mm]	0.057	0.057
	Rayon d'action du puits *(estimé)*	R	[m]	100	100
	Rabattement max. acceptable *(selon Castany 1982)*	s_{max}	[m]	2.00	1.50
	Rabattement au puits	**s_{Q}**	**[m]**	**1.98**	**0.34**
Puissance de chauffage équivalente	Chaleur spécifique de l'eau C		[KJ/(kg·K)]	4.187	
	Coefficient de performance PAC (COP)		[-]	4.5	
	Delta °T faible		[°C]	3.0	
	Puissance géothermique	P_g	[kW]	5	16
	Puissance installée (ΔT = 3 °C)	**P_i**	**[kW]**	**7**	**20**
	Equivalents logements	P_{eq}	[-]	1	3
	Delta °T élevé		[°C]	5.0	
	Puissance géothermique	P_g	[kW]	9	26
	Puissance installée (ΔT = 5 °C)	**P_i**	**[kW]**	**11**	**34**
	Equivalents logements	P_{eq}	[-]	2	5
Distance rejet	Gradient hydraulique *(estimé)*	i	[‰]	1.5	1.5
	Distance min puits pour éviter recirculation d'eau	L_{min}	[m]	30	60

Alpgeo

ANNEXE 8

Exploitation thermique de la nappe inférieure
Estimation du débit maximum d'un puits unique et de la puissance installée correspondante

				Quartier du Verdan	Zone de l'autoroute
				Forage représentatif : 368_G S2	*Forage représentatif : YV125*
Aquifère	Charge hydraulique initiale (depuis mur aquifère)	H_0	[m]	28.0	30.0
	Epaisseur aquifère	e	[m]	20.0	22.5
	Perméabilité aquifère (estimée)	K	[m/s]	1.0E-04	1.0E-03
Puits de pompage	**Débit**	**Q**	**[l/min]**	**870**	**8'870**
	Diamètre min pompe immergée	D_p min	["]	6 "	> 10 "
	Diamètre min crépines (interne)	$D_{c\,int}$ min	[mm]	176	> 350
	Type de crépines *(Entre parenthèses: ouverture fentes)*			PVC 8" (1mm)	JOHNSON 30" (2mm)
	Diamètre interne de la crépine	$D_{c\,int}$	[mm]	208	769
	Débit au mètre linéaire (valeur théorique)	$Q_{ml\,th}$	[l/min]	83	1374
	Réduction $Q_{ml\,th}$ (incrustation crépines)	α	%	25%	25%
	Débit au mètre linéaire	Q_{ml}	[l/min]	63	1031
	Longueur minimale de crépines pour Q	L_c	[m]	14	9
Rabattement Formule de Dupuit nappe captive	Distance où le rabattement est calculé	r	[mm]	0.104	0.385
	Rayon d'action du puits *(estimé)*	R	[m]	100	500
	Rabattement max. acceptable *(selon Castany 1982)*	s_{max}	[m]	21.00	22.50
	Rabattement au puits *(Dupuit nappe captive)*	s_0	[m]	7.93	7.50
Puissance de chauffage équivalente	Chaleur spécifique de l'eau C	[KJ/(kg·K)]	4.187		
	Coefficient de performance PAC (COP)	[-]	4.5		
	Delta °T faible	[°C]	3.0		
	Puissance géothermique	P_g	[kW]	182	1'857
	Puissance installée (ΔT = 3 °C)	P_i	[kW]	**234**	**2'387**
	Equivalents logements	P_{eq}	[-]	35	362
	Delta °T élevé	[°C]	5.0		
	Puissance géothermique	P_g	[kW]	304	3'095
	Puissance installée (ΔT = 5 °C)	P_i	[kW]	**390**	**3'979**
	Equivalents logements	P_{eq}	[-]	59	603
Distance rejet	Gradient hydraulique *(estimé)*	i	[‰]	1.5	1.5
	Distance min optimale entre puits pompage/rejet	L_{min}	[m]	350	650

Alpgeo

Données de forage issues du cadastre géologique du canton de Vaud

Nom du forage	Coordonnées	Profondeur [m]	Distance approximative de la zone [m]	Toit du rocher [m]	Géologie générale	Niveau d'eau mesuré [m]	Aquifère supérieur				Aquifère inférieur			
							Type de sédiments	Profondeur [m]	Epaisseur saturée [m]	Perméabilité estimée [m/s]	Type de sédiments	Profondeur [m]	Epaisseur saturée [m]	Perméabilité estimée [m/]
STOLL P1	536699/181979	11.2	2000		alluvions et moraine		graviers sableux	3.1-7.2	4.1	1.00E-03				
STOLL P1	536694/181940	12	2000	11.9	alluvions et moraine		graviers sableux	3.4-9.0	5.6	1.00E-03				
YV9	537445/182054	40	800		alluvions et moraine		graviers sableux	2.0-6.0	4	1.00E-03	sables moyens (inf)	12.0-35.0	23.00	1.00E-04
YV120	537457/182099	30	750		alluvions et moraine	1.2	graviers sableux	1.0-4.0	3	1.00E-03	graviers sableux	17.7-30.0	12.30	1.00E-03
YV121	537443/182163	15	700		alluvions et moraine	1.2	graviers sableux	0.60-5.2	4.6	1.00E-03	sables moyens	9.6-15.0	5.40	1.00E-04
YV122	537457/182258	32	600		dépôts lacustres et delta	1.35	graviers sableux	0.4-3.9	3.5	1.00E-03	sables moyens	10.10-17.2	7.10	1.00E-04
YV124	537426/182369	16.5	600		alluvions et moraine	1.3	graviers sableux	1.10-4.2	3.1	1.00E-03	graviers sableux et sables moyens	7.25-16.5	9.25	1.00E-03
YV125	537422/182546	32.25	700		alluvions et moraine	1	graviers sableux	4.70-6.55	1.85	1.00E-03	graviers sableux	8.5-31.25	22.75	1.00E-03
YV115	537442/182726	22.6	1000	15.9	cône de déjection, dépôts morainiques part remaniés	1.9	graviers sableux avec du limon	0.3-2.7	2.4	1.00E-04				
YV114	537438/182691	28.6	800	20.3	cône de déjection, dépôts morainiques part remaniés	2.9	graviers limoneux et sables moyens graveleux	2.0-5.7	3.70	1.00E-04				
YV131	537785/182310	23.8	300		alluvions glacio-lacustres	3.9	sables moyens	2.1-9.75	7.65	1.00E-04	sables moyens	11.8-17.4	5.60	1.00E-04
YV12	537480/182940	12.4	1200	4.3	limons de pentes et moraine remaniée	4.2	limons et morraine							

ANNEXE 9-a

Alpgeo

Données de forage issues du cadastre géologique du canton de Vaud

Nom du forage	Coordonnées	Profondeur [m]	Distance approximative de la zone [m]	Toit du rocher [m]	Géologie générale	Niveau d'eau mesuré [m]	Aquifère supérieur				Aquifère inférieur			
							Type de sédiments	Profondeur [m]	Epaisseur saturée [m]	Perméabilité estimée [m/s]	Type de sédiments	Profondeur [m]	Epaisseur saturée [m]	Perméabilité estimée [m/]
KR1/P	538006/182254	13.5	50		dépôts lacustres, marais	2.83	sables fins			1.00E-05				
T1	537837/182142	5.5	200		dépôts lacustres et delta	2.92	sables moyens	1.8-5.5	3.7	1.00E-04				
S3 + (S4)	537773/182548	15	450		cône de déjection et dépôt lacustre qques graviers	6	graviers sableux	2.25-3.75	1.5	1.00E-03	graviers sableux et sables moyens	10.45-11.5	1.05	1.00E-03
S2 (Platanes)	538267/182096	12	200		dépôts lacustres	2	sables fins peu limoneux	0.85-8.8	7.95	1.00E-05				
S1 (Platanes	538208/182088	12	200		alluvions lacustres sableuses	2	sables fins peu limoneux	0.5-5.70	5.2	1.00E-05	sables moyens	10.0-20.0	10.00	1.00E-04
S2 KF	537587/182347	20	500		dépôts lacustres et alluvions du cône de déjection	2.48	sables fins à moyens	2.3-7.2	4.9	1.00E-04	sables moyens et graviers sableux	7.7-20.0	12.30	1.00E-04
S1 KF	537519/182351	20	500		dépôts lacustres et alluvions du cône de déjection	2.5	limons graveleux	8.12-8.50	0.38	1.00E-05	limons graveleux	8.9-9.1	0.20	1.00E-05
T20	537940/182300	4	100		dépôts lacustres et delta		sables fins	0.5-4	3.5	1.00E-05				
F1 (87)	537885/181895	10	400		dépôt lacustre et delta	1.1	sables fins avec qques graviers	0.55-7.45	6.9	1.00E-05				
F2 (87)	537901/181803	10.3	400		dépôts lacustre et delta	1.4	sables moyens avec qque graviers	0.85-7.5	6.65	1.00E-05	sables graveleux	8.0-10.3	2.30	1.00E-04

ANNEXE 9-b

Alpgeo

Données de forage issues du cadastre géologique du canton de Vaud

Nom du forage	Coordonnées	Profondeur [m]	Distance approximative de la zone [m]	Toit du rocher [m]	Géologie générale	Niveau d'eau mesuré [m]	Aquifère supérieur				Aquifère inférieur			
							Type de sédiments	Profondeur [m]	Epaisseur saturée [m]	Perméabilité estimée [m/s]	Type de sédiments	Profondeur [m]	Epaisseur saturée [m]	Perméabilité estimée [m/]
229_B S1	538250/181570	124	200		dépôt lacustre et delta	2	sables moyens et qques graviers	12.0-30.0	18.00	1.00E-04	sables moyens	32.0-40.0	4.00	1.00E-04
368_G S2	538230/181905	102	200		dépôt lacustre et delta		sables moyens et qques graviers	10.0-30.0	20.00	1.00E-04	sables moyens	36.0-40.0	4.00	1.00E-04
159B	538395/182045	120	300	116	dépôt lacustre et delta		sables fins graveleux	6.0-10.0	4.00	1.00E-04	sables moyens	18.0-30.0	12.00	1.00E-04
838 (F1)	538421/181995	130	300	118	dépôt lacustre et delta	4	sables moyens limoneux	18.0-30.0	12.00	1.00E-05				
F2	53807/1182785	8	450		cône de déjection et dépôts lacustres		graviers sableux	1.2-4.1	2.90	1.00E-03	sables fins	4.8-8.0	3.20	1.00E-05
563	538350/182430	100	200		dépôt glacio-lacustre		limons argileux et sables fins							
T1-P1	538080/182800	8.5	500		alluvions fluvio-lacustres	4	graviers sableux	2.2-4.4	2.20	1.00E-03				

ANNEXE 9-c

ANNEXE 10

D

S'

S

H'

H

D'

VERDAN

STOLL

ARKINA

NOREAZ

BAINS

CUARNY

TREYCOVAGNES

ESSERTINES

Synclinal d'Yverdon

Synclinal de Champvent

Chev. du Mt Chamblon

Faille du Moulinet

Faille d'Essert

Faille de Chamblon

Anticlinal de Chamblon

Anticlinal de Villars-Epeney

Faille de Cuarny

Synclinal de Cronay

Faille de Suscévaz

Faille d'Ependes

Synclinal d'Epautheyres

Faille du Buron

Faille d'Essertines

Anticlinal d'Essértines - Chêne Pâquier

Faille inverse du Sauterü

Faille inverse de la Mentue - Prahins

Anticlinal du Mormont

AR Conseils
Rte de Chanivaz 1 - 1164 Buchillon
Tél.: 021 807 24 75
E-mail: arconseils@vtx.ch

CARTE STRUCTURALE SIMPLIFIÉE

Anticlinal
Synclinal
Chevauchement
Faille - décrochement

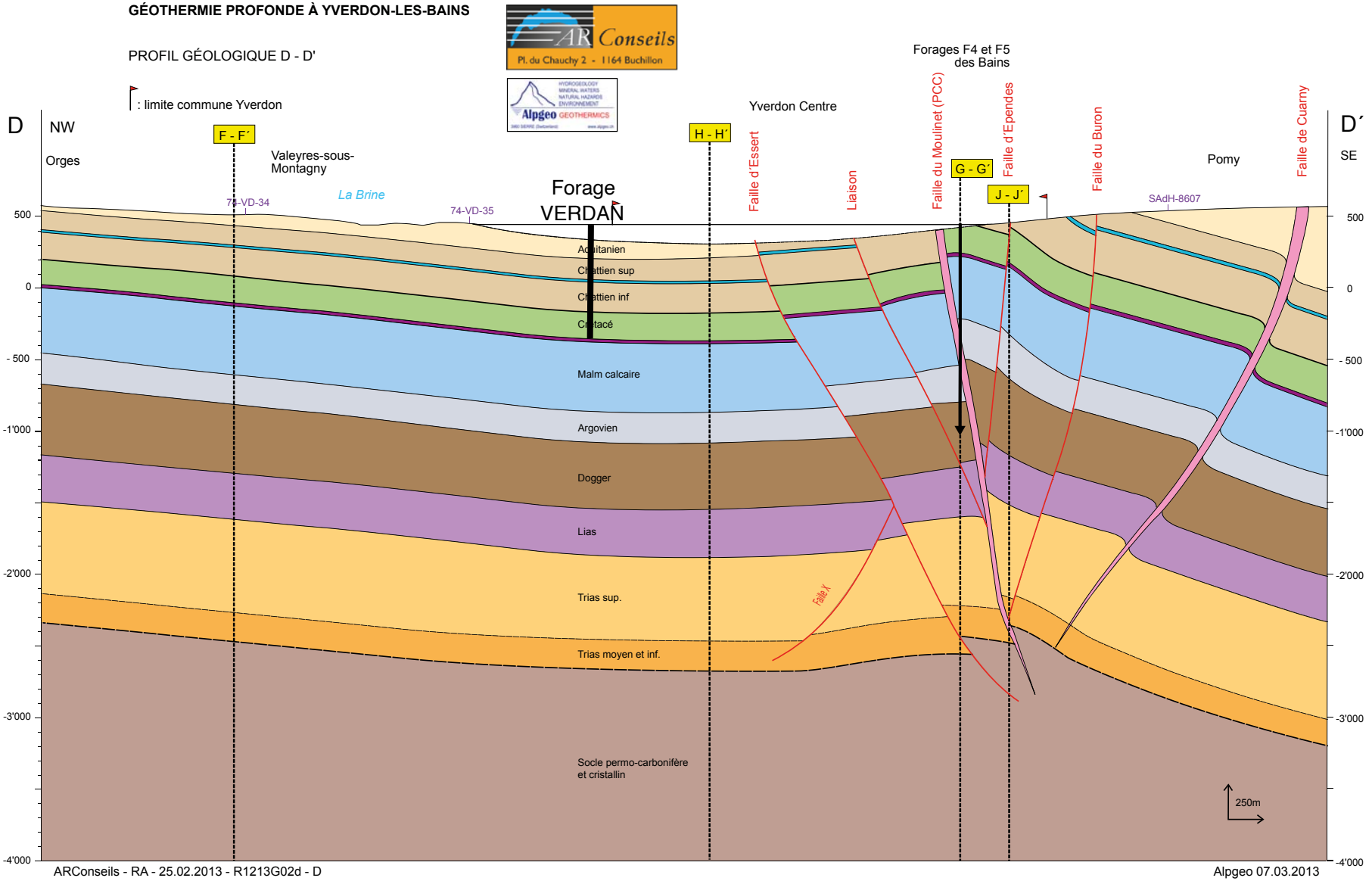
1:50'000

0 0.5 1 2 3 4 Km

N

GÉOTHERMIE PROFONDE À YVERDON-LES-BAINS

PROFIL GÉOLOGIQUE D - D'



ARConseils - RA - 25.02.2013 - R1213G02d - D

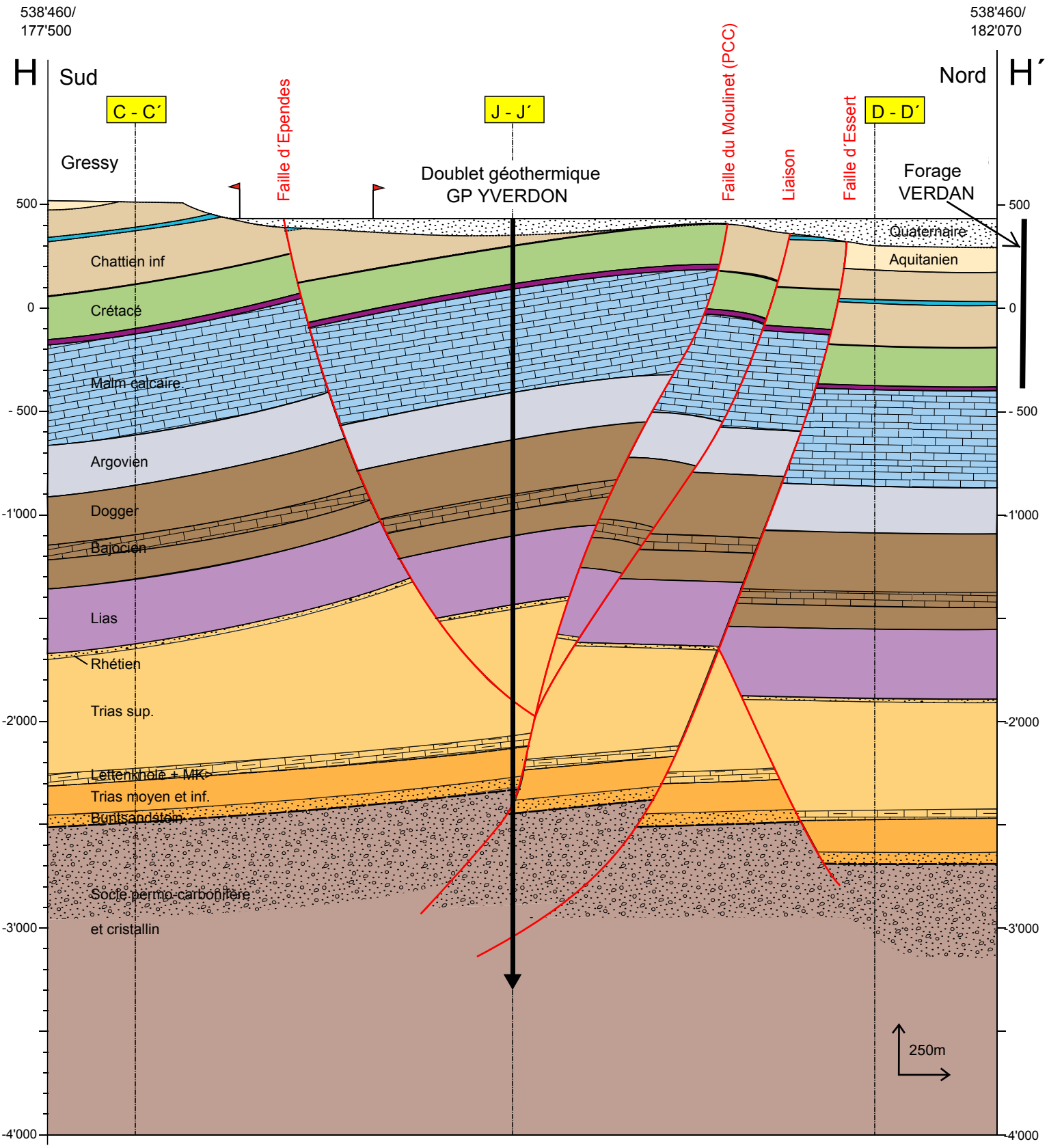
Alpgeo 07.03.2013

GÉOTHERMIE PROFONDE À YVERDON-LES-BAINS

PROFIL GÉOLOGIQUE H - H´

AR Conseils
Pl. du Chauchy 2 - 1164 Buchillon

Alpgeo GEOTHERMICS



TERRE+

MODÉLISATION NUMÉRIQUE ET STRUCTURALE EN SCIENCES DE LA TERRE

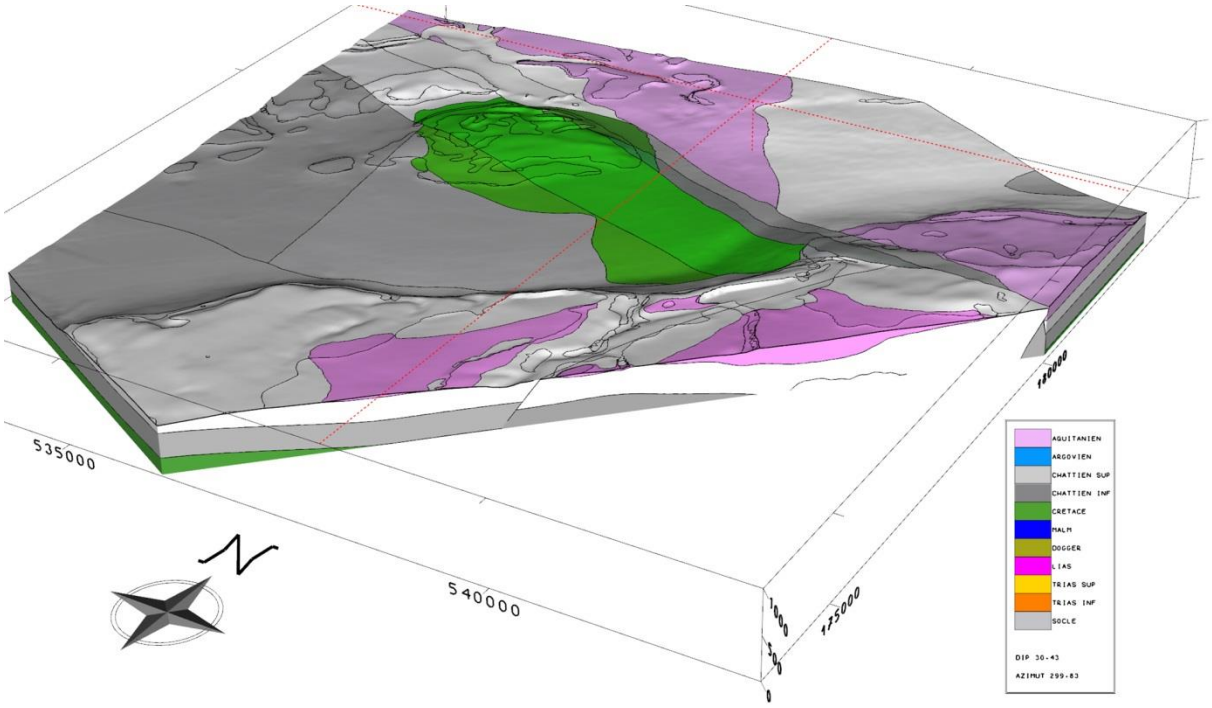
NOTE POUR ALPGEO

EXTRAITS DU MODÈLE GÉOLOGIQUE STRUCTURAL YVERDON AU LIEU-DIT « VERDAN »

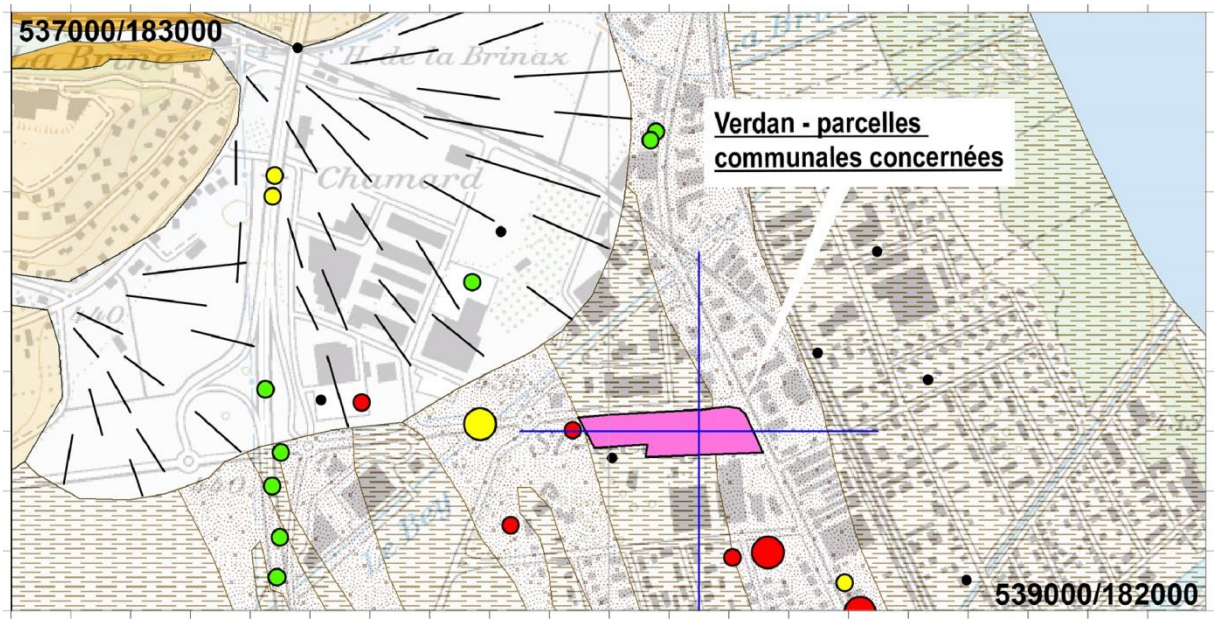
Le 30 juin 2017

Terreplus Sàrl
Chemin de Closel 9
CH – 2022 Bevaix

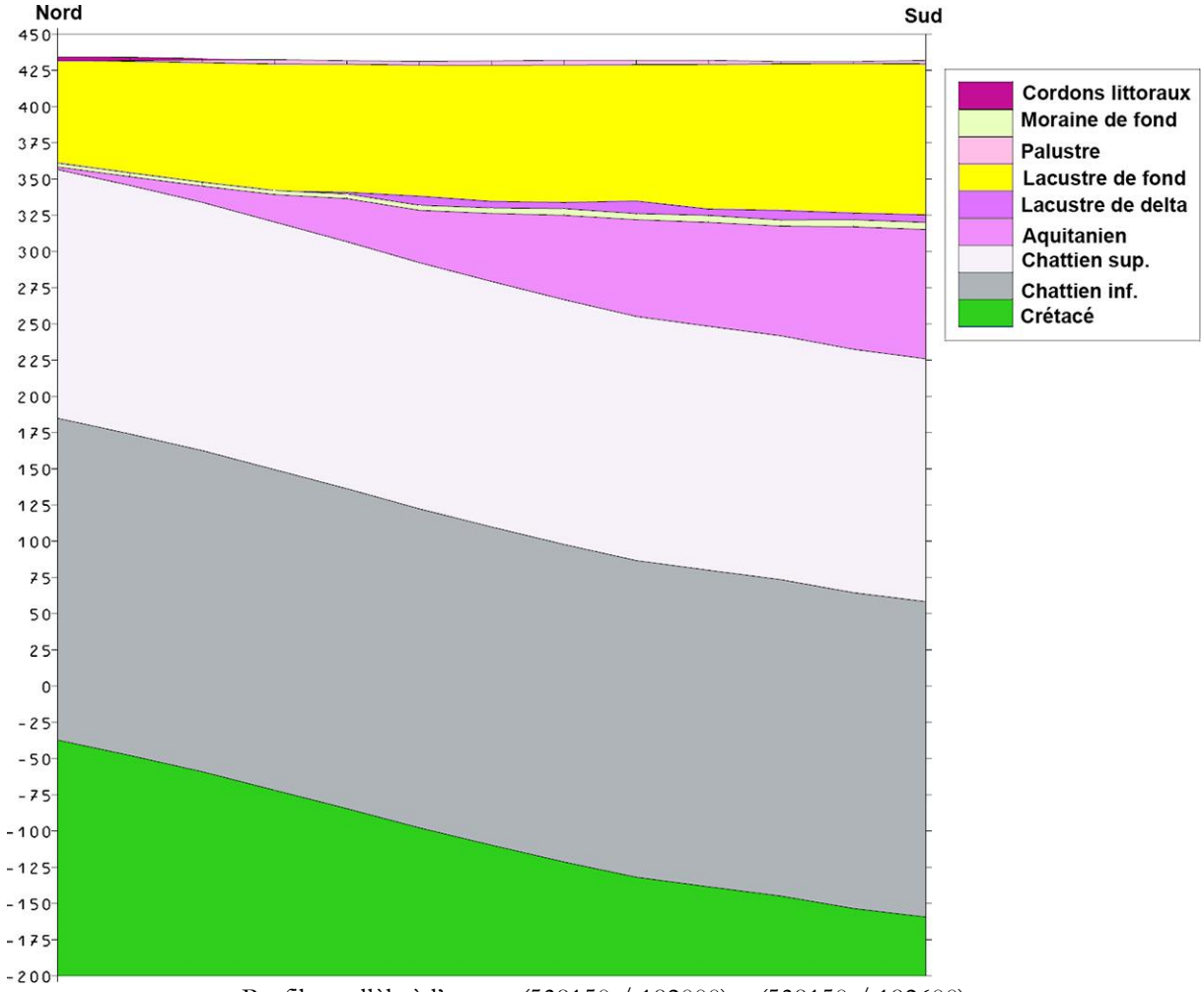
Internet : www.terreplus.ch
e-mail : info@terreplus.ch
Téléphone : (41)(79) 200 85 51



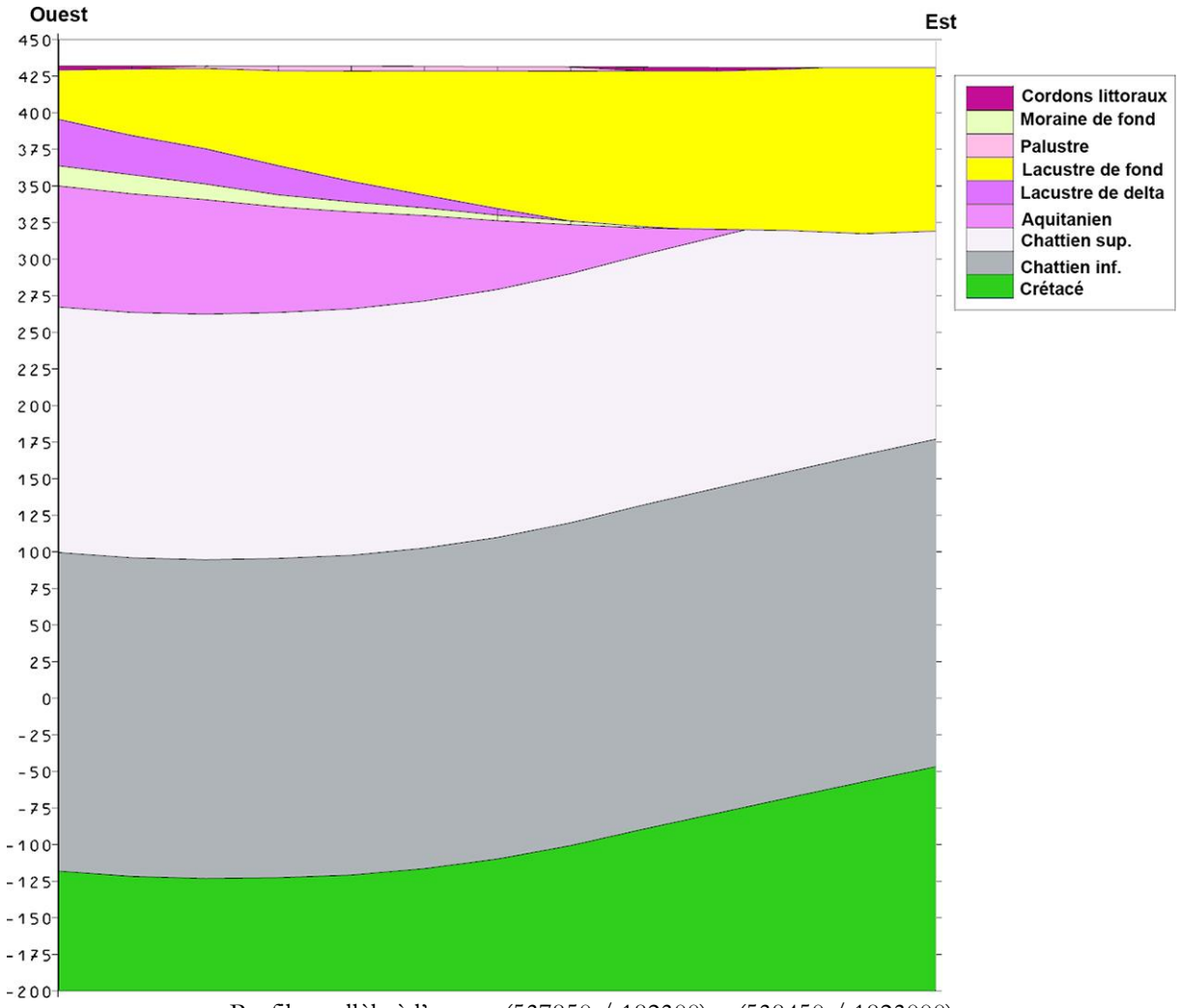
Modèle géologique 3-D limité au toit du rocher. Toutes les formations quaternaires enlevées. Curseur 3-D placé sur la parcelle considérée (538150 / 182300). A cet endroit, le rocher est probablement constitué de molasse aquitanienne, peut-être de Chattien supérieur. En vert, le Crétacé du Chamblon.



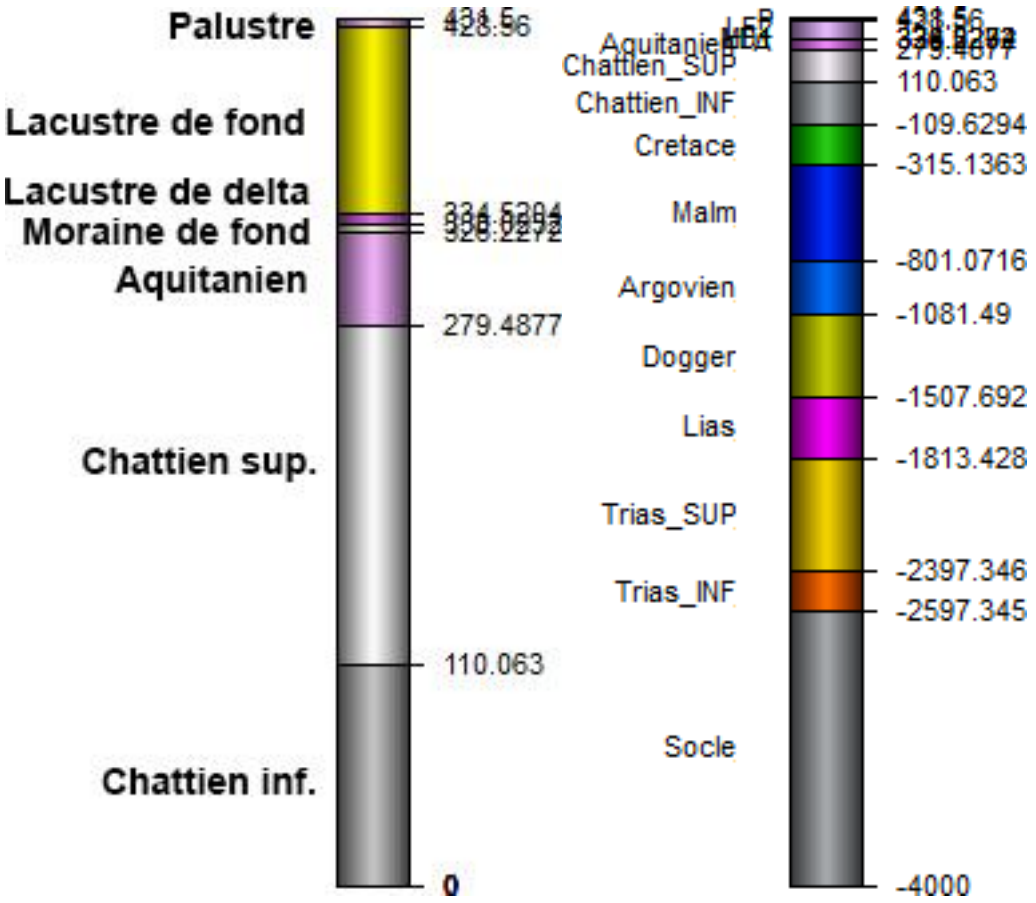
Lignes bleues : Situation des deux profils extraits, chacun long de 600 m et centré autour de (538150 / 182300). Profil selon x : (537850 / 182300) – (538450 / 1823000). Profil selon y : (538150 / 182000) – (538150 / 182600).



Profil parallèle à l'axe y : (538150 / 182000) – (538150 / 182600)



Profil parallèle à l'axe x : (537850 / 182300) – (538450 / 1823000)



Forage virtuel en (538150 / 182300) jusqu'à 0 m s.m., à gauche, et jusqu'à -4000 m s.m., à droite.

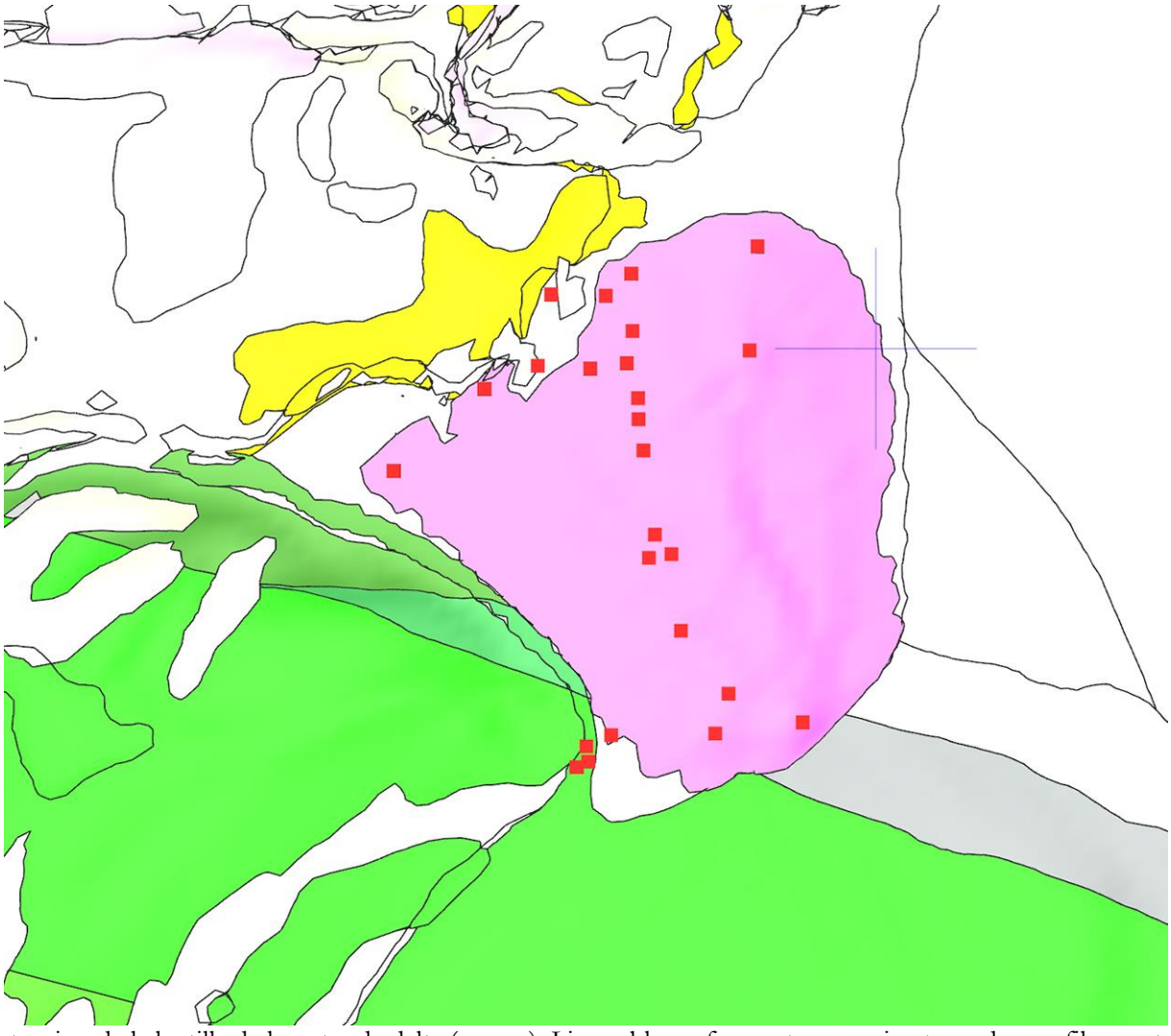
Détail des cotes :

```
Borehole in model file Yverdon15.mod
Coordinates: X = 538150 , Y = 182300


 ELEVATIONS
 ----------
 From 431.5 to 428.56 : Palustre
 From 428.56 to 334.5204 : Lacustre de fond
 From 334.5204 to 330.0232 : Lacustre de delta
 From 330.0232 to 326.2272 : Moraine de fond
 From 326.2272 to 279.4877 : Aquitanien
 From 279.4877 to 110.063 : Chattien_SUP
 From 110.063 to -109.6294 : Chattien_INF
 From -109.6294 to -315.1363 : Cretace
 From -315.1363 to -801.0716 : Malm
 From -801.0716 to -1081.49 : Argovien
 From -1081.49 to -1507.692 : Dogger
 From -1507.692 to -1813.428 : Lias
 From -1813.428 to -2397.346 : Trias_SUP
 From -2397.346 to -2597.345 : Trias_INF
 From -2597.345 to -4000 : Socle
```

```
DEPTH BELOW SURFACE
-------------------
From 0 to 2.940033 : Palustre
From 2.940033 to 96.97958 : Lacustre de fond
From 96.97958 to 101.4768 : Lacustre de delta
From 101.4768 to 105.2728 : Moraine de fond
From 105.2728 to 152.0123 : Aquitanien
From 152.0123 to 321.437 : Chattien_SUP
From 321.437 to 541.1294 : Chattien_INF
From 541.1294 to 746.6362 : Cretace
From 746.6362 to 1232.572 : Malm
From 1232.572 to 1512.99 : Argovien
From 1512.99 to 1939.192 : Dogger
From 1939.192 to 2244.928 : Lias
From 2244.928 to 2828.846 : Trias_SUP
From 2828.846 to 3028.845 : Trias_INF
From 3028.845 to 4431.5 : Socle
```

La seule possible formation aquifère Quaternaire sous la parcelle est le lacustre de delta, mais sa présence est douteuse, la parcelle étant située sur la bordure de cet aquifère, qui est identifié par plusieurs forages:



Extension de la lentille de lacustre de delta (mauve). Lignes bleues formant une croix : trace des profils montrés ci-dessus, longs de 600 m chacun et donnant l'échelle. Carrés rouges : sondages touchant le lacustre de delta. L'aquifère s'étend à l'ouest de la parcelle.

LE 30 JUIN 2017



TERREPLUS SÀRL
DR LAURENT TACHER

- ° o ° -

Yverdon, quartier de Verdan - Projet de géothermie de faible-moyenne profondeur - Production d'énergie thermique averc un doublet

Aquifère : Crétacé avec puits vertical - Compartiment Nord

		Scénario			
Aquifer Permeability		Défavorable	Probable	Favorable	
Temperature at ground surface	°C	10.0	10.0	10.0	Température moyenne annuelle de l'air à Yverdon-les-Bains
Thermal Gradient	°K/km	**36.7**	**35.4**	**30.0**	Gradients géothermiques selon rapport ALPGEO de sept. 2014
Aquifer top depth below ground surface	m	541	541	541	Pris en compte uniquement l'épaisseur des calcaires francs (Barrémien+Hauterivien et Valanginien+ Berriasien)
Aquifer bottom depth below ground surface	m	747	747	747	
Aquifer thickness	**m**	**170**	**170**	**170**	
Expected aquifer temperature TOP Cretaceous	°C	29.9	**29.2**	26.2	Calcul automatique, température au toit de l'aquifère
Expected aquifer temperature Bottom Dogger	°C	37.4	**36.4**	32.4	Calcul automatique, température à la base de l'aquifère
Hydraulic head relativ to ground surface	m	0.0	0.0	0.0	Aquifère artésien, le niveau d'eau remonte jusqu'en surface
Natural hydraulic conductivity	m/s	1.5E-07	7.0E-07	2.5E-06	Données de la litterature pour le Malm (Atlas géoth CH 2007, BKW 2011, Muralt 1999). Pour le Crétacé, prix des valeurs 50% plus faibles
Conductivity enhancement factor (faults)		1.0	1.0	1.5	Pas considéré l'effet positif de zones très fracturées, sauf pour cas favorable
Enhanced hydraulic conductivity	m/s	1.5E-07	7.0E-07	3.8E-06	
Transmissivity	**m^2/s**	**2.6E-05**	**1.2E-04**	**6.4E-04**	
Well drawdown relative to head	m	300	200	75	
Minimum duration of production	years	40	40	40	
Well spacing between extraction and injection well	m	285	487	677	Data proposed
Required minimum well spacing	m	285	487	677	Données calculées par itérations succéssives
Steady-state production rate	m^3/s	**0.006**	**0.018**	**0.034**	Fourchette de débits dans le Bassin munichois (Malm) : **48 - 150 l/s**
	l/s	**6**	**18**	**34**	
Production rate	kg/s	6.0	17.6	34.1	
Injection water break through time	years	40.0	40.1	40.0	Time to produce energy in relation of the well spacing pipe in/on
Temperature loss in wellbore production pipe	°C/1'000 m	2.0	1.5	1.0	
Wellhead fluid temperature	°C	**33**	**32**	**29**	Température moyenne en tête de puits

Hydrogéologie
Eaux minérales
Dangers naturels
Environnement
Alpgeo GEOTHERMIE
Passionnés de géothermie profonde depuis 1987

ANNEXE 14

Hydrogéologie
Eaux minérales
Dangers naturels
Environnement

Alpgeo GEOTHERMIE

ALPGEO Sàrl
Hydrogéologues Conseils

Av. des Alpes 6 CH - 3960 SIERRE
Tél. : 0041 (0)27 456 94 56 www.alpgeo.ch

Quartier de Verdan à Yverdon-les-Bains

Calcul des puissances géothermiques avec doublet exploitant le Crétacé

	Worst case	**Scénario probable**	Best case
DEBIT MOYEN (l/mn)	360	1'080	2'040
DEBIT MOYEN (l/s)	**6.0**	**18.0**	**34.0**
°T 1 (°C)	33.0	32.0	29.0
°T 2 (°C) - Eau potable	5.0	5.0	5.0
Δ°T (°C)	28.0	27.0	24.0
PUISSANCE (kWth)	**703**	**2'034**	**3'416**

Sierre, le 21.07.2017

Hydrogéologie
Eaux minérales
Dangers naturels
Environnement

Alpgeo GEOTHERMIE

ALPGEO Sàrl
Hydrogéologues Conseils

Av. des Alpes 6 CH - 3960 SIERRE
Tél. : 0041 (0)27 456 94 56 www.alpgeo.ch

Quartier de Verdan à Yverdon-les-Bains

Calcul des puissances géothermiques avec sources du Mt Chamblon

	Moulinet Q min	Cossaux Q min	Moulinet Q max	Cossaux Q max
DEBIT MOYEN (l/s)	**19**	**42**	**750**	**90**
°T 1 (°C)	11.9	13.6	8.6	12.3
Δ°T (°C)	5.0	5.0	5.0	5.0
°T 2 (°C) - Eau potable	6.9	8.6	3.6	7.3
PUISSANCE (kWth)	**398**	**879**	**15'698**	**1'884**
		1.3 MWth		**17.6 MWth**

Sierre, le 23.07.2017