



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et  
de la communication DETEC  
**Office fédéral de l'énergie OFEN**  
Recherche énergétique et cleantech

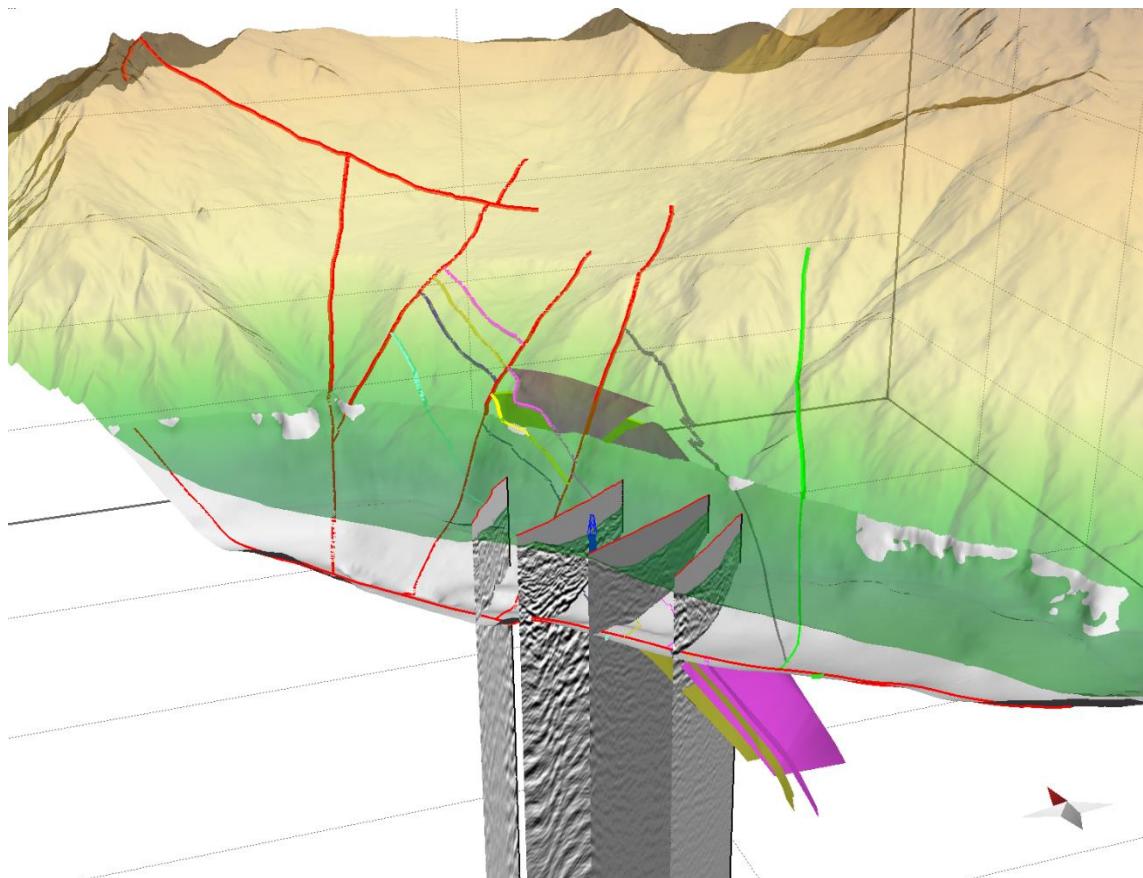
Rapport final du 13.12.2019

---

## Valorisation de la géothermie de moyenne profondeur sur la commune de Bagnes (VS)

### Développement du site de Curala au Châble

---



Représentation du modèle géologique 3D et du toit du rocher sous la topographie.



Date : 13 décembre 2019

Lieu : Berne

**Prestataire de subventions :**

Office fédéral de l'énergie OFEN  
Section Recherche énergétique et cleantech  
CH-3003 Berne  
[www.ofen.admin.ch](http://www.ofen.admin.ch)

**Cofinancement :**

Etat du Valais  
Service de l'énergie et des forces hydrauliques  
CH-1951 Sion  
<https://www.vs.ch/web/sefh>

**Bénéficiaires de la subvention :**

Commune de Bagnes  
Service eaux & énergies  
CH-1934 Le Châble  
[www.altis.swiss](http://www.altis.swiss)

**Auteur(s) :**

Francois Baillifard, Norbert SA, géologie technique & hydrogéologie, [geol-my@norbert-sa.ch](mailto:geol-my@norbert-sa.ch)  
Demian Rickerl, Norbert SA, géologie technique & hydrogéologie, [geol-my@norbert-sa.ch](mailto:geol-my@norbert-sa.ch)  
Stéphane Storelli, commune de Bagnes, service eaux & énergies, [stephane-storelli@altis.swiss](mailto:stephane-storelli@altis.swiss)  
Mario Sartori, [mario.sartori@bluewin.ch](mailto:mario.sartori@bluewin.ch)  
Gabriele Bianchetti, ALPGEO Sàrl, [bianchetti@alpgeo.ch](mailto:bianchetti@alpgeo.ch)

**Suivi du projet à l'OFEN :**

**Responsable de domaine OFEN :** Gunter Siddiqi, [gunter.siddiqi@bfe.admin.ch](mailto:gunter.siddiqi@bfe.admin.ch)  
**Chef de programme de l'OFEN :** Céline Weber, [cweber@focus-e.ch](mailto:cweber@focus-e.ch)

**Numéro du contrat de l'OFEN :** SI/501777-01

**Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.**



## Zusammenfassung

Der Standort Curala befindet sich an der geografischen Kreuzung des Val de Bagnes zwischen Verbier, „Les Mayens de Bruson“ und das Hochtal von Bagnes. Ein neuer Quartierplan in der Umgebung seiner Bahnhöfe (Eisenbahn, Strasse und Gondel) ist vorgesehen. Das Projekt besteht aus der Schaffung eines Raums, der ein Hotelangebot, Aktivitäts- und Wohnräume zusammenfasst.

Das vorgesehene Energiekonzept sieht den Bau eines Energiekreislaufs und einer Wärmepumpe in jedem Gebäude vor. Der Gesamtwärmebedarf wird auf 500 bis 1.000 kW<sub>th</sub> geschätzt. Die Nutzung der geothermischen Energie des Grundwassers, das im gebrochenen Felsuntergrund des Val de Bagnes zirkuliert, scheint die ideale Lösung zu sein.

Das geothermische Potenzial wurde im Jahr 2012 vom Büro ALPGEO Sàrl bewertet. Vier Arten von geothermischen Ressourcen wurden untersucht: Geothermische Sonden, Grundwasser, mittlerer Tiefe bis ca. 500 m Tiefe Grundwasserleiter und tiefe Grundwasserleiter (> 3 km). In zwei hydrothermalen Systemen wurden Sondierbohrungen bis zu einer Tiefe von 375 m durchgeführt. Das subthermale System von „Grangerets“ zeigte die überzeugenden Ergebnisse. Die lokalen geologischen und hydrogeologischen Kenntnisse mussten noch nach diesen Untersuchungen verbessert werden und was die vorliegende Studie rechtfertigt.

Eine seismische Reflexionskampagne wurde durchgeführt. Das Hauptziel war die Klärung der Geometrie der Grenzfläche zwischen quaternären Sedimenten und das Gestein im Untergrund des Trogtales. Vier Querprofilen wurden erfasst. Dank der SMA-1 Bohrung konnten seismische Reflektoren festgestellt werden. Der felsige Untergrund ist auf den vier Profilen klarzusehen. Ein Grundgebirgsmodell wurde damit erstellt die die außergewöhnliche Dicke der Sedimentschicht in diesem Sektor, die vor Le Châble mehr als 400 m beträgt, bestätigt.

Das Val de Bagnes zwischen Le Châble und Lourtier weist eine besondere tektonische Komplexität auf, die zu nicht zylindrischen Geometrien in den Einheiten des unteren und mittleren Pennic führt. Die wichtigsten geologischen Daten der Region bestehen aus dem Blatt 1325 Sembrancher des Geologischen Atlas 1:25.000 (AG25). Die Studie ermöglichte die Erstellung von Zwei Strukturmodellen, die sich auf unterschiedlichen Hypothesen basierten. Aufgrund zusätzlicher Feldbeobachtungen wurde eines dieser Modelle als Grundlage gewählt. 11 gekreuzten geologischen Querschnitten somit einen tektonischen Schnittblatt wurden gezeichnet. Sie ermöglichen die Erstellung eines geologischen 3D-Modells mit der Software Move. Die verschiedenen geologischen Produkte (tektonischer Schnitt und Querprofile) sind hier geschätzt und wenn nötig, korrigiert. Der Vorteil von 3D besteht darin, dass geometrische Unsicherheiten hervorgehoben sind und dass ein kohärentes und solides regionales Strukturmodell unterstützt werden kann. Unsicherheiten, die dem geologischen Kontext inhärent sind, wirken sich immer noch auf die genaue Position bestimmter Kontakte aus, die unten den quaternären Gebieten verborgen sind.

Um die Herkunft des Grundwassers zu klären und die hydrothermalen Systeme des Val de Bagnes besser zu identifizieren, mussten zunächst alle verfügbaren hydrochemischen Daten zusammengestellt und bestätigt werden. Die Wassertypen wurden nach der Verteilung der Hauptionen charakterisiert. Die Beziehungen zwischen Grundwasserleitern wurden auf der Grundlage von Mischlinien hergestellt. Dazu wurden einige Grundwasserleiter durch Sulfat Isotopen unterschieden (<sup>18</sup>O und <sup>34</sup>S). Auf diese Weise wurden sechs hydrochemische Typologien identifiziert.

Ein konzeptionelles Modell, das das geologische 3D-Modell und die Hydrogeologie kombiniert, ermöglichte die Zuordnung chemischer Wassertypologien zu unterschiedlichen Grundwasserleitern:



- Zwei Grundwasserleiter sind zu quaternären Sedimenten verbunden (Alluvien der Dranse und tiefes Fluvioglazial ablagerungen);
- Zwei Grundwasserleiter sind mit den Lithologien der "Median Triassic" (Quarzite und Gips) assoziiert;
- Zwei Grundwasserleiter sind der regionalen Störungszone zugeordnet;
- Zwei Grundwasserleiter sind mit tektonischen internen Einheiten verbunden (Grundwasserleiter von Ruitor und Siviez-Mischabel).

Diese Grundwasserleiter sind potenzielle Ziele für die geothermische Nutzung.

Diese Studie beleuchtet die überraschende Vielfalt der Grundwasserleiter im Val de Bagnes sowie die relativ hohen Temperaturen im Vergleich zum geothermischen Gefälle, das im alpinen Kontext niedriger angenommen wird. Dies deutet auf eine hydraulische Tiefenkontinuität bei den stehenden hydrothermischen Systemen, die unter Druck liegen. Es setzt voraus eins starken gebrochenen Grundgebirges durch die vermuteten regionalen Verwerfungen und deren Schadenszone.

Zwei Standorte wurden vorgeschlagen und bewertet unter Berücksichtigung der Merkmale der definierten geothermischen Ziele sowie verschiedener projektbezogener Kriterien wie der Nähe zu künftigen Nutzern und des geothermischen Potenzials werden zwei Standorte vorgeschlagen und bewertet:

- Der Standort "Prarreyer Nord" zeigt die besten Energieprognosen und die beste Zuverlässigkeit am Zielort. Andererseits entstehen durch die Entfernung zu künftigen Nutzern zusätzliche Kosten für die Bereitstellung von Thermalwasser.
- Der zweite Standort, "Les abattoirs", befindet sich näher an potenziellen Nutzern. Es ist jedoch mit größeren Unsicherheiten in Bezug auf die genaue Position der Ziele und Wasserchemie verbunden, die zu einer Verkrustung der PAC und geringeren erwarteten Abflussmenge führen kann.

Die Potenziale und Risiken, die zu den vorgeschlagenen Standorten verbunden sind, müssen bei der Auswahl der geothermischen Ziele, des Standorts und des Grundstücks berücksichtigt werden. Aus diesem Grund ist es für die Planung und Gestaltung einer Betriebsbohrung noch zu früh.

Die folgenden Schritte werden daher darin bestehen, genau den günstigsten Standort für den Betriebsbohrung zu wählen. Eine Machbarkeitsstudie muss durchgeführt werden, um die Vorbereitung eines soliden Projekts zu ermöglichen. Die Kosten für Erforschung- / Betriebsbohrungen müssen quantifiziert und die Finanzierung gefunden werden.

## Résumé

Le site de Curala est situé au carrefour géographique du Val de Bagnes entre Verbier, les Mayens de Bruson et le haut Val de Bagnes. Un secteur autour de ses gares (ferroviaire, routière et télécabine) fait ainsi l'objet d'un nouveau plan de quartier. Le projet consiste en la réalisation d'un espace regroupant une offre hôtelière, des surfaces d'activités et des logements. Le concept énergétique envisagé prévoit la construction d'une boucle anergie et une pompe à chaleur dans chaque immeuble. Les besoins thermiques globaux sont estimés entre 500 à 1'000 kW<sub>th</sub>. L'exploitation de la géothermie des eaux souterraines circulant dans le soubassement rocheux fracturé du Val de Bagnes apparaît comme la solution idéale.



Le potentiel géothermique a été évalué en 2012 par le bureau ALPGEO Sàrl. Quatre types de ressources géothermales ont été étudiées : sondes géothermiques, nappes phréatiques, aquifères de moyenne profondeur jusqu'à env. 500 m de profondeur et aquifères profonds (>3 km). Des forages de reconnaissances jusqu'à 375 m de profondeur ont été réalisés dans deux systèmes hydrothermaux. Celui des Grangerets a montré les résultats les plus concluants. Suite à ces investigations, les connaissances géologiques et hydrogéologiques locales devaient néanmoins être améliorées, ce qui justifie la présente étude.

Une campagne de sismique réflexion a été menée sur quatre profils perpendiculaires à la vallée. Le but principal consistait à préciser la géométrie de l'interface sédiments quaternaires – rocher au fond de l'auge glaciaire. Grâce au forage SMA-1, qui a servi à caler les réflecteurs sismiques, le toit du substratum rocheux a pu être clairement défini sur les quatre profils, permettant la construction d'un modèle du toit du rocher fiable. Ce modèle confirme l'épaisseur exceptionnelle du remplissage sédimentaire dans ce secteur qui atteint plus de 400 m au droit du Châble.

Le Val de Bagnes, entre le Châble et Lourtier, présente une complexité tectonique particulière qui conduit à des géométries non cylindriques dans les unités du Pennique inférieur et moyen. La feuille 1325 Sembrancher de l'Atlas Géologique 1:25'000 (AG25) représente la principale donnée géologique de la région. L'étude a permis d'établir deux modèles structuraux basés sur des hypothèses différentes et documentées par des cartes d'écorthé tectonique. Sur la base d'observations de terrain complémentaires, un de ces modèles a été choisi et a servi de base à la réalisation de 11 coupes géologiques croisées. Elles ont permis la construction d'un modèle géologique 3D à l'aide du logiciel Move. Ce dernier a permis de confronter les différents produits géologiques (écorthé tectonique et coupes). La 3D a comme avantage de pointer les incertitudes géométriques et de soutenir un modèle structural régional cohérent et solide. Des incertitudes inhérentes au contexte géologique pèsent malgré tout sur la position exacte de certains contacts cachés par les terrains quaternaires.

Pour préciser l'origine des eaux souterraines et mieux identifier les systèmes hydrothermaux du Val de Bagnes, il a fallu d'abord compiler et valider toutes les données hydrochimiques disponibles. Les types d'eaux ont été caractérisés en fonction de la répartition des ions majeurs. Des relations entre les aquifères ont été établies sur la base de droites de mélanges. De plus, certains aquifères ont été différenciés en fonction des isotopes des sulfates ( $^{18}\text{O}$  et  $^{34}\text{S}$ ). De cette manière, six typologies hydrochimiques ont été identifiées.

Un modèle conceptuel, combinant le modèle géologique 3D et l'hydrogéologie, a permis l'association des typologies chimiques des eaux à des aquifères distincts :

- Deux aquifères sont inscrits dans les sédiments quaternaires (alluvions de la Dranse et fluvioglaciaire profond) ;
- Deux aquifères sont associés aux lithologies du « Trias médian » (quartzites et gypse) ;
- Deux aquifères sont associées aux zones de dégâts de failles régionales ;
- Deux aquifères sont associés aux unités tectoniques en position plus interne (nappes du Ruitor et de Siviez-Mischabel).

Ces aquifères représentent tous des cibles potentielles pour une exploitation géothermale.

Cette étude met en évidence la variété surprenante des aquifères du soubassement rocheux du Val de Bagnes, ainsi que les températures relativement élevées par rapport au gradient géothermique supposé être inférieur à la normale en contexte alpin. Ceci indique une continuité hydraulique en profondeur avec des systèmes hydrothermaux en pression, qui présuppose l'existence de zones de dégâts dues à la fracturation intense du soubassement rocheux par les failles régionales.



En considérant les caractéristiques des cibles définies ainsi que différents critères liés au projet, tels que la proximité aux futurs utilisateurs et le potentiel géothermique, deux sites sont proposés et évalués :

- Le site de « Prarreyer Nord » montre les meilleures prévisions énergétiques et la meilleure fiabilité sur la localisation des cibles. En revanche, sa distance aux futurs utilisateurs engendrera des coûts supplémentaires liés à l'acheminement de l'eau thermale.
- Le second site, « Abattoirs », est situés plus près des utilisateurs potentiels. Il présente cependant des incertitudes plus grandes sur la position exacte des cibles, une chimie des eaux qui pourrait mener à l'encrustement des échangeurs à l'entrée des PAC et des débits attendus plus faibles.

Le choix des cibles, du site et de la parcelle qui accueillera le futur forage devra compter sur les potentiels et les risques liés à chacune des options proposées. C'est pourquoi il est actuellement encore trop tôt pour le dimensionnement et le design d'un forage d'exploitation.

Les étapes suivantes consisteront donc à choisir précisément le site le plus favorable pour l'implantation d'un futur forage. Une étude de faisabilité devra être réalisée pour permettre d'établir son design et la préparation d'un projet solide accompagné d'un concept énergétique adapté. Les coûts d'un forage d'exploration/exploitation seront alors chiffrés et des financements recherchés.

## Summary

The area of Curala is located at the geographical crossroads of the Bagnes valley, between Verbier, the Mayens de Bruson and the upper Val de Bagnes. A sector located near the railway-, bus- and cable car stations is therefore subject to a new neighborhood plan. The project consists in creating a space bringing together a hotel offer, activity areas and accommodations. The energy concept provides an energy loop, coupled with a heat pump in each building.

The overall thermal requirements are estimated to reach 500 to 1,000 kWth. Exploiting the geothermal energy of the groundwater circulating in the fractured bedrock of the Val de Bagnes appears to be the ideal solution.

This geothermal potential was assessed in 2012 by ALPGEO Sàrl. Four different types of geothermal resources have been studied: 1) borehole heat pumps, 2) groundwater, 3) aquifers with depth up to approx. 500 m, and 4) deep seated aquifers (> 3 km). Up to 375 m-long exploration drillings were carried out in two hydrothermal systems. The one of "Les Grangerets" showed the most conclusive results. However, following these investigations, local geological and hydrogeological knowledge had still to be improved, which justifies the present study.

A seismic reflection campaign was conducted on four cross-sections perpendicular to the valley. The main goal was to clarify the geometry of the interface between the quaternary sediments and the bedrock at the bottom of the glacier-ploughed trough. The SMA-1 borehole allowed to match the seismic reflectors and the effective top of the bedrock, making it possible to build a reliable model of the top of the bedrock. This model confirms the exceptional thickness of the sedimentary cover in this sector, which is more than 400 m thick at Le Châble.

From the tectonic point of view, the Bagnes valley between Le Châble and Lourtier presents a particular complexity, which leads to non-cylindrical geometries of the lower- and middle- Penninic units. The sheet nr. 1325 "Sembrancher" of the Geological Atlas 1: 25,000 (AG25) represents the main geological source data for the region. The study allowed to establish two different structural models, based on different assumptions and documented by tectonic maps. Additional field observations



allowed to choose one of these models to realize of 11 combined geological cross-sections. Based on these data, a 3D geological model was constructed using the software "Move", making it then possible to confront different geological products, as tectonic sketches and cross-sections. The benefits of the 3D-model are both to highlight geometrical uncertainties, and to support a coherent and solid regional structural model. Nevertheless, uncertainties inherent in the geological context still weight on the exact position of certain contacts, hidden by quaternary deposits.

In order to precise the origin of groundwater and better identify the various hydrothermal systems of the Bagnes valley, all available hydrochemical data were compiled and validated. Different types of water have been characterized by the distribution of their major ions. Relations between aquifers have been established based on mixing ratios. In addition, some aquifers have been distinguished by their isotopes  $^{18}\text{O}$  and  $^{34}\text{S}$  isotope content. Thus, six different hydrochemical typologies have been identified. A conceptual model was created, combining 3D geological model and hydrogeological data, and making it possible to associate chemical typologies of water to distinct aquifers:

- Two aquifers are located within the quaternary sediments (alluviums of the Dranse river and deep glaciofluvial sediments);
- Two aquifers are associated with lithologies of the "Median Triassic" (quartzites and gypsum);
- Two aquifers are associated with the damage zone surrounding regional faults;
- Two aquifers are associated with more internal tectonic units (Ruitor- and Siviez-Mischabel nappe).

All these aquifers represent potential targets for a geothermal exploitation.

This study highlights both the surprisingly high variety of aquifers located within the bedrock the Bagnes valley, and their relatively high temperatures compared to the geothermal gradient, assumed to be lower than typical in the Alpine context. This indicates a hydraulic continuity at depth of these aquifers with hydrothermal systems under pressure and presupposes an intense fracturing of the bedrock by regional faults and by their associated damage zones.

By considering the characteristics of the highlighted targets and the various criteria dictated by the project, such as the vicinity of future users and geothermal potential, two sites are proposed and evaluated:

- The site of "Prarreyer Nord" shows the better forecast in terms of energy and the better reliability in terms of the location of the targets. On the other hand, its distance from future users will generate additional costs linked to the supply of thermal water.
- The site of "les abattoirs" is located closer to potential users. However, it presents greater uncertainties about the exact position of the targets, as well as about the water chemistry that could lead to crusting of heat pumps and lower expected flows.

The final choice of targets, site and plot that will host the drilling requires an evaluation of opportunities and risks inherent to each of the options proposed. It is therefore too early for dimensioning and designing an exploitation borehole.

Thus, the following steps will consist in choosing precisely the most favorable site for the installation of a borehole. A feasibility study should be carried out to prepare a solid project. The costs of an exploration / exploitation borehole will have to be assessed and the necessary funding should be found.



## Take-home messages

- La 3D s'avère un outil précieux dans la validation des modèles géologiques régionaux, permet la confrontation des données et révèle les incertitudes géométriques.
- Les connaissances géologiques et hydrogéologiques locales approfondies sont indispensables à la caractérisation des ressources géothermiques.
- L'interprétation des données hydrochimiques permet de mettre en évidence plusieurs typologies chimiques différentes, liées à des systèmes hydrothermaux distincts.
- Un modèle conceptuel englobant la géologie, l'hydrogéologie et la géothermie permet de définir des cibles suffisamment précises pour proposer des sites d'exploitation.



# Table des matières

<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>3</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>4</b>
<b>Summary .....</b>	<b>6</b>
<b>Take-home messages .....</b>	<b>8</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>9</b>
<b>Liste des abréviations.....</b>	<b>11</b>
<b>1      Introduction.....</b>	<b>12</b>
1.1    Contexte et arrière-plan.....	13
1.2    Justification du projet.....	14
1.3    Objectifs du projet.....	15
<b>2      Situation initiale.....</b>	<b>15</b>
2.1    Etat de l'art.....	15
2.2    Connaissances fondamentales sur les ressources géothermique.....	17
2.3    Connaissances géologiques locales .....	17
2.4    Connaissances hydrogéologiques locales .....	18
2.4.1    Sources subthermales : .....	19
2.4.2    Forages de reconnaissance géothermique.....	20
2.4.3    Piézomètres dans la nappe phréatique de la Dranse .....	23
2.4.4    Synthèse des connaissances hydrogéologiques avant la présente étude .....	24
<b>3      Approche et méthode.....</b>	<b>26</b>
3.1    Bibliographie .....	26
3.2    Collecte et traitement de données de forages.....	26
3.3    Géophysique.....	27
3.4    Géologie structurale .....	28
3.5    Hydrogéologie et hydrochimie .....	31
<b>4      Résultats et commentaires.....</b>	<b>31</b>
4.1    Géophysique et toit du rocher .....	31
4.1.1    Traitement des données de forages .....	31
4.1.2    Campagne de géophysique .....	32
4.1.3    Modèle du toit du rocher .....	35
4.2    Résultat des observations sur le terrain .....	38
4.3    Ecorché tectonique .....	40
4.4    Coupes géologiques .....	41
4.5    Modèle géologique 3D.....	44
4.6    Hydrochimie, origine des eaux souterraines et types d'aquifères .....	46
<b>5      Modèle conceptuel .....</b>	<b>50</b>



5.1	Types d'aquifères .....	50
5.2	Modèle géothermal conceptuel .....	53
<b>6</b>	<b>Cibles aquifères.....</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>Choix des sites et prévisions énergétiques .....</b>	<b>55</b>
7.1	Sites pour atteindre les cibles aquifères.....	55
7.2	Prévisions énergétiques .....	57
7.3	Évaluation des sites.....	58
7.4	Prévision pour le site Prarreyer N.....	59
<b>8</b>	<b>Conclusions et résumé .....</b>	<b>60</b>
<b>9</b>	<b>Aperçu et mise en œuvre prochaine .....</b>	<b>62</b>
<b>10</b>	<b>Bibliographie.....</b>	<b>63</b>
<b>11</b>	<b>Annexes.....</b>	<b>64</b>



## Liste des abréviations

OFEN	Office Fédéral de l'Energie
SEFH	Service de l'Energie et des Forces Hydrauliques de l'Etat du Valais
CHYN	Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel
PAC	Pompe à chaleur
ZH	Zone Houillère
Subthermal	Températures de l'eau comprises entre 12 et 20°C
Thermal	Températures de l'eau > 20°C



# 1 Introduction

Le soubassement rocheux du Val de Bagnes est occupé par deux systèmes hydrothermaux profonds, dont les exutoires respectifs, les sources subthermales des Grangerets et du Châtelard, sont situés en rive droite de la Dranse, au NE du Châble, respectivement de Prarreyer (Figure 1). Le système des Grangerets – situé dans des roches triasiques fracturées et aquifères "pincées" entre des roches schisteuses peu perméables appartenant au Carbonifère de la Zone Houillère, apparaît comme le plus prometteur en termes de puissance thermique qui pourrait être fournie, en raison de débits plus importants pour des gammes de température comparables.

Les études et forages de reconnaissance réalisées jusqu'ici ont montré que ce système hydrothermal se situe sous près de 300 m de sédiments meubles quaternaires. Un forage de l'ordre de 400 m de profondeur permettrait l'exploitation de cet aquifère karstique avec un débit de 500 à 800 l/min et des températures situées entre 17 et 21°C (ALPGEO 2015-a). Le potentiel géothermique correspondant a été évalué à 570 – 1'200 kW<sub>th</sub>.

En fonction de l'inclinaison de la couche aquifère, la profondeur de la cible – et par conséquent les débits, la température de l'eau et le potentiel géothermique – pourraient être revus à la hausse.

Dans ce cadre, le présent projet prévoit de préciser la géométrie de la couche aquifère triasique à l'aide de profils sismiques et d'une modélisation 3D du sous-sol, en vue d'optimiser les caractéristiques – et de ce fait les coûts – d'un futur forage de reconnaissance.

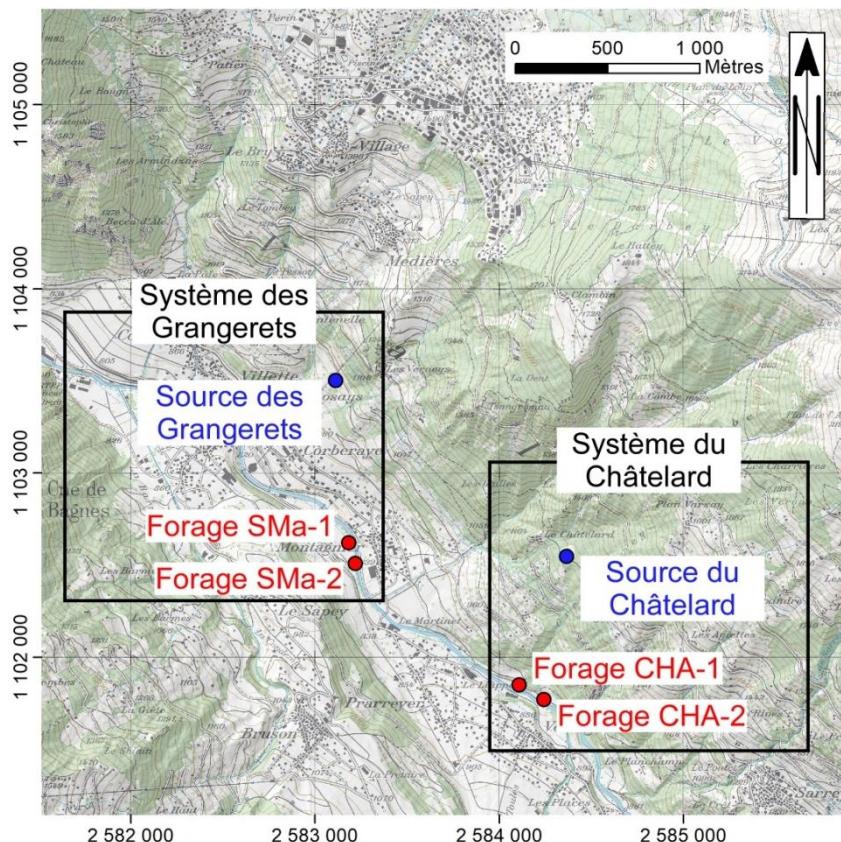


Figure 1 : Situation des systèmes hydrothermaux profonds de la vallée de Bagnes.



## 1.1 Contexte et arrière-plan

Le site de Curala est situé au carrefour géographique du Val de Bagnes entre Verbier, les Mayens de Bruson et le haut Val de Bagnes. Un secteur autour de la place de Curala et de ses gares (ferroviaires, routière et de télécabine) fait ainsi l'objet d'un plan de quartier. Le projet consiste en la réalisation d'un espace regroupant une offre hôtelière, des surfaces d'activités et des logements. Ce programme privé s'inscrit dans une requalification globale du site où les infrastructures publiques sont étudiées et réalisées par la Commune de Bagnes. Sur ce périmètre de quelque 6,7 hectares (Figure 2), la Commune souhaite réaliser le programme privé suivant :

- Hôtellerie : deux projets hôteliers sont prévus. Le premier consiste en un hôtel d'environ 100 chambres de catégorie 2 étoiles destiné principalement à une clientèle jeune, familiale, à la recherche d'activités sportives telles que le VTT, le ski de randonnée, le ski alpinisme, etc... Le second consiste en un hôtel d'environ 100 chambres de catégorie 3 et 4 étoiles destiné à une clientèle plus aisée ;
- Centre Wellness, fitness et piscine : 400 à 800 m<sup>2</sup> ;
- Centre médical spécialisé : 400 à 800 m<sup>2</sup> ;
- Surfaces commerciales : 1500 à 2500 m<sup>2</sup> ;
- Surfaces administratives : 1500 à 3000 m<sup>2</sup> ;
- Appartements adaptés et/ou protégés : 30 à 60 unités ;
- Appartements en location : 20 à 40 unités.

Les projets hôteliers sont liés aux services médicaux, sportifs et wellness.

Le standard Minergie avec certification est exigé au minimum. Une attention particulière sera portée sur les qualités architecturales, de la construction, des aménagements extérieurs et sur l'efficacité énergétique.

Le concept énergétique envisagé prévoit la construction d'une boucle anergie et une pompe à chaleur dans chaque immeuble. Des besoins thermiques globaux estimés de l'ordre de 500 à 1'000 kW<sub>th</sub> peuvent être considérés à ce stade.

L'alimentation de la boucle anergie par de l'eau souterraine à une température de 20 à 25 degrés permettrait dès lors d'atteindre un optimum en matière de performances thermiques, moyennant le recours à des pompes à chaleur pour produire l'eau chaude et l'eau de chauffage.

Dès lors, l'exploitation de la géothermie des eaux souterraines circulant dans le soubassement rocheux fracturé du Val de Bagnes apparaît comme la solution idéale pour alimenter la boucle anergie. Plusieurs études ont déjà démontré la présence d'eaux souterraines tempérées en amont du site Curala, en relation avec les sites hydrothermaux des Grangerets et du Châtelard.



Figure 2 : Plan de quartier de Curala

## 1.2 Justification du projet

Une évaluation du potentiel géothermique du Val de Bagnes a été réalisée en 2012 par le bureau ALPGEO Sàrl pour répondre aux besoins énergétiques de la commune. Trois types de ressources géothermiques ont été étudiées : les sondes géothermiques verticales (SGV), la nappe phréatique de la Dranse et l'exploitation des sources subthermales des Grangerets et du Châtelard, ainsi que de leurs aquifères situés dans des roches fracturées profondes.

L'exploration des aquifères profonds sous la plaine alluviale de la Dranse a été réalisée en 2012 et 2014 par quatre forages de reconnaissance. Deux d'entre eux étaient focalisés sur le système hydrothermal des Grangerets (SMA-1 et SMA-2), les deux autres sur celui du Châtelard (CHA-1 et CHA-2).

Les investigations réalisées dans le cadre du forage exploratoire SMA-1, réalisé en 2012, présentent les résultats les plus concluants. Ce forage jaillissant a atteint le toit du rocher à 273 m de profondeur. Il n'a pas trouvé de gypse, mais des quartzites et des schistes, ce qui révèle la complexité du cadre structural. Différentes venues d'eau ont été recensées dans les terrains meubles et le soubassement rocheux. L'eau provenant du toit du rocher a une température de 18.5°C avec une minéralisation élevée (~5 g/l). En raison d'un équipement incomplet, le forage n'est pas exploitable en l'état (instabilité du trou). Un puits plus profond exploitant des débits plus importants et des températures plus élevées permettrait de mieux répondre au besoin de développement du futur quartier de Curala.

La nécessité d'améliorer les connaissances géologiques et hydrogéologiques locales dans le but d'implanter un futur puits d'exploitation des eaux thermales souterraines justifie le présent projet. Celui-ci pourrait répondre aux besoins énergétiques du futur quartier de Curala, soit des températures comprises entre 20 et 25°C pour des puissances thermiques de 500 à 1'000 kW<sub>th</sub>.



### 1.3 Objectifs du projet

L'objectif premier du projet consiste en l'amélioration des connaissances géologiques et hydrogéologiques locales, afin de proposer des solutions concrètes pour l'exploitation des ressources géothermiques du Val de Bagnes, dans l'optique d'alimenter en chaleur le futur quartier de Curala.

L'aquifère du Trias qui alimente le système hydrothermal des Grangerets est le plus intéressant en termes de proximité des utilisateurs et de durabilité d'exploitation de la ressource, contrairement au système du Châtelard, caractérisé par une recharge déficitaire de l'aquifère. Pour que l'exploitation du système des Grangerets puisse satisfaire les besoins en chaleur du futur quartier de Curala, les débits et les températures doivent être augmentés. Pour ce faire, un forage recouplant en profondeur l'aquifère est nécessaire.

L'inconnue principale concerne la géométrie de cet aquifère, enfoui sous une couverture de sédiments quaternaires de près de 300 m d'épaisseur. Le forage SMA-1 ne traverse que sur une dizaine de mètres des quartzites fracturés, interprétés comme formant la base de la bande triasique.

La reconnaissance géologique associée à une étude sismique et la modélisation géologique 3D envisagée dans le cadre de la présente étude doit permettre de situer en un premier temps l'aquifère du Trias. Un modèle hydrogéologique inspiré du modèle géologique permettra de préciser le fonctionnement des systèmes hydrothermaux de la région. En fonction des résultats, plusieurs cibles seront identifiées. Des sites seront alors proposés et évalués.

## 2 Situation initiale

### 2.1 Etat de l'art

Les premières études datant des années 1990 se sont concentrées sur les deux systèmes hydrothermaux profonds qui existent dans la vallée de Bagnes. Sur la base d'un modèle conceptuel (Figure 3 et Figure 4), l'implantation de forages exploratoires a alors été proposée, compte tenu des critères géologiques de surface et de la proximité des utilisateurs. Sur la base des résultats de ces forages, l'exploitation du système hydrothermal du Châtelard ne serait pas rentable, contrairement à celui des Grangerets. Alors que les données sismiques à disposition prévoyaient un toit du rocher entre 120 m et 160 m de profondeur (CRSFA 1991), le forage SMA-1 dans le système hydrothermal des Grangerets a atteint le rocher à plus de 270 m, mais il a dû être arrêté à 287 m pour des raisons techniques et financières. Malgré ces imprévus, ce forage a confirmé le potentiel géothermique élevé de l'exploitation des eaux souterraines de ce système hydrothermal.

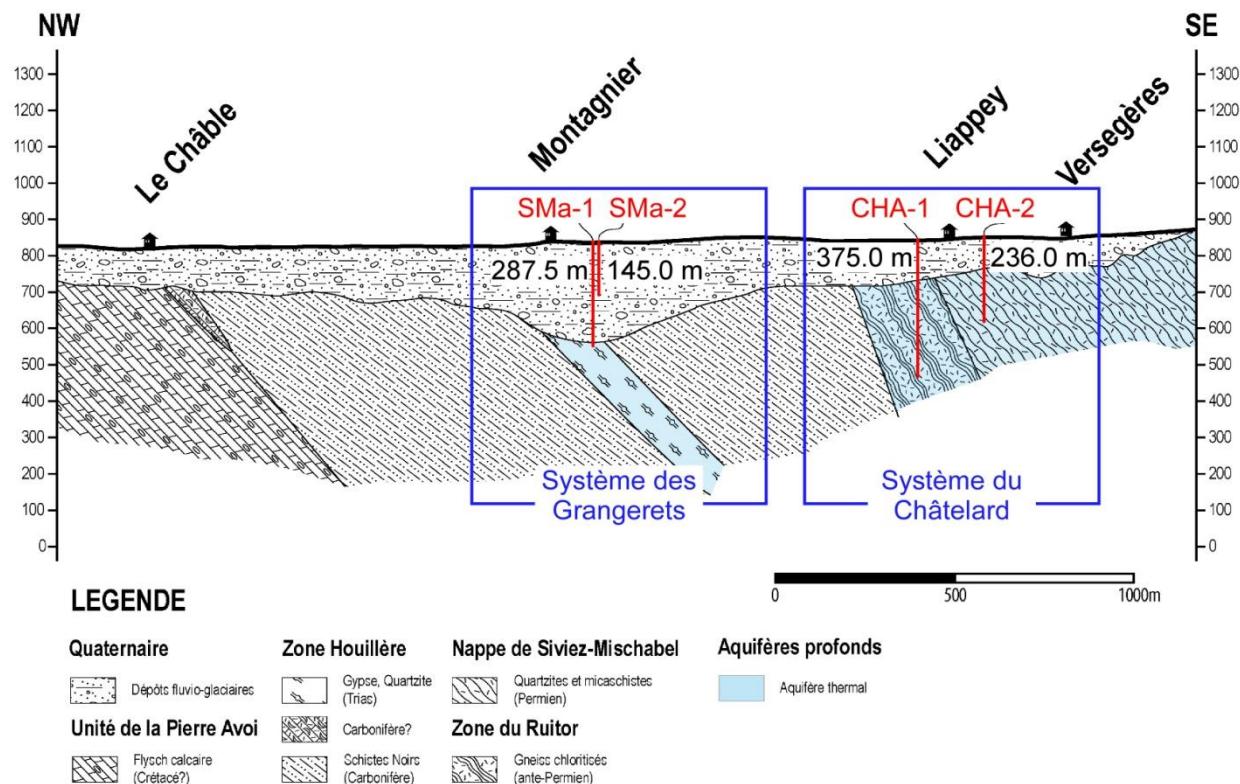


Figure 3 : Situation des systèmes hydrothermaux profonds de la vallée de Bagnes le long d'un axe parallèle à la vallée

Des études complémentaires comprenant un modèle géologique 3D simplifié, divers analyses hydrogéologiques (essais de pression, analyses isotopiques, ...) et une synthèse des données existantes ont été réalisées dans le cadre d'un travail de master au CHYN (Dorner 2017). Cette étude confirme le potentiel géothermique important du système hydrothermal des Grangerets et met en lumière les inconnues à relever avant d'envisager l'exploitation des eaux souterraines par un puits de pompage profond.

A remarquer qu'un projet similaire à celui envisagé par la commune de Bagnes a déjà été réalisé avec succès à Davos en 2012, avec des conditions géologiques similaires (aquifère du Trias) et une profondeur de forage équivalente (puits de 400 m). Ce projet, qui a reçu le soutien de l'OFEN pour le financement du forage, exploite de l'eau à 12°C avec un débit de 20 l/s (Vogel 2013). La ressource géothermique permet d'alimenter le centre des congrès et une piscine d'eau thermale à 34°C. Avec un rejet des eaux à 3°C après valorisation thermique, l'énergie thermique qui peut être fournie annuellement est de l'ordre de 2 à 3 GWh<sub>th</sub>.

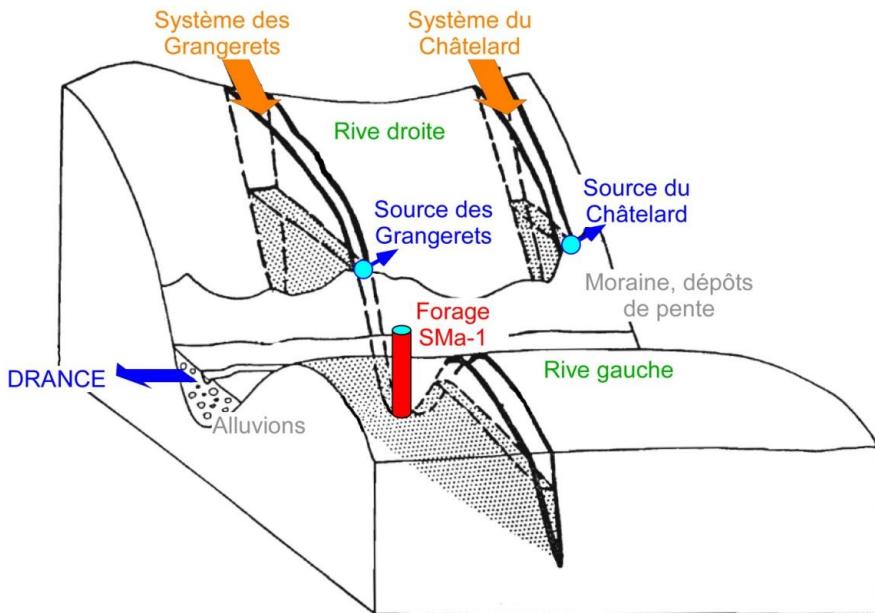


Figure 4 : Modèle conceptuel des écoulements des systèmes hydrothermaux des Grangerets et du Châtelard (modifié de CRSFA 92/25A, 1992).

## 2.2 Connaissances fondamentales sur les ressources géothermiques

Dans les Alpes, des bandes de roches triasiques (gypse, dolomies, quartzites, etc.) "pincées" et fracturées dans des schistes de la Zone Houillère existent en plusieurs endroits. Les aquifères karstiques ou de fractures contenus dans ces niveaux n'ont pour l'heure quasiment jamais été explorés. Si l'existence de ressources géothermiques associées à des bandes sédimentaires était démontrée, de nouvelles perspectives s'ouvriraient à l'échelle de l'arc alpin.

D'autre part, des hypothèses ont été émises sur l'existence d'un drain profond dans le remplissage quaternaire de la Vallée du Rhône, mais aussi du Val de Bagnes. Il s'agit de dépôts fluvioglaciaires grossiers et perméables au fond de l'auge glaciaire, qui collecteraient les eaux provenant du soubassement rocheux fracturé sous-jacent. Ponctuellement, ces sédiments ont été rencontrés par les forages exploratoires réalisés en amont du Châble, notamment dans le forage SMA-1 où les débits étaient intéressants (5 l/s jaillissants). Si leur extension latérale devait être démontrée par d'autres forages de reconnaissance, le potentiel d'exploitation des ressources géothermiques serait important, ce drain profond "rapprochant" les eaux chaudes souterraines des utilisateurs.

## 2.3 Connaissances géologiques locales

Le contexte tectonique du système hydrothermal des Grangerets est complexe. Le réservoir aquifère est associé à une bande de roches triasiques (gypse, cornieule, marbres et dolomies), épaisse de quelques dizaines de mètres et entourée de schistes et de grès houillers, qui s'étend de la vallée du Rhône au Col du Grand St-Bernard en passant par Baar, Nendaz, Pra da Dzeu, La Tzoumaz, Savoleyres, Verbier, le Six Blanc et la Combe de L'Â. Elle a autrefois été désignée sous le terme de « Trias médian » (Calame 1954). Elle forme le sommet de la Zone Houillère externe (Steck et al. 1999), qui constitue un mélange tectonique dans lequel des schistes noirs et des métasédiments triasiques. Le gypse forme une bande continue au toit de la Zone Houillère externe, en contact tectonique avec la Zone Houillère



interne. Cette dernière est une unité stratigraphiquement cohérente formée de schistes noirs, de métaluminosites et de quartzites d'âge carbonifère à triasique.

Les schistes des Zones Houillères interne et externe sont globalement moins perméables que le gypse.

Dans le détail, au Nord de Verbier, la bande du « Trias médian » affleure à Savoleyres. En direction du sud, elle disparaît rapidement sous des formations quaternaires. Elle affleure ensuite à Verbier où elle forme des dolines et des effondrements dans le secteur des Creux. De nombreux forages la traversent, permettant de la suivre jusqu'à Fontanelle où émergent les sources subthermales des Grangerets. Elle disparaît ensuite sous les formations quaternaires du pied du versant et sous le remplissage alluvial de l'auge glaciaire. Le gypse est partiellement remplacé en surface par de la cornieule. En profondeur, il fait place à de l'anhydrite, mais la position de l'interface entre les deux roches est difficilement prévisible.

## 2.4 Connaissances hydrogéologiques locales

Dans le Val de Bagnes, les données hydrogéologiques proviennent de trois types de points d'eau différents (Figure 5 et Annexe 5). :

- Sources subthermales des Grangerets et du Châtelard, situées sur le versant droit de la Dranse, au NE du Châble, respectivement de Prarreyer ;
- Forages de reconnaissance géothermique : SMA-1 / SMA-2 à Montagnier (système hydrothermal des Grangerets) et CHA-1 / CHA-2 au Liappey (système hydrothermal du Châtelard). Trois de ces forages ont atteint le soubassement rocheux entre 236 et 375 m de profondeur ;
- Forages dans la nappe phréatique de la Dranse, équipés de piézomètres.

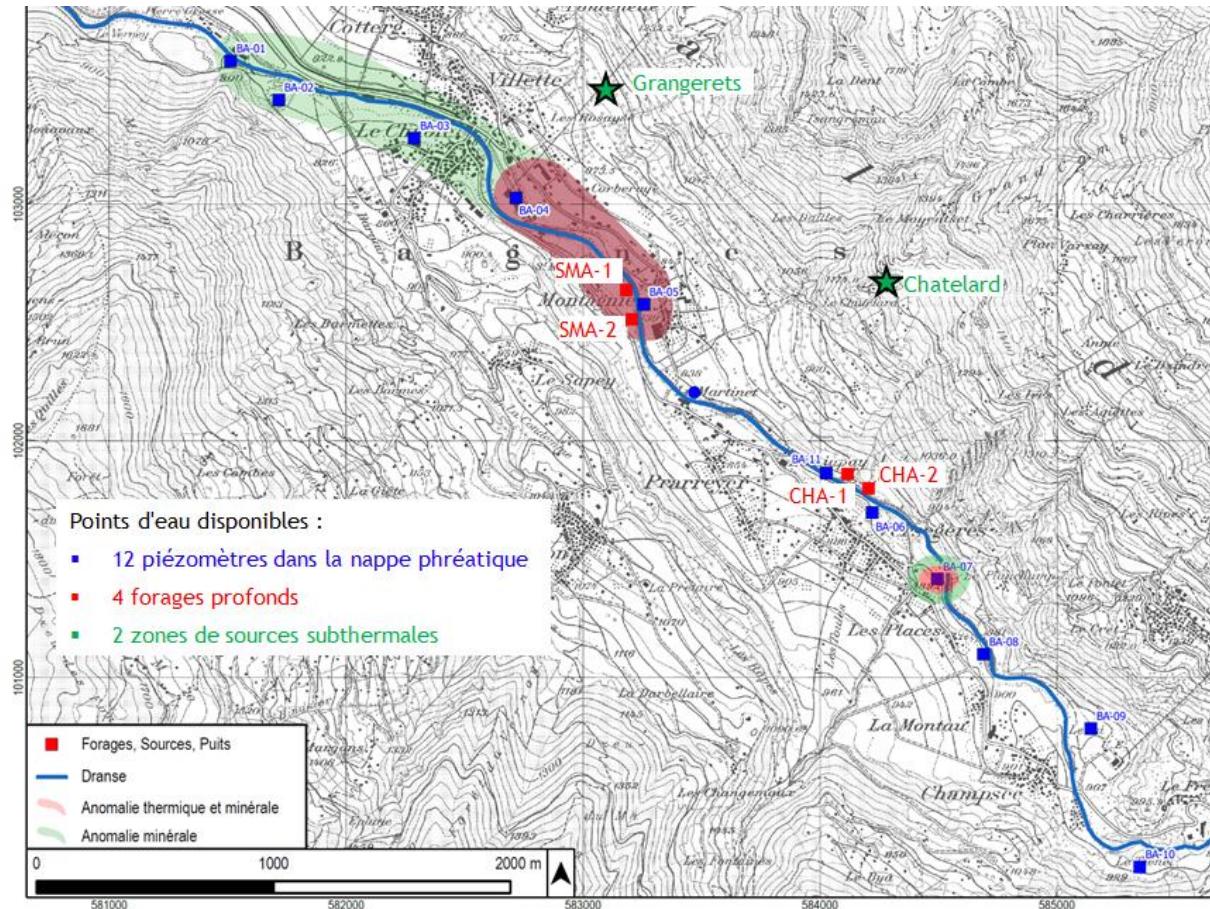


Figure 5 : Situation des points d'eau pris en considération pour déterminer l'origine des eaux souterraines sur la base de leurs caractéristiques physico-chimiques.

#### 2.4.1 Sources subthermales :

- Les sources des Grangerets se situent en aval de la route agricole qui mène au hameau de Fontenelle. Dans le passé, ces émergences en partie captées alimentaient les serres de Gaillard Fleurs. Les eaux affichent une température maximale proche de 12°C et le débit total est > 5-6 l/s.
- Les sources du Châtelard sont situées une cinquantaine de mètres en amont du hameau du Châtelard, aux abords de la route forestière. Elles affichent des températures comprises entre 17 et 18°C, avec un débit total de l'ordre de 1 à 2 l/s selon les périodes de mesure.

Ces sources ont déjà fait l'objet de plusieurs études dans le passé, notamment par :

- Le bureau d'ingénieurs et géologues Tissières SA, qui a mené des investigations entre 1985 et 2003 (Tissières 1986 et 2003) ;
- Le programme GEOTHERMOVAL, réalisé de 1989 à 1993 par le CREALP à Sion et qui visait à la mise en valeur des ressources géothermiques en Valais (CRSFA 1991 et 1992) ;
- Un travail de Master en hydrogéologie au CHYN (Dorner 2017).

Actuellement, ces sources ne sont pas exploitées et pourraient constituer, captées au sein de leurs réservoirs profonds, une ressource thermique intéressante pour la commune, à condition de trouver de potentiels clients-chaleur pas trop éloignés.



Les principales caractéristiques de ces sources sont résumées dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Situation des points d'eau pris en considération pour déterminer l'origine des eaux souterraines sur la base de leurs caractéristiques physico-chimiques.

	Sources des Grangerets	Sources du Châtelard
Coordonnées moyennes	583°095 / 103°485	584°275 / 102°650
Altitude	950 m.s.m	1'100 m.s.m
Tempér. de l'eau	11.1 - 11.7 °C	16.8 – 17.8 °C
Emergences	L'eau émerge dans une zone sourcière située en aval de la route agricole pour Fontenelle. Plusieurs émergences	L'eau jaillit du rocher Les deux sources, éloignées d'env. 15 m l'une de l'autre, se situent aux abords de la route forestière
Débit	50 – 140 l/min (point de jaugeage) Débit total >5–6 l/s	50 – 110 l/min (cumul des 2 sources au point de jaugeage)
Conductivité K <sub>20</sub>	1'973 – 2'340 µS/cm	954 – 1'170 µS/cm
Substances dissoutes (TSD)	2'450 - 2'500 mg/l	900 - 950 mg/l
Géologie	Limite entre le gypse du Trias et le recouvrement morainique	Zone faillée, quartzites massifs du Trias précoce
Typologie des eaux	Sulfaté-calcique	Sulfaté-calcique

#### 2.4.2 Forages de reconnaissance géothermique

Les résultats des forages réalisés figurent dans deux rapports détaillés (ALPGEO 2013 et 2015-a). Une synthèse des travaux réalisés et des principaux résultats figure ci-après.

Forages réalisés à Montagnier (système hydrothermal des Grangerets) et principaux résultats :

- Deux forages profonds de 145 m (SMA-2) et 287 m (SMA-1) ont été réalisés en destructif ;
- Le forage SMA-2 a dû être arrêté dans les terrains meubles. Improductif, il est équipé avec une sonde géothermique ;
- Le forage SMA-1 a atteint le soubassement rocheux (quartzites) à une profondeur de 273 m. Il a dû être arrêté à 288 m pour des raisons financières. En effet, le toit du rocher se trouvait à une profondeur bien plus importante que les prévisions avancées par une campagne de géophysique qui donnaient la base du Quaternaire à ~100 m (CRSFA 1991) ;
- Le SMA-1 a été équipé avec un tubage en PVC 3", qui s'est cassé lors du retrait du casing métallique, laissant un tronçon d'environ 50 m en trou nu dans les terrains meubles. Malgré cela, les eaux souterraines en pression remontent jusqu'en surface avec un débit constant de 150 l/min (Figure 6).

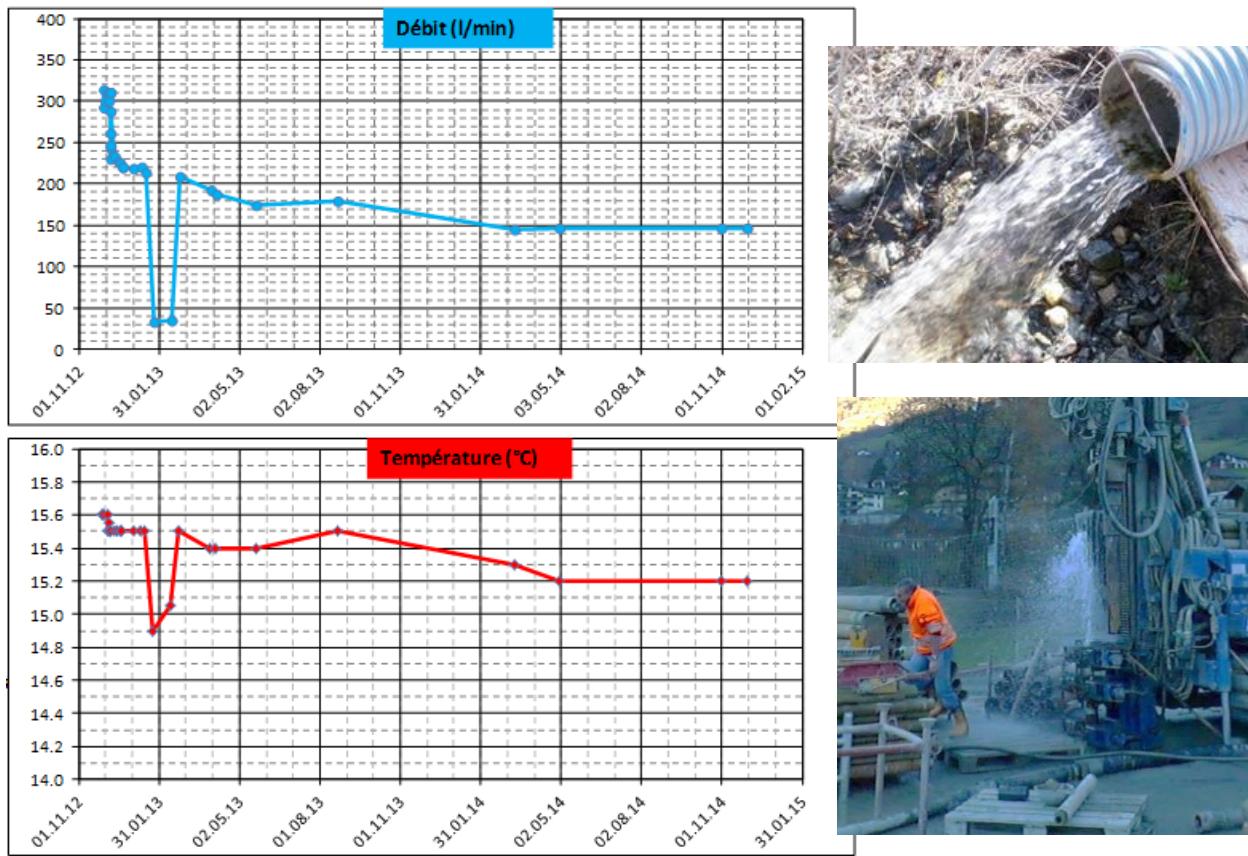


Figure 6: Evolution du débit et de la température de l'eau du forage SMA-1 (novembre 2012 – décembre 2014).

- De l'eau jaillit du rocher fracturé et du fluvioglaciaire épais de 20 m avec un débit global de 340 l/min. La température de l'eau est  $>16^{\circ}\text{C}$ . La minéralisation de l'eau provenant des quartzites fracturés est élevée (5.2 g/l) ;
- Une température de  $18.5^{\circ}\text{C}$  a été mesurée au fond du forage (-287 m). Le gradient géothermique entre 160 m et le fond du forage (env.  $2.4^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ ) est légèrement inférieur à la normale (Figure 7) ;
- L'eau qui jaillit du forage de manière interrompue depuis 7 ans est un mélange entre l'eau provenant du soubassement rocheux et celle provenant des terrains meubles. Aucun impact sur les sources subthermales des Grangerets n'a été constaté.

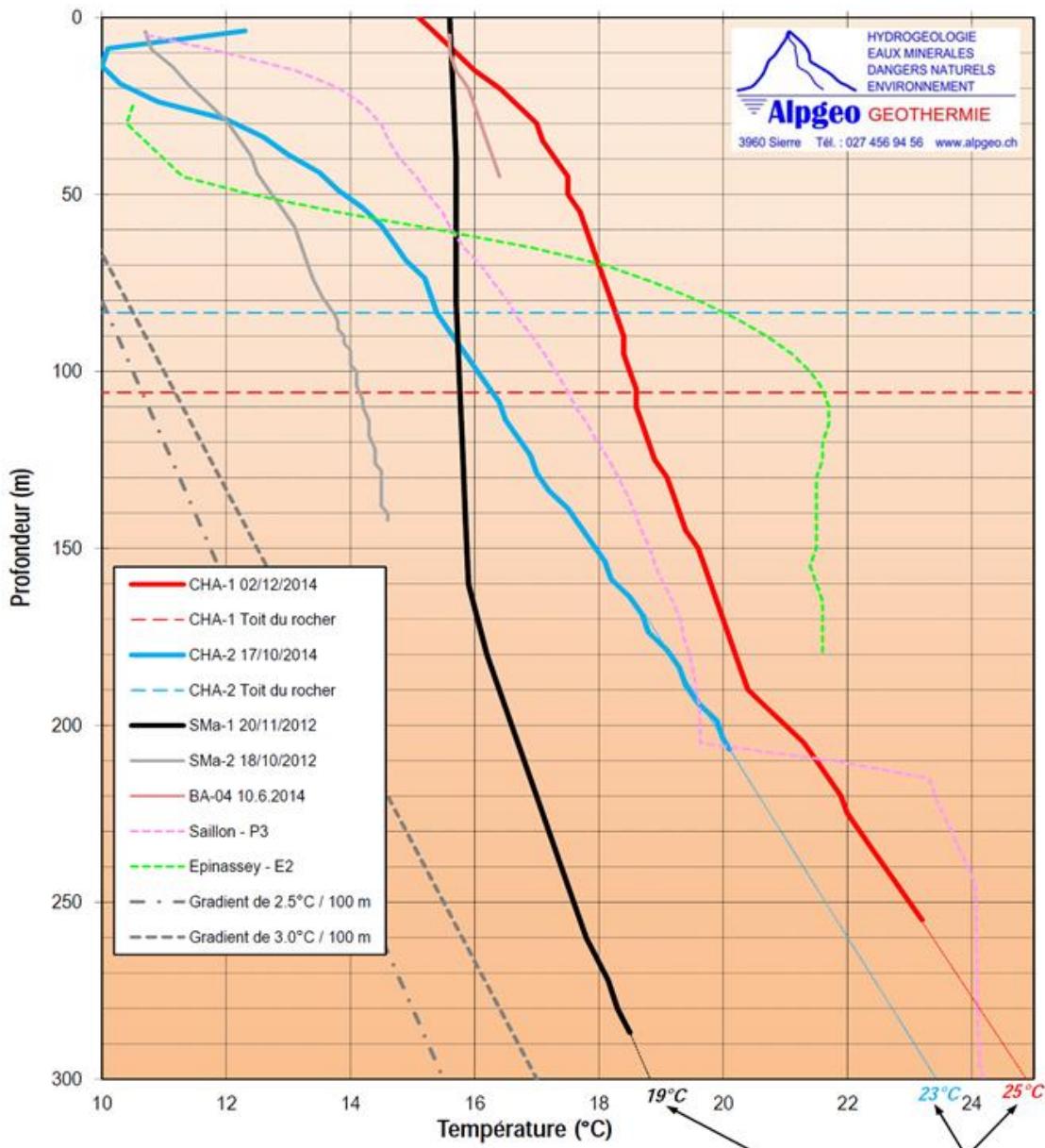


Figure 7 : Profils thermiques dans les forages de reconnaissance réalisés au Châble. Les gradients géothermiques dans le système hydrothermal du Châtelard (forages CHA-1 et CHA-2, 3.8°C/100 m) sont supérieurs à la normale.

#### Forages réalisés à Prarreyer-Vergegères (système hydrothermal du Châtelard) et principaux résultats :

- Deux forages profonds de 236 m (CHA-2) et 375 m (CHA-1) ont été réalisés en destructif ;
- Le forage CHA-2 a dû être arrêté en raison d'une rupture des tiges de perforation ;
- Le soubassement rocheux a été atteint à 83 m de profondeur dans CHA-2 (quartz-schistes de la nappe de Siviez-Mischabel), respectivement à -106 m dans CHA-1 (gneiss du Ruitor) ;
- Les deux forages ont été équipés avec un tubage en PVC 4.5", cimenté au toit du rocher. Ils sont en trou nu entre 99 et 204 m pour CHA-2, respectivement entre 115 et 375 m pour CHA-1 ;



- Les deux forages sont jaillissants, avec de faibles débits (<10 l/min). Par pompage, il est possible d'exploiter des débits de l'ordre de 150 l/min, avec une température de l'eau de 17.5°C pour CHA-2 et de 20.7°C pour CHA-1. La minéralisation des eaux est assez élevée (2.6 à 3.2 g/l) ;
- Une température de 21°C a été mesurée au fond du forage CHA-2, respectivement de 27°C au fond du CHA-1 (valeur extrapolée car une obstruction du trou nu ne permet pas de mesurer au-delà de 255 m de profondeur). Le gradient géothermique dans le rocher (3.8°C/100 m) est supérieur à la normale (Figure 7) ;
- Les deux aquifères exploités par ces forages sont reliés hydrauliquement. Les essais de pompage ont démontré que la recharge des aquifères est déficiente lorsque les débits dépassent 100 à 150 l/min. Aucun impact sur les sources subthermales du Châtelard n'a été constaté ;
- Les deux forages sont exploitables en l'état avec une pompe immergée.



Figure 8 : Forage CHA-1 jaillissant et pompage durant 18 heures réalisé en novembre 2014.

#### 2.4.3 Piézomètres dans la nappe phréatique de la Dranse

Les résultats de l'étude réalisée figurent dans un rapport détaillé (ALPGEO 2015-b). Les investigations visaient à mieux connaître les caractéristiques des terrains meubles, à déterminer la productivité de la nappe phréatique de la Dranse et à mettre en place un réseau de surveillance hydrogéologique.

De plus, cette étude a permis d'identifier des secteurs favorables à une exploitation thermique de la nappe phréatique par doublets. Selon les sites, la puissance thermique produite avec des PAC et un  $\Delta T$  de 3 à 4°C peut varier, pour des cas favorables, entre 1.5 et 3.9 MW<sub>th</sub>.

Les piézomètres situés en amont et en aval du Châble montrent des anomalies thermiques et minérales (eaux tempérées et plus ou moins fortement minéralisées, Figure 5 et Annexe 5). Celles-ci indiquent des mélanges avec des eaux thermales provenant du soubassement rocheux.



Une synthèse des travaux réalisés et des principaux résultats figure dans le Tableau 2 ci-après.

#### 2.4.4 Synthèse des connaissances hydrogéologiques avant la présente étude

- Deux systèmes hydrothermaux distincts sont "indiqués" par deux groupes de sources subthermales qui émergent dans le versant en rive droite de la Dranse, avec des caractéristiques physico-chimiques différentes.
- Celui des Grangerets est lié à un aquifère thermal karstique et de fractures représenté par des roches du Trias médian. Le forage SMA-1, réalisé en amont du site de Curala, a validé en partie le modèle conceptuel qui supposait la traversée de la vallée en profondeur par l'écaillle triasique. En partie seulement car les gypses présents dans la zone d'émergence des sources n'ont pas été traversés par ce forage. Les anomalies thermiques et minérales de la nappe phréatique dans cette zone confortent aussi l'hypothèse d'un aquifère thermal triasique en pression qui se déverse dans les alluvions grossières qui jouent le rôle d'un drain préférentiel. La régularité des débits mesurés aux sources des Grangerets et dans le forage jaillissant SMA-1 montrent que cet aquifère est bien réalimenté.
- Celui du est représenté par des quartzites de la Zone Houillère interne. L'émergence des sources subthermales s'explique par le pincement de cette unité géologique. Ce système hydrothermal est aussi bien réalimenté.
- Par contre, le système hydrothermal du Châtelard ne semble pas être connecté à celui rencontré en profondeur par les forages CHA-1 et CHA-2 qui, malgré des lithologies différentes rencontrées, ne constituent qu'un seul et unique aquifère (relation hydraulique).
- Le système hydrothermal mis en évidence par les forages CHA-1 et CHA-2, qu'on nommera "de Versegères", montre un déficit de réalimentation pour des débits de l'ordre de 2.0 à 2.5 l/s. Le gradient géothermique de  $3.8^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  est plus élevé que la normale.
- Quant aux piézomètres implantés dans les terrains meubles de la vallée, le BA-04 représente une exception notable au niveau de la minéralisation et surtout de la température de l'eau ( $17$  à  $18^{\circ}\text{C}$ ). Il est probable que cette anomalie ne soit pas en relation avec le système hydrothermal des Grangerets. Dans une moindre mesure, le BA-07 montre aussi ce type d'anomalie.

En conclusion : du point de vue géothermique, le Val de Bagnes est caractérisé par au moins 4 systèmes hydrothermaux indépendants. Celui des Grangerets est lié à une écaillle triasique de roches perméables qui permet la remontée d'eaux chaudes vers la surface. Pour les autres systèmes, la présence de failles permettrait d'expliquer les anomalies thermiques. Un des objectifs de la présente étude est justement de préciser la localisation de ces accidents tectoniques.



Tableau 2 : Caractéristiques des piézomètres implantés dans les alluvions de la Dranse et autres terrains meubles du Val de Bagnes, ainsi que principaux résultats des essais de pompage réalisés.

		Unité	BA-01	BA-02	BA-03	BA-04	BA-05	BA-11	BA-06	BA-07	BA-08	BA-09	BA-10
Situation géographique	Coordonées		581'505 103'612	581'715 103'440	582'292 103'278	582'716 103'029	583'255 102'577	584'034 101'861	584'220 101'697	584'496 101'414	584'694 101'082	585'097 100'778	585'358 100'190
	Altitude (terrain)	[msm]	798.66	806.27	829.57	820.17	~ 828.4	850.86	858.60	873.49	882.19	897.65	929.97
Données techniques	Profondeur du forage	[m]	41.0	40.5	30.0	46.5	37.5	30.0	39.0	50.0	37.5	40.5	32.0
	Type de piézomètre		4.5"	4.5"	2.0"	4.5"		4.5"	4.5"	2x2"	4.5"	4.5"	4.5"
	Profondeur du piézomètre	[m]	39.5	39.5	30.0	46.0		30.0	35.0	BA-07-30: 30.0 BA-07-50: 50.0	32.0	40.0	30.0
	Zone créninée	[m]	11.5-17.5 19.5-37.5	17.5-23.5 25.5-37.5	19.0-29.0	28.0-44.0		12.0-16.0 18.0-28.0	21.0-33.0	BA-07-30: 10.0-28.0 BA-07-50: 32.0-48.0	12.0-16.0 18.0-30.0	18.0-22.0 24.0-38.0	20.0-30.0
	Référence (=réf.)	-	Sommet tube métallique	Sommet tube métallique	Sommet tube métallique	Bord inf. couvercle regard		Sommet tube métallique	Sommet tube métallique	Sommet tube métallique	Sommet tube métallique	Sommet tube métallique	Sommet tube métallique
	Altitude (réf.) mesure GPS	[msm]	799.53	807.22	830.50	820.15		851.81	859.64	874.45	883.20	898.70	930.93
	Hauteur réf./sol	[m]	0.87	0.95	0.93	-0.02		0.95	1.04	0.96	1.01	1.05	0.96
	Hauteur PVC /sol	[m]	0.73	0.41	0.80	-0.12		0.94	1.00	BA-07-30: 0.62 BA-07-50: 0.78	-0.06	0.00	0.07
	Niv. Piézométrique /réf. 10.06.14	[m]	7.21	9.19	23.93	1.95		4.02	3.13	BA-07-30: 6.50 BA-07-50: 11.83	3.73	13.20	23.77
	Niv. Piézométrique /sol 10.06.14	[m]	6.34	8.24	23.00	1.97		3.07	2.09	BA-07-30: 5.54 BA-07-50: 10.87	2.72	12.15	22.81
Perforation	Profondeur rocher	[m]	> 41.0	> 40.5	> 30.0	> 46.5	> 37.5	> 30.0	> 39.0	31.5	> 37.5	> 40.5	24.0
	Débit (min-max)	[l/min]	30	60-90		6		84	198	18-90			
	Cond. K20 (min-max)	[uS/cm]	785-947	783-1112		3080-3170	729	390-396	383-421	354-1810	384-436	418-455	
	Température (min-max)	[°C]	11.8-13.8	10.0-10.1		17.0-19.5		10.4-10.9	8.4-9.2	8.9-13.2	9.1-10.1		
Pompage	Débit max	[l/min]	307	300		33		235	300		290	295	
	Rabattement max	[m]	0.34	0.42		18.52		0.52	1.21		0.49	0.03	
	Perméabilité K	[m/s]	6.2E-04	7.1E-04		1.8E-06		4.8E-04	3.5E-04		5.5E-04	7.6E-03	
	Conductivité K20	[uS/cm]	791-802	1319-2600		3020-3030		408-420	442-448		445-449	412-413	
	Température	[°C]	9.4-9.9	9.6-11.2		16.9-17.8		9.1-10.1	9.4-10.0		8.9-9.4	9.1-9.7	
Chimie	Chimisme de l'eau		Ca>Mg HCO3>SO4	Ca SO4>HCO3		Ca SO4>HCO3		Ca>Mg HCO3>SO4	Ca>Mg HCO3>SO4		Ca>Mg HCO3>SO4	Ca>Mg HCO3>SO4	



## 3 Approche et méthode

La démarche proposée comprend en premier lieu la compilation des connaissances géologiques et hydrogéologiques régionales.

L'approche de terrain (reconnaissance géologique, campagne de géophysique) vient compléter les documents existants.

Un écorché tectonique de la région sera réalisé sur la base des données existantes, des résultats de la campagne de géophysique et de nouvelles interprétations tectoniques. L'objectif est d'aboutir à un modèle géologique 3D et au compartimentage des aquifères. Ce dernier se basera sur la synthèse des données hydrogéologiques et de nouvelles données isotopiques.

Un modèle conceptuel englobera la totalité des données et permettra la définition des cibles géothermiques et la proposition de sites pour l'implantation d'un futur forage géothermique.

### 3.1 Bibliographie

Les premières études sur le potentiel géothermique datent de 1992 et ont été réalisées par le CRSFA (Centre de Recherches Scientifiques Fondamentales et Appliquées de Sion). Les émergences subthermales des Grangerets et du Châtelard sont étudiées. Les premières conclusions mettent rapidement en avant le potentiel du système hydrothermal des Grangerets, contrairement à celui du Châtelard qui présente des inconvénients. Une campagne de sismique réflexion a permis de déterminer la profondeur du toit du rocher sur une ligne parallèle à l'axe de la vallée.

Ces études ont servi de base au bureau ALPGEO Sàrl qui a réalisé entre 2011 et 2015 plusieurs études sur le potentiel géothermique de la commune de Bagnes, confirmant les conclusions du CRFSA. Ces études avaient comme objectifs quatre forages exploratoires, deux sur chaque système hydrothermal : les forages SMA-1 et SMA-2 à Montagnier, sur l'actuel stade de foot à Saint-Marc, et les forages CHA-1 et CHA-2 au Liappey pour l'exploration du système du Châtelard. L'hydrogéologie a été étudiée en parallèle des forages.

Les connaissances des systèmes hydrothermaux ont été améliorées et leur fonctionnement a été précisé. Il ressort de ces études que le toit du rocher dans le fond de la vallée est plus profond que ce que laissaient imaginer les études du CRFSA.

Un travail de master du CHYN s'est concentré sur les deux systèmes hydrothermaux en 2017. Un suivi des sources, ainsi que des analyses chimiques et isotopiques ont été mis en place dans le cadre de ce travail. Un modèle géologique 3D a également été construit. Ce dernier ne satisfaisait pas aux dernières interprétations tectoniques et géologiques de la région, il n'a pu être utilisé dans le cadre de la présente étude.

La liste des références bibliographiques consultées dans le cadre de la présente étude est répertoriée dans le chapitre 10.

### 3.2 Collecte et traitement de données de forages

Dans le cadre de la compilation des données existantes, le cadastre des forages du canton (<https://geocadast.creap.ch>) a été consulté et traité. La couverture quaternaire est importante dans la zone d'étude et les informations en surface n'abondent guère. Les données de forages viennent pallier ponctuellement ce manque et apportent des informations importantes autant pour la construction du modèle du toit du rocher que sur la nature de ce dernier.



Les informations suivantes ont plus particulièrement été recherchées :

- Les forages atteignant le toit du rocher ou non, et la profondeur du toit du rocher atteint ;
- Les forages qui atteignent le gypse, l'anhydrite ou des cornieules de la Zone Houillère externe ;
- Les forages qui atteignent les schistes, quartzites et grès de la Zone Houillère interne et de la Zone Houillère externe.

### 3.3 Géophysique

Une campagne de reconnaissances géophysique en sismique réflexion a été réalisée durant la première quinzaine d'avril 2019 (Rapport Geo2X, Annexe 1). Les objectifs de l'étude consistent à :

1. Préciser la géométrie de l'interface entre sédiments quaternaires et substratum rocheux ;
2. Localiser les unités triasiques (« Trias médian ») entre les formations schisteuses de la Zone Houillère interne et de la Zone Houillère externe ;
3. Définir le pendage de la bande triasique en question ;

Pour ce faire, quatre profils perpendiculaires à la vallée ont été acquis (Figure 9). Ces tracés ont été choisis en suivant les critères suivants :

- Première interprétation de l'écorché tectonique et position hypothétique de la bande triasique ;
- Position du forage SMA-1 afin de caler les interprétations ;
- Proximité des futurs utilisateurs ;
- Position des futures cibles géothermiques.

Un profil longitudinal était initialement prévu mais sa réalisation a finalement été abandonnée. L'existence potentielle d'une faille orientée selon l'axe de la vallée et la présence éventuelle de chenaux torrentiels sous-glaciaires représentaient un risque important d'interférence avec les réflecteurs recherchés, ce qui aurait rendu le profil inexploitable. Dès lors, il a été décidé de réaliser un dernier profil perpendiculaire à la vallée, à proximité du quartier de Curala, et donc des futurs utilisateurs.

Les profils ont été étirés au maximum sur les deux versants de la vallée pour se rapprocher des premiers affleurements rocheux et améliorer les interprétations. Le rapport d'exécution se trouve en annexe 1.

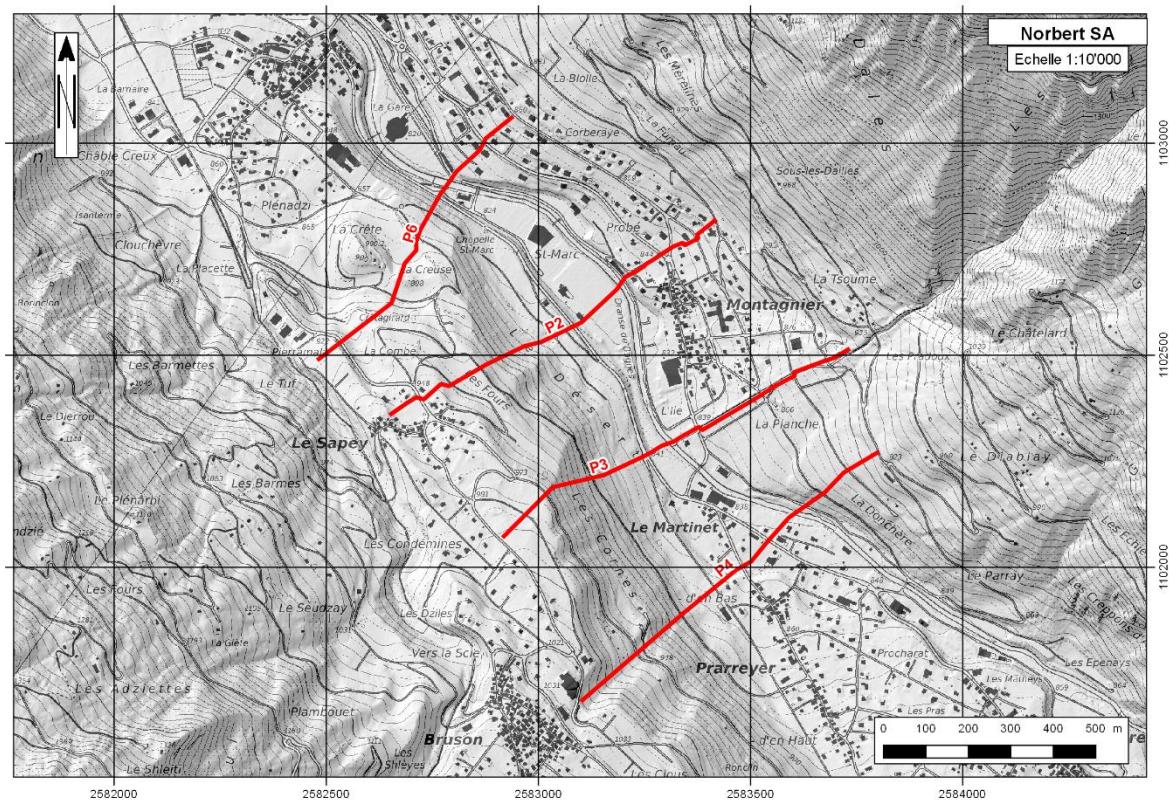


Figure 9 : Situation des tracés d'acquisition sismique.

### 3.4 Géologie structurale

Entre Le Châble et Lourtier, le Val de Bagnes présente une structure tectonique problématique, qui diffère de la superposition habituelle des unités du Pennique inférieur et moyen qui est observée entre la vallée du Rhône (région de Sion) et Verbier. Il n'existe pas dans la littérature géologique de consensus sur un modèle structural simple pour ce secteur.

Les données principales à disposition pour aborder cette problématique sont consignées dans la carte géologique 1325 Sembrancher de l'Atlas géologique de la Suisse (AG25). Le versant en rive droite de la Dranse de Bagnes étant très couvert par les terrains superficiels et celui en rive gauche très perturbé par des instabilités de versant, la réalisation d'un modèle géologique a impliqué les étapes suivantes.

#### 1. Choix d'un découpage tectonique et lithologique des unités cohérent avec les buts du projet :

Une légende de carte propre au projet a été réalisée (Annexe 2). Elle tient compte des changements intervenus dans la nomenclature stratigraphique et tectonique depuis l'édition de la carte Sembrancher. Dans la mesure du possible, les résultats du projet HARMOS mené par swisstopo ont été utilisés.

Deux unités tectoniques présentes dans le secteur ayant le caractère de mélanges sédimentaires et / ou tectoniques (Unité de la Pierre Avoi, Zone Houillère externe), les formations lithologiques qu'elles contiennent ont été regroupées lorsqu'elles ne présentent pas les propriétés d'un aquifère ou d'un aquiclude continu.



## 2. Vérification sur le terrain et acquisition de données structurales :

Des vérifications ponctuelles du contenu stratigraphique des affleurements ont été réalisées sur le terrain dans certains secteurs-clés (p. ex. Châtelard, Fontenelle, Eplane, La Giète, etc.). Des données structurales (pendages de schistosité et de stratification, orientation d'axes de plis, de fractures...) ont été acquises dans ces secteurs. La zone d'étude n'a cependant pas été recartographiée à une échelle plus détaillée, car le rapport coût-bénéfice d'une telle opération a été jugé défavorable.

## 3. Réalisation d'un modèle du toit du rocher :

Les données de sismique réflexion, les données des forages ayant touché le rocher ainsi que les contours des affleurements rocheux ont été utilisés pour tracer manuellement une carte des courbes d'iso-altitude du toit du rocher. En raison de la faible quantité de points de référence à disposition, cette technique a donné des résultats plus cohérents que les quelques essais d'interpolation automatique qui ont été réalisés. Les courbes ont été numérisées et interpolées par krigeage à l'aide du logiciel Surfer (v.15) de manière à obtenir une grille de 10m de maille. Cette couche d'information a pu être complétée par une interpolation semi-automatisée du toit du bedrock dans le secteur Verbier, basée sur le contour des affleurements rocheux et sur les forages à disposition, réalisée par le CREALP dans le cadre du projet « Deep-City ».

## 4. Réalisation d'un écorché tectonique au toit du rocher :

Cette phase cruciale de l'interprétation tectonique a été réalisée au moyen d'une carte au 1:10'000 comprenant les lignes de niveau du toit du rocher. Plusieurs interprétations ont été testées en regard de la cohérence des coupes géologiques qu'elles permettaient de réaliser.

## 5. Réalisation de coupes croisées :

Afin de contraindre la géométrie des contacts entre unités en 3D, 7 coupes d'orientation NE-SW et 4 coupes d'orientation NW-SE ont été construites (Figure 10). Le quadrillage réalisé permet d'utiliser toute l'information géologique disponible sur les flancs de la vallée. Les 18 intersections existantes entre les coupes contraignent de manière très sévère la cohérence 3D de l'interprétation. Plusieurs versions de ces coupes, correspondant aux différentes versions de l'écorché tectonique, ont été testées.

## 6. Modélisation surfacique 3D :

La modélisation géologique 3D a été réalisée sur la base des éléments énumérés ci-dessus à l'aide du logiciel Move. Un modèle géologique 3D offre les avantages suivants :

- Représentation spatiale tridimensionnelle ;
- Confrontation de la cohérence entre les coupes géologiques et l'écorché tectonique ;
- Validation d'un modèle tectonique régional solide ;
- Identification des incertitudes géométriques.

De plus, après l'intégration de données hydrogéologiques, le modèle permet le compartimentage des aquifères et l'identification des cibles. Le positionnement et le prédimensionnement d'un futur forage d'exploration/exploitation est ainsi grandement facilitée.

Le modèle géologique 3D permet ainsi l'élaboration d'un modèle conceptuel complet.

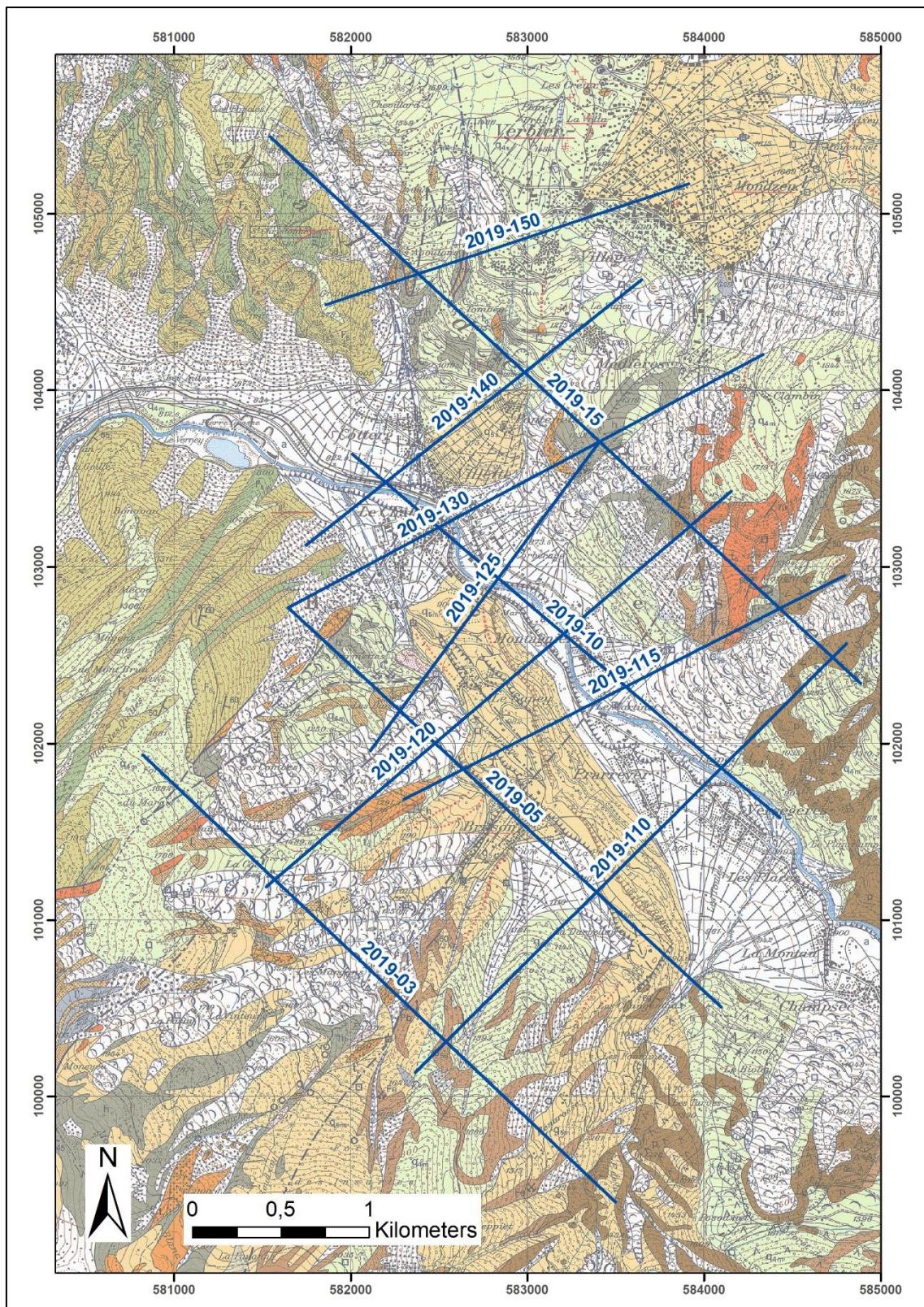


Figure 10 : Position des coupes géologiques ciblée sur le projet Curalatherm sur la carte 1325 Sembrancher de l'Atlas géologique de la Suisse au 1:25.000.



### 3.5 Hydrogéologie et hydrochimie

Pour préciser l'origine des eaux souterraines du Val de Bagnes et mieux identifier les systèmes hydrothermaux et une éventuelle relation entre ceux-ci, on a procédé, après compilation de toutes les analyses chimiques disponibles, à une interprétation des données hydrochimiques, selon les approches suivantes :

- Caractérisation du type d'eau, sur la base d'une représentation de type "camembert" de la concentration des ions majeurs exprimés en méq/l ;
- Représentation graphique x –y des principaux éléments chimiques en fonction du chlorure ou du sulfate. Cette méthode permet des déductions intéressantes sur les phénomènes de mélange des différents types d'eau entre eux. La variable en abscisse est représentée de préférence par le chlorure, ion non réactif qui ne peut subir que des phénomènes de concentration ou de dilution, sans échange ionique ni précipitation. Le sulfate est pris en considération quand la teneur en chlorure est trop faible ;
- Représentation graphique x – y des isotopes des sulfates, à savoir  $^{18}\text{O}$  et  $^{34}\text{S}$ , pour déterminer l'origine de l'anion et indirectement de la lithologie de l'aquifère :
  - Sulfate résultant d'une dissolution de roches évaporitiques, aquifères du Trias ;
  - Sulfate résultant de l'oxydation de sulfures, aquifères du Cristallin ou des calcaires ;

Un mélange entre les aquifères du Trias et les deux autres peut aussi, dans des conditions favorables, être mis en évidence.

## 4 Résultats et commentaires

### 4.1 Géophysique et toit du rocher

#### 4.1.1 Traitement des données de forages

Ce sont 363 forages qui ont été traités sur une surface entre le Col de la Croix de Cœur au Nord et le Six Blanc au Sud. Bon nombre de ces forages sont des sondes géothermiques. Il en ressort :

- 102 forages atteignent le toit du rocher, dont seulement 8 sont répertorié en fond de vallée. Les autres se situent à Verbier, où la densité des sondes géothermiques est la plus importante ;
- 28 forages atteignent des roches du Trias médian de la Zone Houillère. Un seul d'entre eux se situe en fond de vallée, il s'agit du forage SMA-1 ;
- 76 atteignent des schistes, des quartzites et des grès de la Zone Houillère. Pour rappel ces formations entourent la bande de « Trias médian » dont est issu le système thermal des Grangerets.

Ces forages apportent des informations précieuses sur la position de la bande de Trias sous la couverture quaternaire. Ceux qui l'ont atteinte permettent de situer ponctuellement sa position, les autres permettent d'exclure sa position dans des zones précises. Ces données permettent de mieux contraindre l'écorché tectonique. La position du gypse sous les terrains quaternaires révélée par certains forages implique l'existence de failles, comme c'est le cas pour la « faille de La Vella ». Malheureusement ces informations se concentrent essentiellement à Verbier, où la densité de forage le permet.



En fond de vallée, seuls quelques forages atteignent le rocher. Des indications importantes sur l'épaisseur des dépôts quaternaire peuvent en être tirées, permettant d'extrapoler le modèle du toit du rocher au-delà des tracés des lignes sismiques. Ainsi, à Montagnier, les forages SMA-1 atteint le toit du rocher à 273 m de profondeur. Le forage CHA-1 au Liappey atteint le toit du rocher à 108 m de profondeur. En direction du Sud-Est, vers la Montoz, le toit du rocher est atteint à seulement 73 m de profondeur. Le surcreusement glaciaire est donc plus important en direction du Châble. Il s'accentue même entre Versegères et Curala.

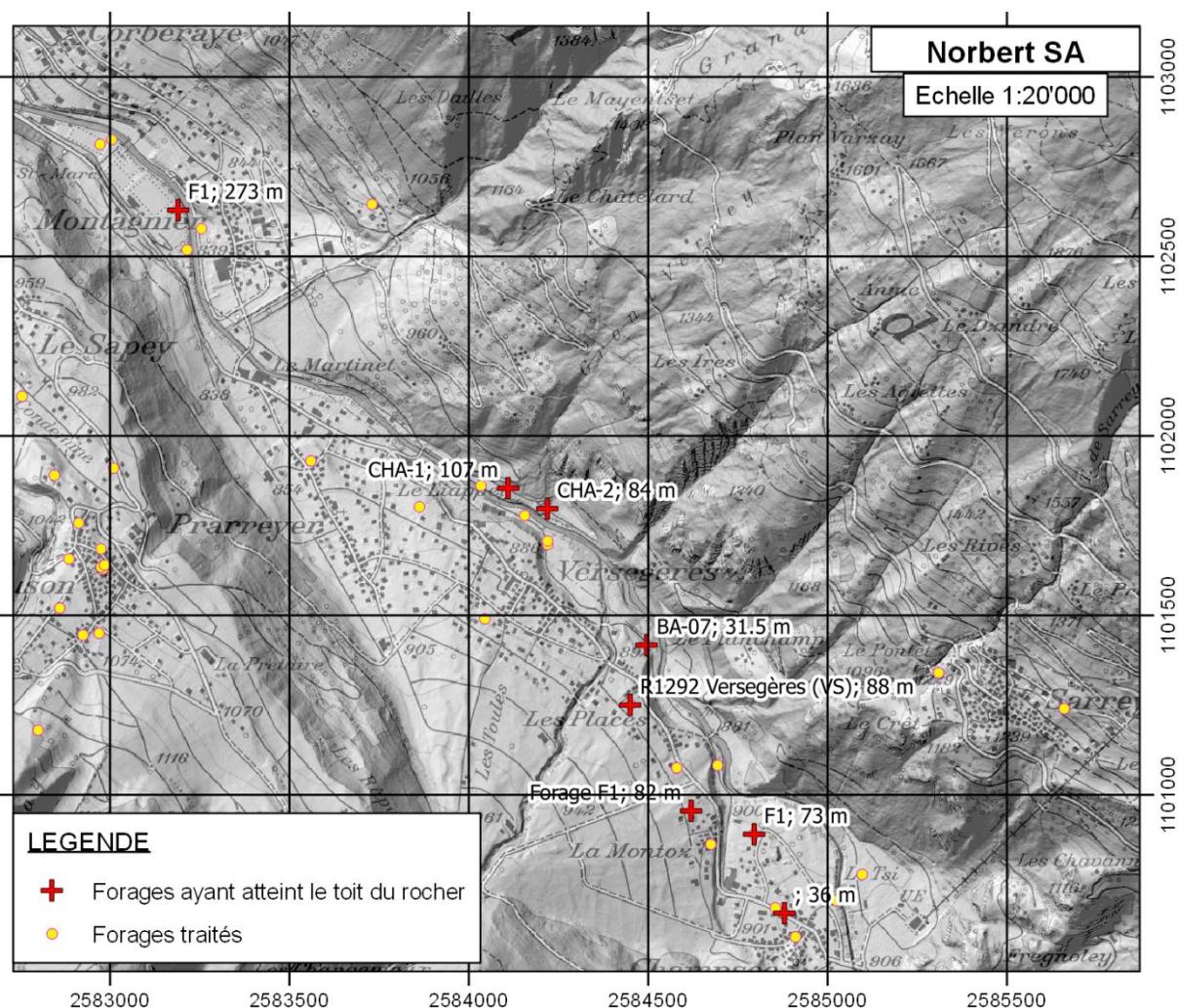


Figure 11: Forages du cadastre ayant atteint le toit du rocher avec indication de profondeur de celui-ci dans le Val de Bagnes.

#### 4.1.2 Campagne de géophysique

Les quatre profils de sismique réflexion obtenus montrent des résultats assez homogènes. Leur interprétation (Annexe 1) n'est univoque que pour la position du toit du rocher (Figure 12, Figure 13, Figure 14 et Figure 15) :

##### Toit du substratum rocheux :

L'interface sédiment quaternaire/toit du rocher correspond au réflecteur le mieux marqué. Il est visible sur tous les profils et il est toujours bien exprimé au centre de la vallée. En raison de la faible



extension des profils, sa position sur les bords de l'auge glaciaire est rendue moins explicite par les effets de bords de lignes. La profondeur de l'interface a pu être calibrée dans le profil P2 (Figure 13) grâce au forage SMA-1. Le résultat est très cohérent et un bon degré de confiance peut être attribué à l'interprétation profondeur du toit du rocher sur ces profils géophysiques. La présence d'étroits, et relativement profonds, chenaux fluviatiles sous-glaciaires n'est pas observable dans ces sections, mais ne peut pas être exclue sur cette base.

#### Réflecteurs dans les terrains superficiels :

Sur les profils P2 et P6, des réflecteurs montrent des structures qui peuvent être reliés à des interfaces dans les sédiments quaternaires. Sur le profil P2, ces réflecteurs peuvent coïncider à certains des fins niveaux limoneux et sablo-limoneux (épaisseur <10m) intercalés entre les épais niveaux de graviers dans la description du log SMA-1 (ALPGEO 2013). Le plus profond de ces niveaux (limons, sables limoneux et rares graviers à la profondeur de 190 m) semble pouvoir être corrélé entre les deux profils, soit sur une distance d'environ 500m. Une interface claire entre des graviers fluvioglaciaires, potentiellement présents au fond de l'auge, et un remplissage glaciogénique sus-jacent moins perméable n'est pas reconnaissable. La structure interne de la terrasse de kame de Bruson -Le Sapey n'est pas non plus clairement imagée.

#### Réflecteurs dans le substratum rocheux :

Sur chacun des profils P2, P3 et P4, un faible réflecteur avec un pendage apparent vers le NNE a été identifié par Geo2X dans le rocher. Une corrélation entre les 3 profils est cohérente, mais l'identification de ce réflecteur revêt un faible indice de confiance. Par hypothèse, ce réflecteur a été assimilé au contact du toit de la bande de gypse du « Trias médian » avec les schistes de la Zone Houillère interne, celui-ci constituant un des contrastes d'impédances le plus marquant régionalement.

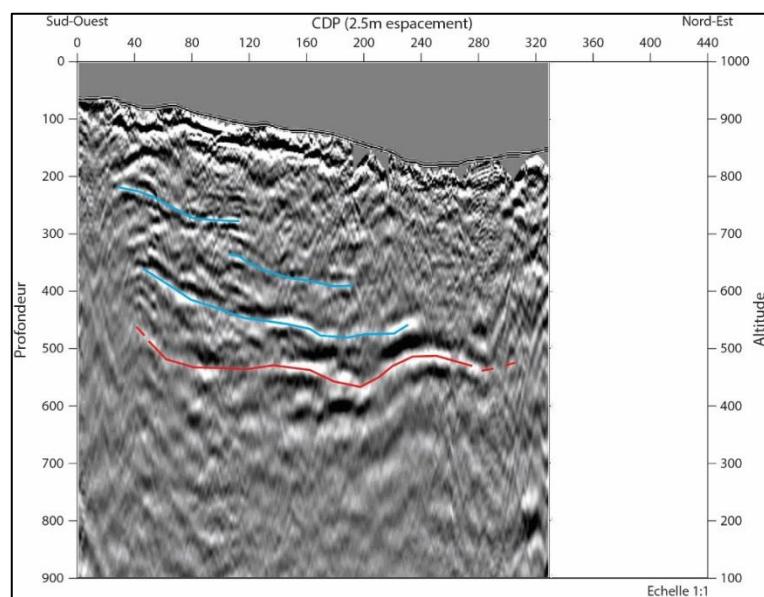


Figure 12 : Profil de sismique réflexion P6 converti en profondeur. Rouge : toit du rocher ; Bleu : réflecteurs intra-Quaternaire (Annexe 1).

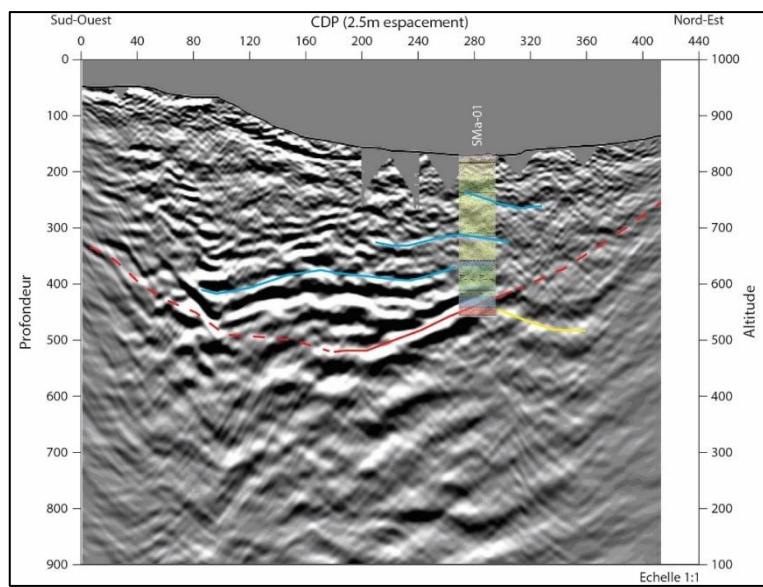


Figure 13 : Profil de sismique réflexion P2 converti en profondeur. Rouge : toit du rocher ; Bleu : réflecteurs intra-Quaternaire. Intraquaternaire ; Jaune : réflecteur intra-roche. Le log du forage SMA-1 (ALPGEO 2015-a) sert de référence (Annexe 1).

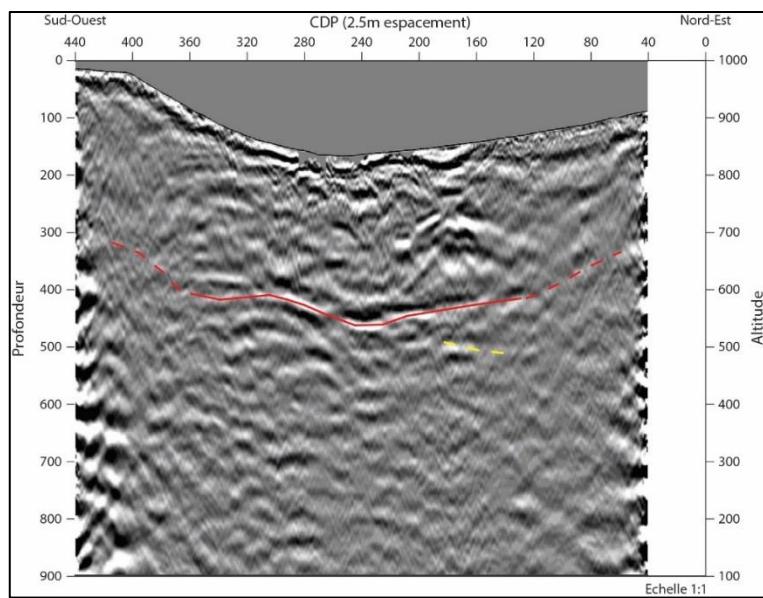


Figure 14 : Profil de sismique réflexion P3 converti en profondeur. Rouge : toit du rocher ; Jaune : réflecteur intra-roche (Annexe 1).

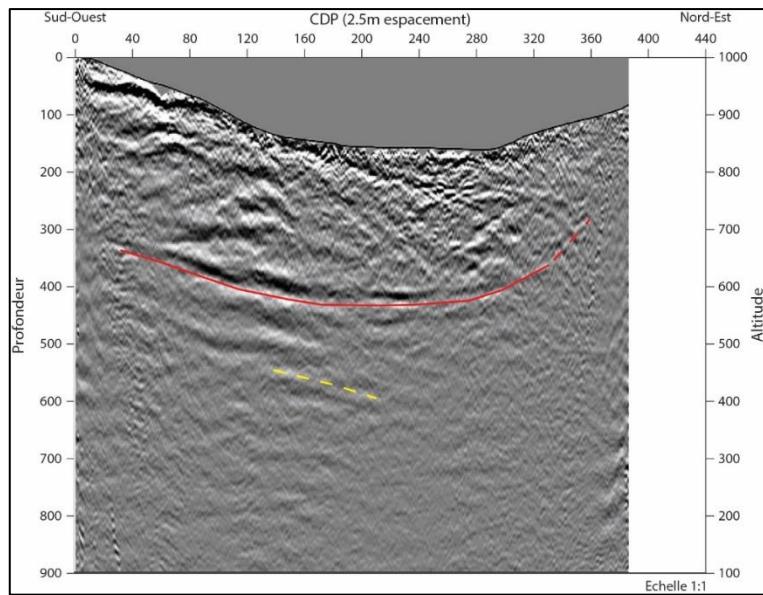


Figure 15 : Profil de sismique réflexion P4 converti en profondeur. Rouge : toit du rocher ; Jaune : réflecteur intra-rocher (Annexe 1)

#### 4.1.3 Modèle du toit du rocher

Le modèle du toit du rocher dans le fond de l'auge glaciaire (Figure 16) n'est suffisamment contraint qu'entre Le Châble et Prarreyer, grâce aux données de sismique réflexion et au forage SMA-1. Il est grossièrement contraint entre Prarreyer et Champsec par 6 forages ayant touché le rocher, tous situés en rive droite de la Dranse. Au droit du Châble et en aval du village, la position du toit du rocher n'est pas contrainte et le modèle est hypothétique.

La morphologie du toit du rocher correspond à celle d'une vallée glaciaire en U (Figure 17). Les versants sont relativement symétriques, à l'exception de la transversale du Châble où la base du versant en rive gauche est plus pentue. Entre Le Châble et Champsec, l'axe de la vallée est légèrement décalé en direction de la rive gauche par rapport au lit de la Dranse. Les altitudes au fond de l'auge glaciaire remontent progressivement de 400 msm au droit du Châble à 870 msm au droit de Champsec. L'épaisseur du remplissage sédimentaire de la vallée de la Dranse passe progressivement, d'après ce modèle (Figure 18), de 460 m au droit du Châble, à 80 au droit de Champsec.

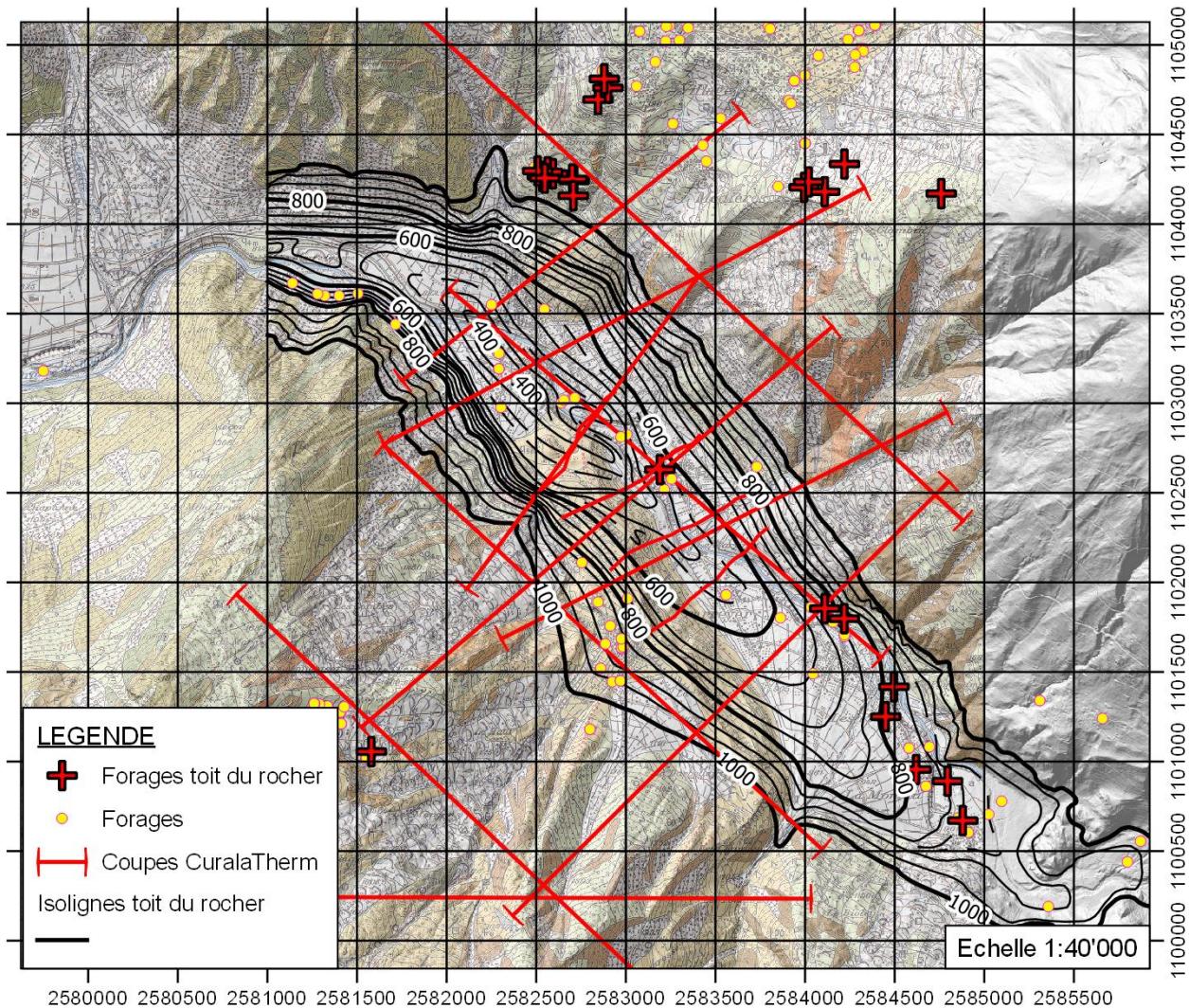


Figure 16 : Isohypse du toit du rocher dans le fond de la vallée selon le modèle établi et position des forages l'ayant atteint.

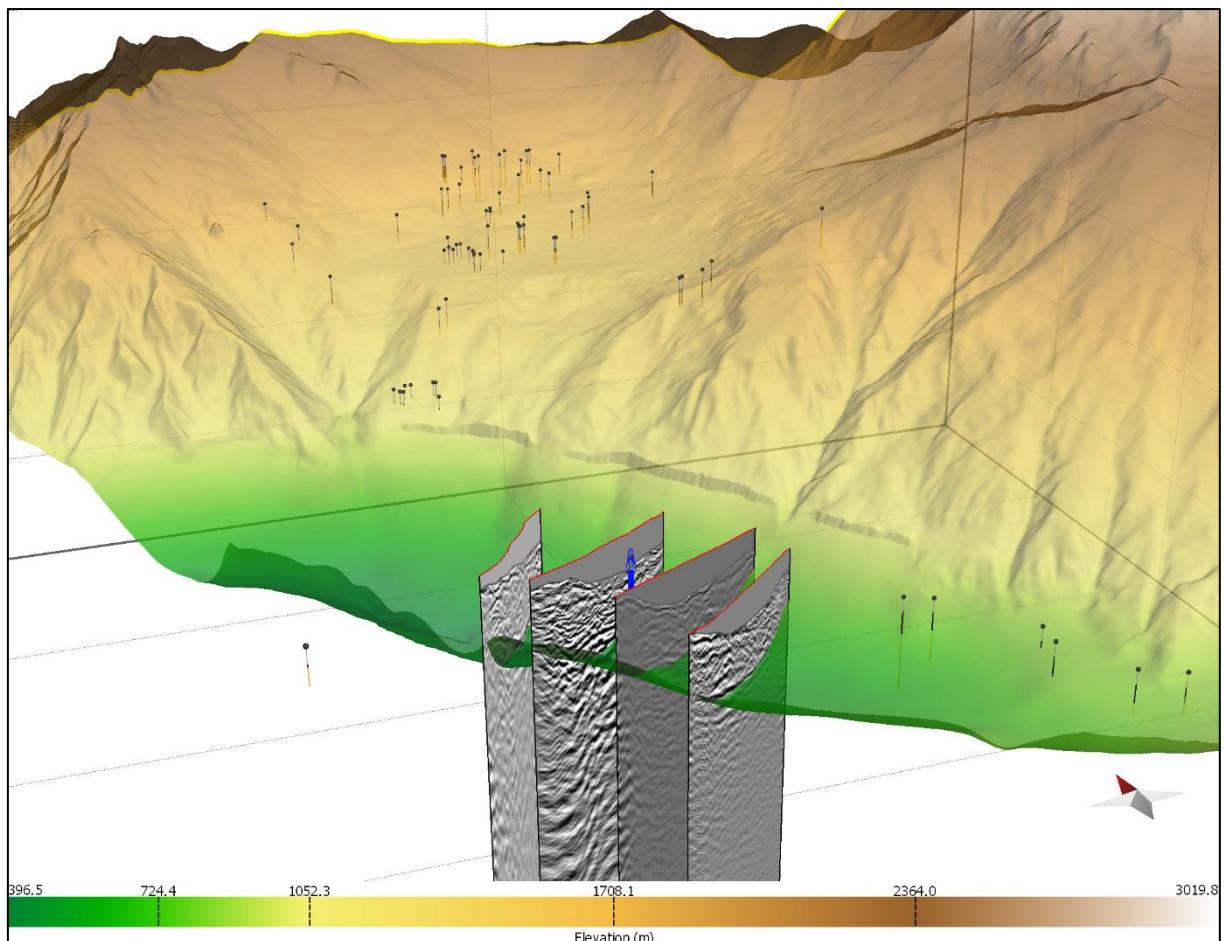


Figure 17 : Représentation 3D du modèle du toit du rocher avec les profils de réflexion sismique. Le rejet vertical entre la topographie et le modèle du toit du rocher est dû à un artéfact de la modélisation

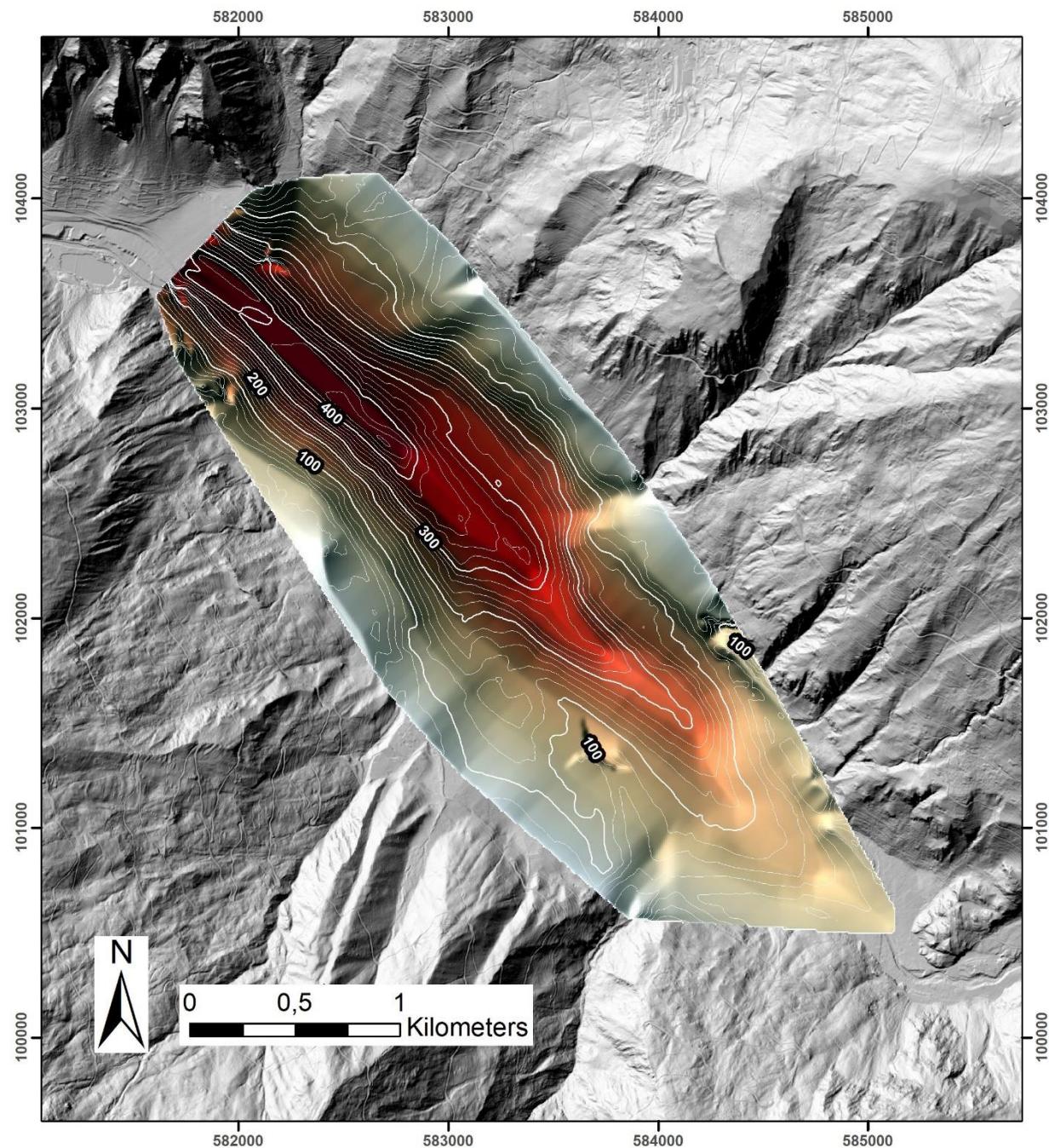


Figure 18 : Epaisseur du remplissage sédimentaire de l'auge glaciaire dans l'emprise du modèle du toit du rocher réalisé (intervalles des lignes isopaques : 20 m).

#### 4.2 Résultat des observations sur le terrain

Les principaux ajustements à la carte géologique Sembrancher concernent principalement le statut et la position de certaines limites d'unités tectoniques (Figure 19).

- Le contact entre l'Unité de la Pierre Avoi et la Zone Houillère interne a été simplifié dans la région du Tombey en rive droite de la Dranse et dans celle des Barmettes et de la Giette en rive gauche.



L'unité de la Pierre Avoi comporte parfois des blocs et écailles hectométriques de schistes houillers et de sédiments triasiques. De son côté, la Zone Houillère externe comporte des écailles de sédiments triasiques et probablement de flysch et de conglomérat de type Pierre Avoi. L'interprétation du contact entre ces unités est donc très aléatoire, a fortiori, l'identification de plis qui pourrait l'affecter. L'affleurement du Pessot, sur la route de Verbier, est important pour positionner cette limite, car il comporte un calcaire de type liasique qui ne semble exister que dans l'unité de la Pierre Avoi.

- Le secteur Le Châtelard – Les Dailles – Tsangremau – La Combe a fait l'objet d'une révision importante. La bande de schistes houillers passant par La Combe et qui surmonte les quartzites sur la carte de l'AG25 est constituée de micaschistes et de gneiss à chlorite. Elle a été attribuée à la Nappe du Ruitor. A l'inverse, des schistes sombres et des conglomérats affleurant dans le secteur des Dailles, localement très altérés par des fluides hydrothermaux, ont été attribués aux assises permiannes de la Zone Houillère interne plutôt qu'à la nappe du Ruitor, comme indiqué sur la carte Sembrancher.

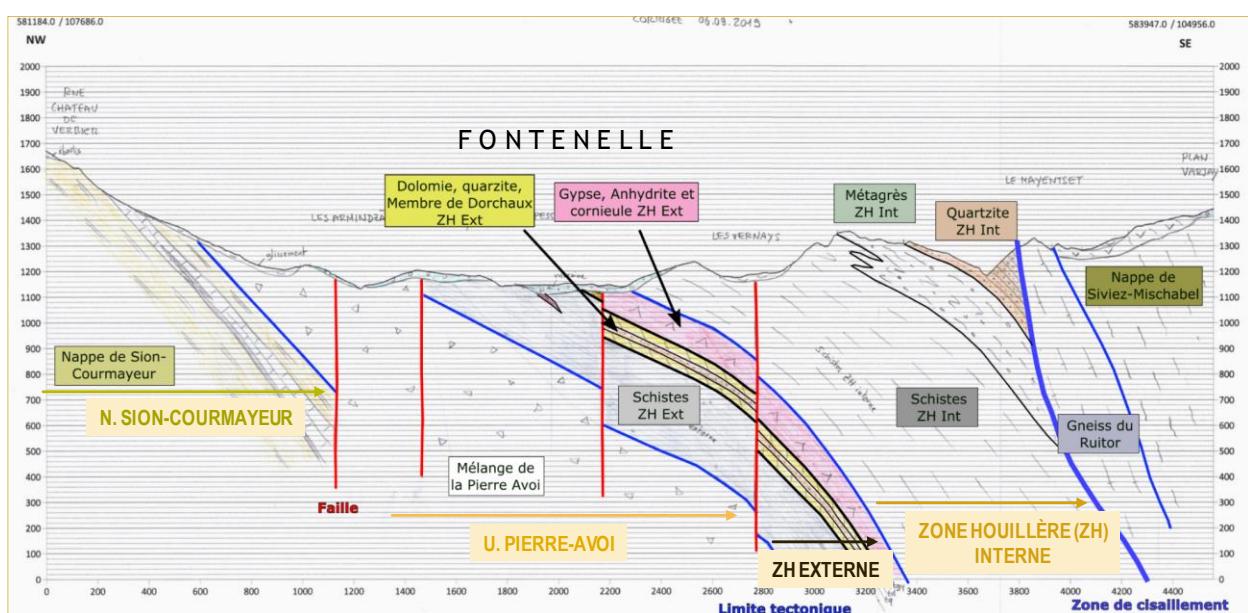


Figure 19: Contexte tectonique sur la coupe 015, passant par Fontenelle (altitudes et distances en m.).

Les mesures structurales acquises sur le terrain se sont attachées à préciser le pendage de certaines formations (schistes houillers et gypse du « Trias médian » à Fontanelle et à Eplane p. ex.). En raison de la rareté des affleurements favorable, une observation du réseau de fractures concernant directement le projet de géothermie n'a pu être entreprise que dans les schistes et grès houillers du secteur Fontenelle – Les Verneys (Figure 20). Des failles décimétriques subverticales, d'orientation E-W, ainsi que des failles d'orientation NE-SW pentées vers le SE peuvent y être observées. Ces orientations coïncident avec celles des failles plus étendues interprétées sur l'écorché tectonique. Des familles de joints d'orientation NNW-SSE et NE-SW sont présentes avec des espacements métriques à centimétriques.



Données structurales / Fontenelle - Les Vernays

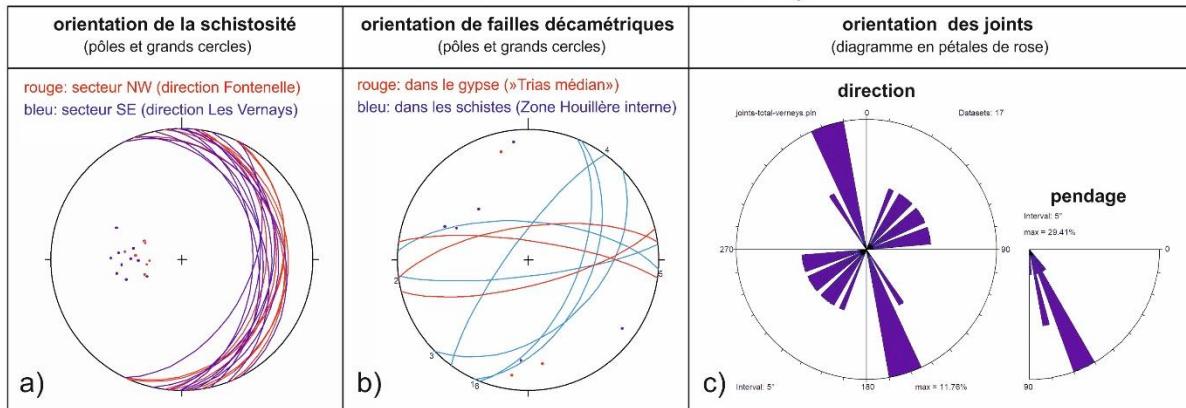


Figure 20 : Données structurales (canevas de Schmit / hémisphère inférieur / Tectonics FP) du secteur Fontenelle – Les Vernays. a) schistosité dans la base de la ZH interne b) failles décamétriques : une famille de failles d'orientation NE-SE est parallèle aux failles régionales, mais montre des pendages plus variés c) joints.

### 4.3 Ecorché tectonique

Quatre versions de la carte géologique au toit du substratum rocheux (« écorché tectonique ») ont été construites, mais deux d'entre elles seulement représentent des choix structuraux et des hypothèses très différents.

1. La version 1 (révisée en version 3 et version 4) (Annexe 2.2) est basée sur les corrélations suivantes :
  - La bande de gypse du « Trias médian » est continue en rive droite de la Dranse, mais décalée par trois failles d'orientation NE-SW (failles de La Vella, du Sapey et de Mondzeu) le gypse est flanqué à sa base par des écailles de quartzites et de dolomies dont la continuité est probablement moindre que ce qui a été représenté sur l'écorché tectonique.
  - C'est ce train d'écailles de quartzites triasiques qui aurait été atteint à l'extrémité du forage SMA-1 ;
  - La bande de gypse semble traverser le fond de l'auge glaciaire en amont du forage SMA-1. Un réflecteur observé sur trois des lignes de sismique réflexion (Figure 13, Figure 14 et Figure 15) pourrait éventuellement signer la position du toit de cette bande d'évaporites.
  - La bande de gypse du "Trias médian" est corrélée en rive droite avec celle d'Eplane-Pissevache ;
  - Une faille orientée parallèlement à l'axe de la vallée a été tracée (faille du Châble). Elle permet d'obtenir une meilleure corrélation de la bande de gypse sur les deux rives de la Dranse. Son existence, sa position et son extension sont très hypothétiques. Elle ne peut être observée nulle part en surface ;
  - La révision du secteur Le Châtelard permet de clarifier la disparition des quartzites de la Zone Houillère interne vers le SW et celle des gneiss de la nappe du Ruitor vers le NE. Un contact anormal "post-nappe" ("Zone de cisaillement du Châtelard") coupe obliquement ces nappes et serait responsable des discordances tectoniques observées. En amont de Bruson, en rive gauche, cette structure expliquerait également le recouvrement de la bande de gypse du "Trias médian" par la nappe du Ruitor, ainsi que sa réapparition dans la zone d'Eplane.



2. La version 2 de l'écorché tectonique est pour sa part basée sur les corrélations suivantes :

- La bande de gypse du "Trias médian", bien visible en rive droite de la Dranse, est corrélée en rive gauche avec la bande de couches triasiques de La Giette. Dans ce cas, le gypse se pincerait au passage de la vallée, car il est absent dans les affleurements de La Giette ;
- La conséquence de cette corrélation est que, plus haut dans le versant en rive droite, la Zone Houillère externe se pince contre l'unité de la Pierre Avoi. ;
- La bande de gypse d'Eplane constituerait la couverture triasique de la Zone Houillère interne. Une troisième unité de Zone Houillère surmonterait dans ce cas la Zone Houillère interne à l'E du Six-Blanc.

Les corrélations et les conséquences structurales imposés par la version 2 ont été jugées peu vraisemblables. Seule la version 4, issue de la version 1 après des corrections mineures, a finalement été retenue comme hypothèse structurale pertinente pour le projet.

#### 4.4 Coupes géologiques

Les 11 coupes géologiques croisées (Annexe 3), construites sur la base de la version 4 (Annexe 2) de l'écorché tectonique, décrivent la géométrie des unités penniques de part et d'autre de la vallée de la Dranse entre Le Châble et Versegères (Figure 21). La « colonne vertébrale » du modèle qu'elle décrit est constituée par la bande de terrains triasiques formant le "Trias médian". En rive droite, cet horizon est découpé par des failles transversales à la vallée (failles de La Vella, du Sapey et de Mondzeu) qui abaisse les compartiments vers le SE. Dans l'axe de la vallée, il serait décalé par la faille hypothétique du Châble avec un rejet apparent décrochant sénestre. En rive gauche, la bande de gypse serait localisée sous la terrasse fluvioglaciaire entre Prarreyer et Bruson. En amont de Bruson, elle semble masquée localement par la nappe du Ruitor à la faveur du contact discordant post-nappe ("Zone de cisaillement du Châtelard").



Figure 21 : Illustration 3D des coupes géologiques. Le « Trias médian » (en jaune, orange et rose sur les coupes) décrit la structure générale des unités Penniques.

Les incertitudes qui entachent ce modèle sont importantes. Elles concernent notamment :

- La position et l'épaisseur de la bande de gypse dans les zones à forte couverture quaternaire. Son pendage est aussi incertain en profondeur, loin de son intersection avec la topographie (cf. par ex. la coupe 015, où l'approfondissement rapide du gypse à l'extrémité SE de la section n'est pas démontré).
- La continuité des niveaux de quartzites et de dolomies (éventuellement accompagnées de schistes pélitiques et dolomitiques) à la base du niveau de gypse n'est représentée que comme solution graphique. Ces niveaux sont très certainement discontinus, localement absents, et peuvent présenter un ordre de superposition très variable.
- La position, le pendage, et pour certaines (failles du Châble et de Mondzeu) l'existence des failles cartographiées présentent des incertitudes importantes (Figure 22).

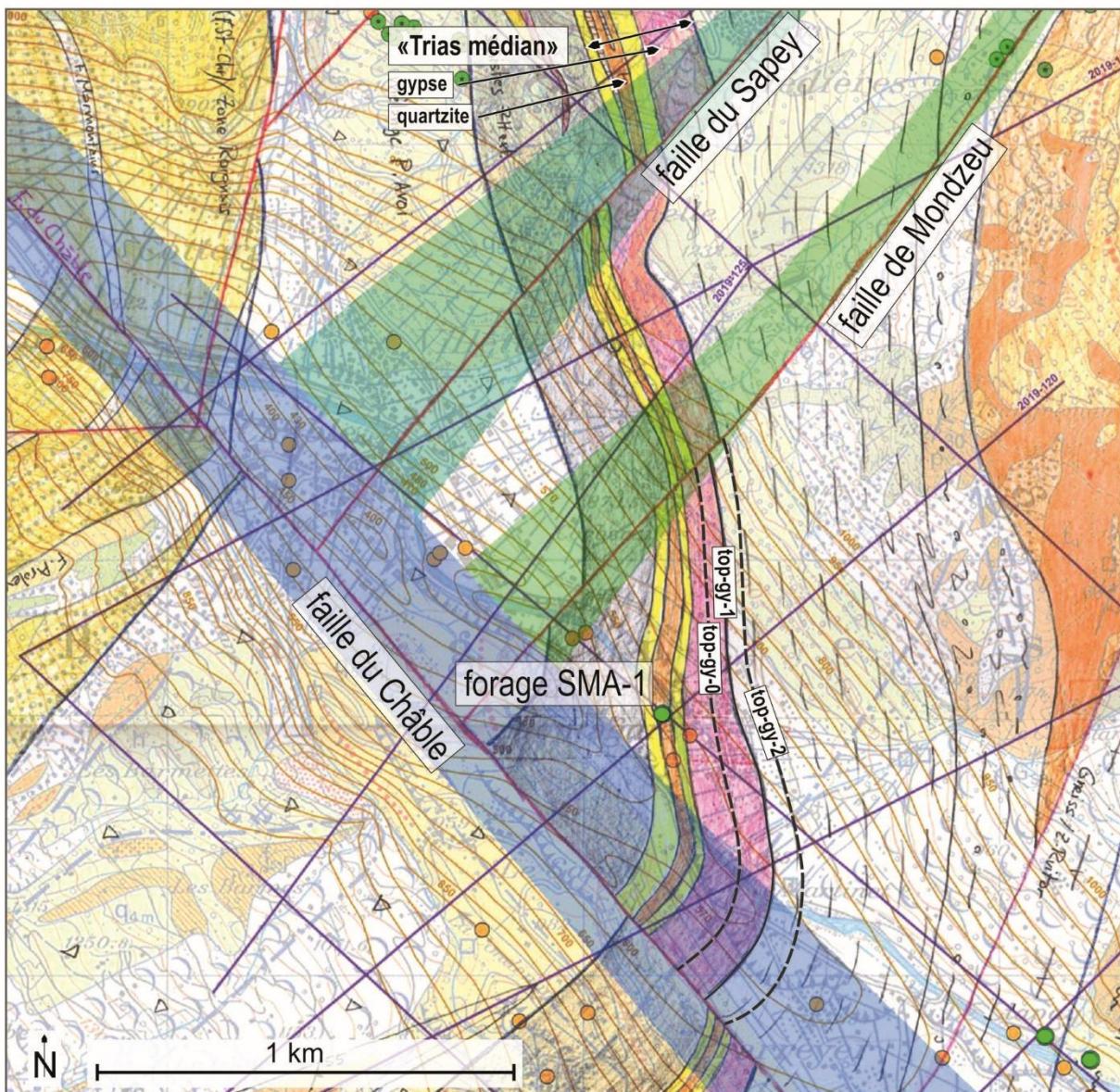


Figure 22 : Polygones d'incertitudes sur la position des failles représentée par les plages bleue (faille du Châble) et vertes (failles du Sapey et de Mondzeu). Illustration de l'incertitude sur la position du toit du gypse modélisé (top-gy-1) représenté par des traits tillés noirs (top-gy-0, top-gy-2). Cette incertitude découle des choix possibles dans l'interprétation des résultats du forage SMA-1 et de l'épaisseur variable de la bande de gypse.

L'hypothèse concernant l'identification des terrains au fond du forage SMA-1 est déterminante. Leur attribution aux quartzites écaillés à la base du gypse en position "Trias médian" au toit de la Zone Houillère externe, n'est pas univoque. Des écailles de quartzites de type triasique sont également présentes au sein même de la Zone Houillère externe (à la Tournelle p. ex.) et au sein de l'unité de la Pierre Avoi. Par contre, elles sont totalement absentes de la base de la Zone Houillère interne (qui contient pour sa part des grès quartzitiques verts, stratigraphiquement intercalés entre les grès et les schistes). Ces considérations impliquent que la bande de gypse du "Trias médian", si elle est continue, devrait recouper l'auge glaciaire soit directement en amont de SMA-1, selon l'attribution



l'hypothèse préconisée ici, ou plus en amont si les quartzites recoupés par SMA-1 ne se situent pas à la base du « Trias médian ». L'incertitude sur la position du gypse au fond de l'auge serait ainsi "bornée" en aval par SMA-1 (Figure 22).

#### 4.5 Modèle géologique 3D

Le modèle géologique surfacique 3D a été construit avec le logiciel Move. Les éléments suivants ont été utilisés pour la construction du modèle :

- Modèle du toit du rocher drapé sur la surface du toit du rocher
- Ecorché tectonique (Annexe 2)
- Pile lithostratigraphique (Annexe 2)
- 11 profils géologiques (Figure 10, Annexe 3).

La construction du modèle a débuté par la digitalisation des contacts des formations sur les profils et l'écorché tectonique. Les contacts ont ensuite été interpolés par triangulation de Delaunay. La qualité des surfaces obtenues est partiellement conditionnée par le nombre de points digitalisés. Les nombreuses coupes entrecroisées ont permis de bien contraindre le modèle. Les failles et les chevauchements ont été modélisés sur le même principe que les contacts des formations. Des profils auxiliaires ont été créés sur le tracé des plans de failles dans le but de conduire correctement l'interpolation des surfaces de couches jusqu'à la discontinuité.

Le modèle géologique 3D peut être consulté en Annexe 4 (disponible auprès du bureau Norbert SA à Martigny).

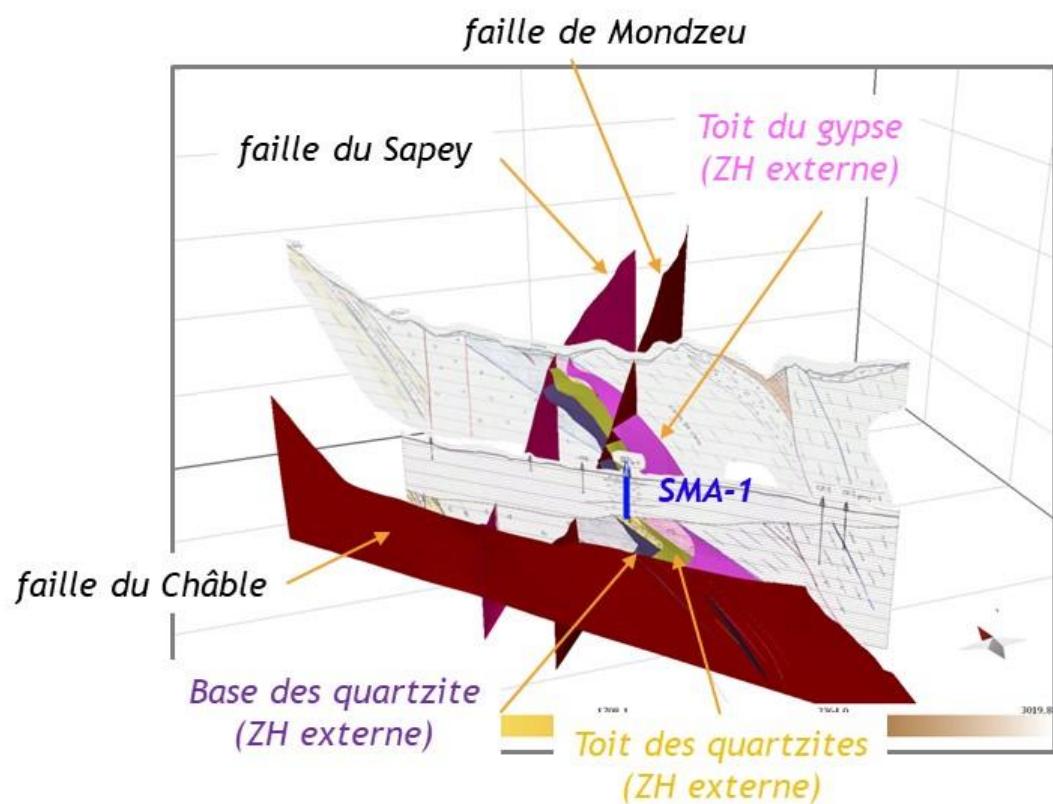
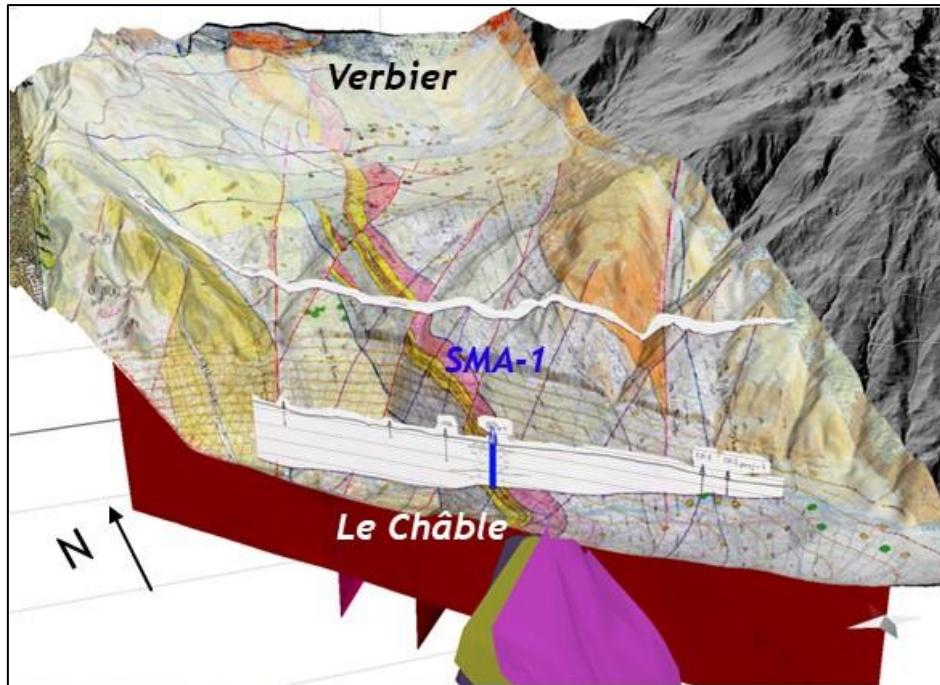


Figure 23 : Vues partielle du modèle géologique 3D. En haut : Ecchoré tectonique drapé sur le toit du rocher, coupe 010 dans l'axe de la vallée et position du forage SMA-1. En bas : Surfaces des failles et des horizons construites autour des coupes 010 et 020. La bande de gypse du « Trias médian » est inscrite entre les surfaces olive et rose.



## 4.6 Hydrochimie, origine des eaux souterraines et types d'aquifères

Les résultats des analyses chimiques figurent à l'Annexe 6, celles des analyses isotopiques à l'Annexe 7.

L'interprétation des analyses chimiques permet de mettre en évidence 6 typologies hydrochimiques différentes, sur la base de la concentration des ions majeurs exprimée en meq/l (Figure 24 et Figure 25, Tableau 3) :

- **0** Eaux froides de type bicarbonaté-calcique, peu minéralisées et bien oxygénées. Il s'agit de la nappe phréatique alimentée par la Dranse. Localement, on trouve des eaux beaucoup plus minéralisées et avec des températures subthermales, notamment sur le site de Curala (piézomètre BA-04 et fouilles, eaux de type **4**) et en aval (BA-01/02), sur le site St-Marc à Montagnier (puits St-Marc et forages SMA-1 et SMA-2, eaux de type **2**) et à Versegères (BA-07). Ces anomalies indiquent des mélanges avec des eaux tempérées provenant du soubassement rocheux au fond de l'auge glaciaire.
- **2** Eaux subthermales à thermales de type sulfaté calcique, assez minéralisées et peu oxygénées. Ces eaux ont circulé dans des aquifères karstiques/de fractures du « Trias médian » et ont lessivé surtout des roches à lithologie évaporitique (gypses). Des apports de ce type d'eau provenant de la profondeur s'observent dans les alluvions traversées par les forages SMA-1 et SMA-2 à Montagnier. Les sources subthermales des Grangerets représentent probablement l'exutoire de débordement de cet aquifère de roches du Trias.
- **3** Eaux subthermales à thermales de type sulfaté/chloruré-sodique/calcique, très fortement minéralisées et peu oxygénées. L'origine de ces eaux captées dans les quartzites fracturés du « Trias médian » (soubassement rocheux dans le forage SMA-1) n'est pas claire. Pour expliquer les fortes teneurs en Na et Cl, un lessivage d'halite est toutefois peu probable. Depuis novembre 2011, le forage SMA-1 draine des eaux en pression qui représentent un mélange entre des eaux de type **2** et **3**.
- **4** Eaux subthermales à thermales de type sulfaté/bicarbonaté-calcique/sodique, fortement minéralisées et peu oxygénées. La particularité de ces eaux rencontrées sur le site de Curala (piézomètre BA-04 et fouilles) et sous forme de mélange dans la nappe phréatique en aval (BA-01 et BA-02) est leur forte teneur en  $\text{HCO}_3$  (jusqu'à 1'000 mg/l !), ainsi que des concentrations très élevées en Fe et Mn dissous (jusqu'à 4 mg/l, respectivement 5 mg/l). Ces fortes teneurs ne peuvent s'expliquer que par un pH <7, qui leur confère un caractère agressif. Les eaux du glissement de Montagnon (Leytron), qui circulent dans des schistes argileux, montrent une composition chimique comparable. Ces eaux pourraient donc provenir des schistes carbonifères de la Zone Houillère et plus précisément d'une zone faillée qui recoupe ces formations peu perméables.
- **6** Eaux subthermales à thermales de type sulfaté-calcique/magnésien, moyennement minéralisées et oxygénées. Ces eaux proviennent de quartzites de la Zone Houillère et ne s'observent qu'aux sources du Châtelard.
- **7** Eaux subthermales et thermales de type sulfaté-sodique/calcique (forage CHA-1) ou sulfaté-calcique/magnésien (CHA-2), fortement minéralisées et peu oxygénées. Ces eaux circulent dans les gneiss fracturés du Ruitor, respectivement dans les quartz-schistes de la nappe de Siviez-Mischabel. Une interconnexion hydraulique a été mise en évidence entre ces deux aquifères.

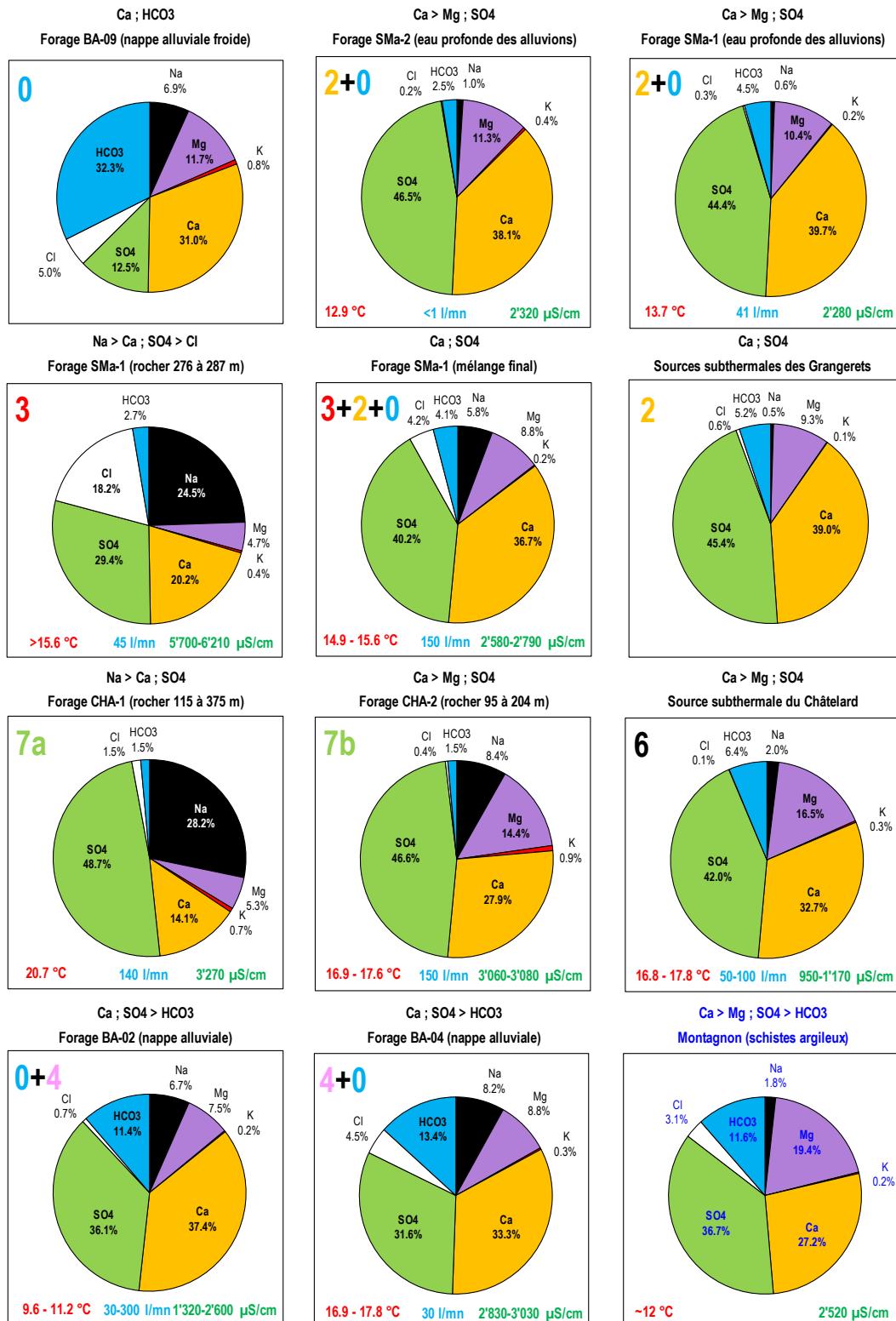


Figure 24 : Typologies hydrochimiques des eaux souterraines du Val de Bagnes. La chimie des eaux du glissement de Montagnon (schistes argileux à Leytron) est donnée à titre de comparaison pour comprendre l'origine des eaux de type 4 (teneurs élevées en HCO<sub>3</sub>, faille de Mondzeu).

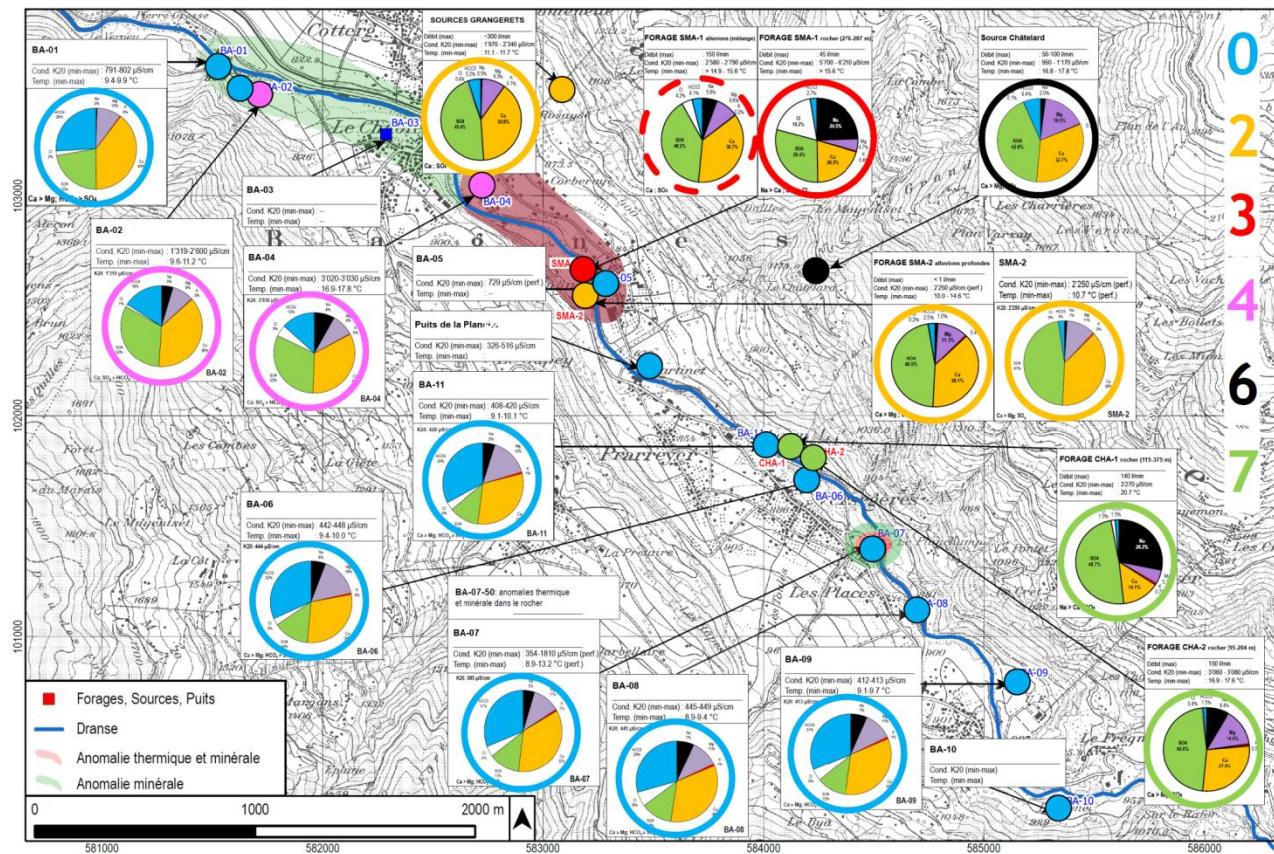


Figure 25 : Typologies hydrochimiques des eaux souterraines du Val de Bagnes et répartition géographique.

Les diagrammes x-y avec les teneurs des anions en fonction du sulfate et du chlorure apportent des informations supplémentaires, notamment concernant les mélanges entre les divers types d'eau et la relation entre les aquifères (Figure 26) :

- Les eaux de type **3** (eaux du rocher dans le forage SMA-1) et **6** (sources du Châtelard) ne se mélangent avec aucun autre type d'eau. Aucune relation ne peut être mise en évidence entre les eaux rencontrées dans les quartzites du « Trias médian » (eaux de type **3**) et celles qui ont circulé dans le gypse de cette formation géologique (eaux de type **2**). Le même discours vaut pour les eaux de type **6** et celles du type **7** (rocher des forages CHA-1 et CHA-2)
- Les eaux de type **0** montrent des droites de mélange avec les eaux de type **2** (gypse du « Trias médian »), le pôle froid et peu minéralisé étant représenté par les eaux de la Dranse.
- Des mélanges entre les eaux de type **4** et **2** ne sont pas du tout évidents (exception : diagramme Cl-Na)
- La plupart des diagrammes montrent un mélange entre les eaux de type **7** (rocher des forages CHA-1 et CHA-2), ce qui confirme la relation hydraulique entre des eaux circulant dans des roches différentes et avec une composition chimique légèrement différente.

Le plus étonnant est l'absence apparente de relation entre les eaux de type **2** et **3**, censées circuler dans des roches différentes, mais à faible distance au sein d'une même unité géologique (« Trias médian »). Un cloisonnement entre ces deux types d'aquifères est difficilement imaginable, mais reste possible. Seul un forage de reconnaissance profond et qui traversera la totalité de cette bande de roches triasiques au sommet de la Zone Houillère externe permettra d'y voir plus clair.

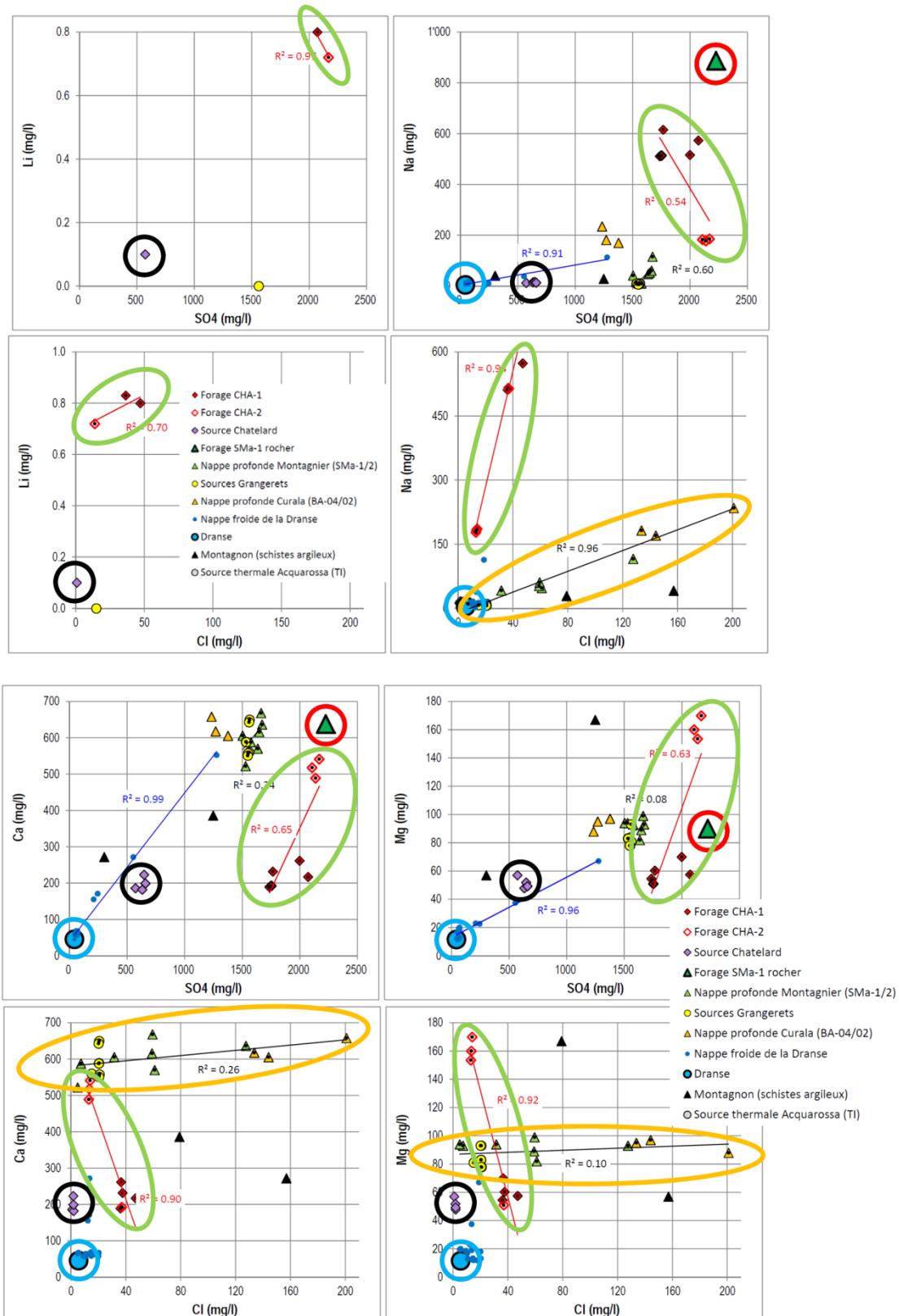


Figure 26 : Diagrammes x-y montrant les mélanges entre les différents types d'eau et aquifères.



La représentation graphique des isotopes des sulfates ( $^{34}\text{S}$  et  $^{18}\text{O}$ ) sur un diagramme x – y montre les résultats suivants (Figure 27) :

- Les eaux des sources des Grangerets (typologie hydrochimique 2) et du forage SMA-1 après équipement (mélange de 2 et 3) proviennent d'aquifères à lithologies évaporitiques. Elles se situent dans la plage des eaux thermales de Saillon (forage de 450 m), Leytron (source de la Salentse) et Val d'Illiez (Buchelieule). L'origine du « Trias médian » est donc confirmée.
- Les eaux des forages CHA-1 et CHA-2 (typologie 7) se situent à proximité d'une plage de mélange entre des eaux provenant d'aquifères à lithologies évaporitiques et des eaux qui ont circulé dans des roches du Cristallin ou d'autres types de roche. Les eaux des forages de Combioula (aquifère de roches du Trias) et du site thermal de St-Gervais (mélange entre des eaux de roches triasiques et des eaux du Cristallin) sont celles qui s'y apparentent le plus.

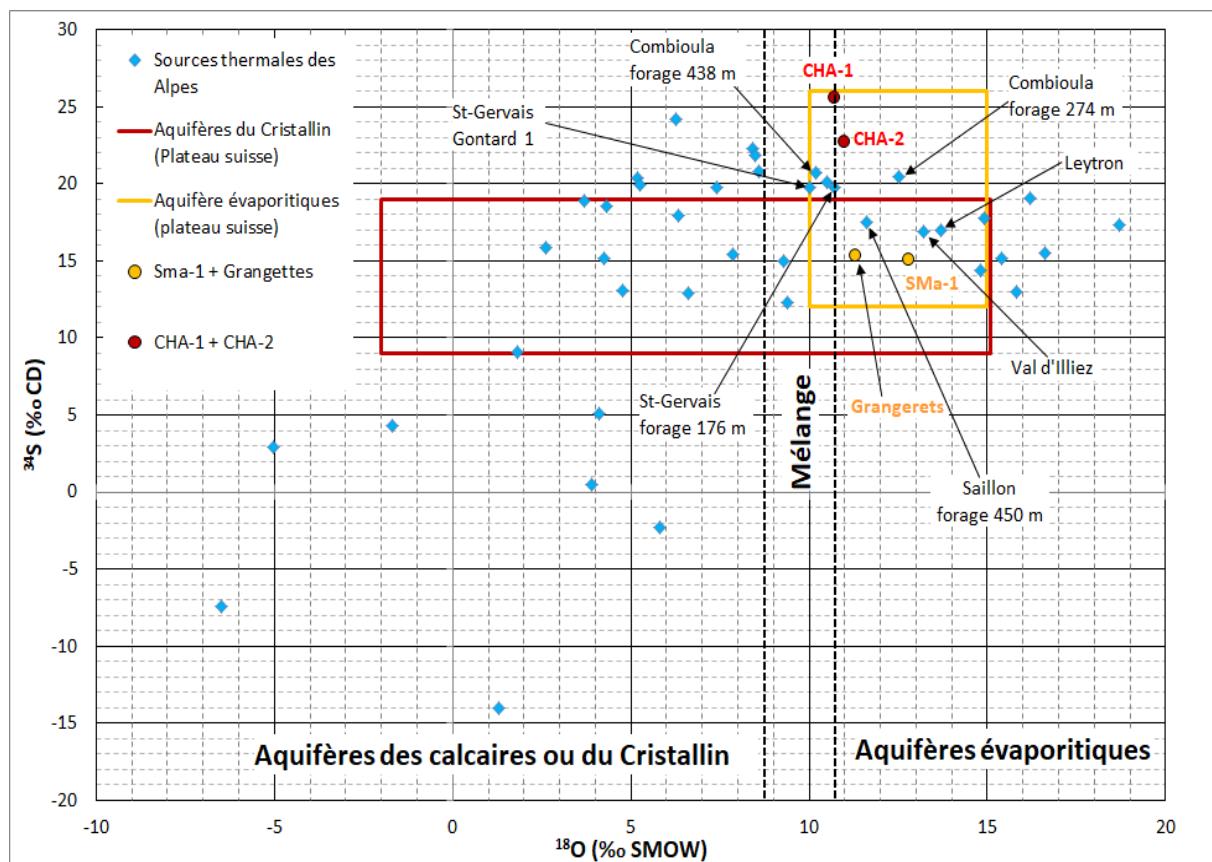


Figure 27 : Représentation des isotopes des sulfates sur un diagramme x – y. Les eaux des Grangerets et du forage SMA-1 équipé proviennent sûrement d'un aquifère à lithologies évaporitiques (roches du Trias).

## 5 Modèle conceptuel

### 5.1 Types d'aquifères

Les 8 aquifères suivants ont été distingués sur la base des typologies hydrochimiques (Tableau 3). Ils sont illustrés dans les modèles conceptuels hydrogéologiques en Figure 28 et Figure 29.



Tableau 3 : Typologies hydrochimiques, points d'eau et aquifères.

	Typologie hydrochimique	Points d'eau	Aquifères
0	Ca ; HCO <sub>3</sub>	Piézos peu profonds	Nappe phréatique, alluvions de la Dranse
1	Eaux du soubassement rocheux, dont certaines inconnues	Forage SMA-1	Fluvio-glaciaire au contact avec le soubassement rocheux
2	Na>Ca ; SO <sub>4</sub> >Cl	Sources Grangerets SMA-1/2 (alluvions)	Gypse « Trias médian »
3	Na>Ca ; SO <sub>4</sub> >Cl	Forage SMA-1 (rocher)	Quartzites « Trias médian »
4	Ca>Na ; SO <sub>4</sub> >HCO <sub>3</sub>	BA-04	Schistes carbonifères Zone Houillère (faille de Mondzeu)
5	Inconnue	Aucun	Faille du Châble
6	Ca>Mg ; SO <sub>4</sub>	Sources du Châtelard	Quartzites Zone Houillère
7	Na>Ca ; SO <sub>4</sub> et Ca>Mg ; SO <sub>4</sub>	Forages CHA-1 et CHA-2	Gneiss du Ruitor et quartz-schistes de la nappe de Siviez-Mischabel

Excepté l'aquifère de la nappe de la Dranse (0) qui est froid, tous les autres aquifères ont des caractéristiques subthermales à thermales. La nappe phréatique de la Dranse s'écoule en surface, a de bons débits, mais les températures ne sont pas importantes.

Les débits les plus importants rencontrés se situent à l'interface entre le rocher et les alluvions (1). Les températures y sont élevées (entre 15 et 18°C) de même que les débits (> 6 l/s). Cet aquifère correspond à l'hypothèse du drain fluvio-glaciaire profond (cf. chapitre 2.2). L'eau subthermale provient de résurgences des aquifères 2 et 3 à l'interface entre le quaternaire et le rocher sous la plaine alluviale.

L'aquifère 2 alimente les sources des Grangerets, point haut naturel du système hydrothermal, ainsi que des venues d'eau observées dans les alluvions du forage SMA-1. L'aquifère 2 se situe ainsi à l'amont du forage SMA-1. Un modèle conceptuel des écoulements depuis cet aquifère est illustré par la Figure 30.

L'aquifère 3 n'est observé que dans le rocher traversé par le forage SMA-1. Les débits jaillissants y sont relativement faibles (4 l/min). La température de l'eau se situe entre 15 et 18°C.

L'aquifère 4 est alimenté par la zone de fractures créée par la faille de Mondzeu. L'eau est drainée perpendiculairement à la vallée jusque dans les alluvions de la Dranse. L'eau circule en profondeur, ce qui permet d'expliquer les températures élevées et traverse entre autres les schistes carbonifères de la Zone Houillère, d'où elle tient sa chimie atypique.

L'aquifère 5 découle par défaut de l'aquifère 4. La présence d'une faille implique des zones fracturées où la perméabilité est meilleure. L'existence de la faille du Châble permet de drainer des eaux selon l'axe de la vallée.

L'aquifère 6 correspond à l'aquifère de la source subthermale du Châtelard. Cet aquifère n'est plus pertinent comme ressource géothermale pour le présent projet.

L'aquifère 7 est alimenté par des aquifères fracturés dans les Gneiss du Ruitor et les quartzites de la nappe de Siviez-Mischabel. Cet aquifère n'est plus pertinent comme ressource géothermale pour le présent projet en raison, entre autres, de sa distance aux utilisateurs et d'une mauvaise réalimentation.

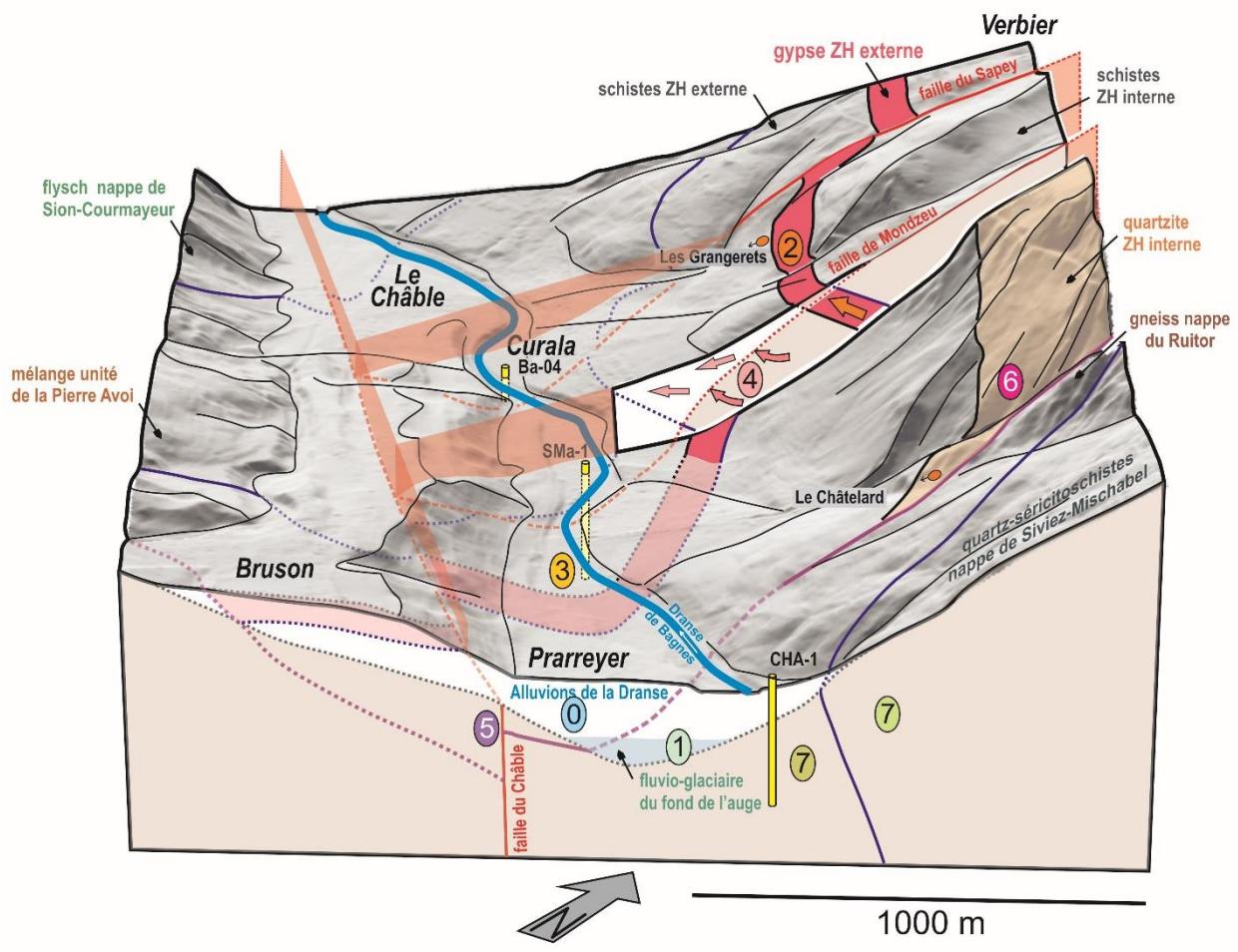


Figure 28: Aquifères du Val de Bagnes. La bande de gypse située au toit de la Zone Houillère externe (« Trias médian ») constitue le réservoir le plus continu. Elle est figurée en rouge. Son extension sous les sédiments quaternaires du fond de l'auge glaciaire est suggérée en transparence. Pour les numéros des aquifères, se référer au Tableau 3.

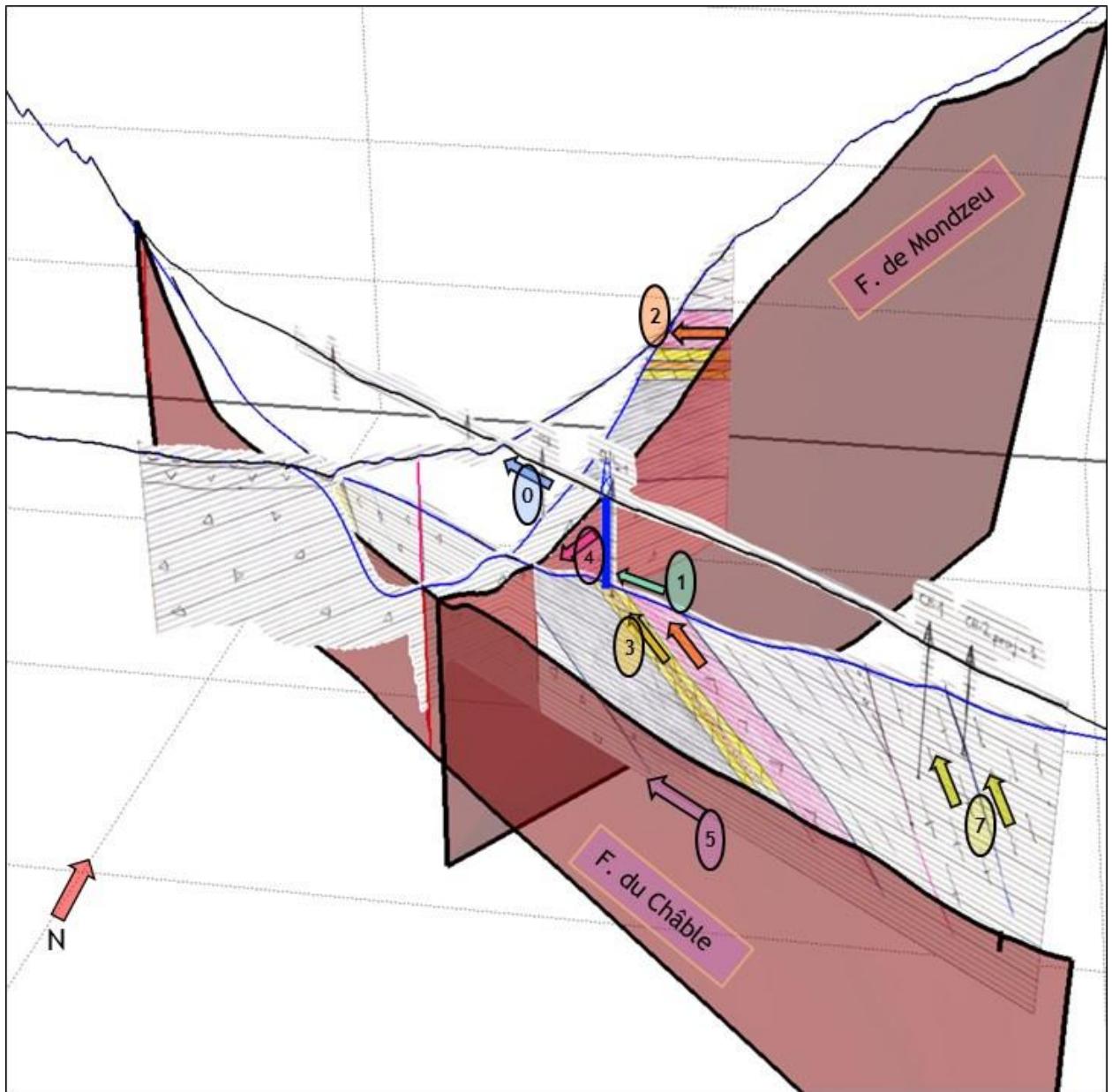


Figure 29 : Aquifères du Val de Bagnes figurés dans le modèle 3D avec les coupes 010 et 125. Les surfaces rouges constituent les failles supposées. Le remplissage sédimentaire de la vallée, rendu transparent, est traversé par le forage SMA-1 (barre bleue). La bande de gypse aquifère alimentant la source des Grangerets (2) recoupe le fond de la vallée en amont de SMA-1 et alimente potentiellement des graviers fluvio-glaciaires (1). Pour les numéros des autres aquifères, se référer au Tableau 3.

## 5.2 Modèle géothermal conceptuel

Pour son travail de master, M. Dorner a calculé, grâce à des mesures isotopiques de l'oxygène, l'altitude du bassin d'alimentation du gypse du « Trias médian ». Ce dernier se situe entre 2200 et 2500 m d'altitude, soit à l'altitude des affleurements les plus élevés de la bande de gypse à Savoleyres. La présence d'affleurements plus bas à l'Est, en direction d'Isérables, indique une limite de bassin et une divergence dans le sens d'écoulement. Le modèle situe ce point dans la région de la Tzoumaz. Cette situation est schématisée dans la Figure 30 qui montre la géométrie de la bande de



gypse, révélée par soustraction des unités sus-jacentes, et le modèle conceptuel de circulation dans l'aquifère.

L'eau s'infiltre ensuite en profondeur où elle se réchauffe pour atteindre 12° à la résurgence des Grangerets et 17° dans les alluvions de la Dranse.

Les failles du Sapey et de Mondzeu recoupent l'aquifère drainant les eaux vers la plaine alluviale de la Dranse. Les eaux qui auront circulé en profondeur avant d'être « captées » par les failles se déversent dans la plaine alluviale de la Dranse où des anomalies thermiques ont été observées (Piézomètre BA-04), et chimique (piézomètres BA-04, BA-02 et BA-01 en direction du Nord-Ouest) (Figure 5 et Annexe 5).

L'eau circule en profondeur jusqu'à la faille du Châble qui fait barrage. L'eau y est alors drainée dans un nouvel aquifère (5) et les sédiments quaternaires dans l'axe de la vallée. Les températures estimées à la faille du Châble seraient supérieures à 20°C.

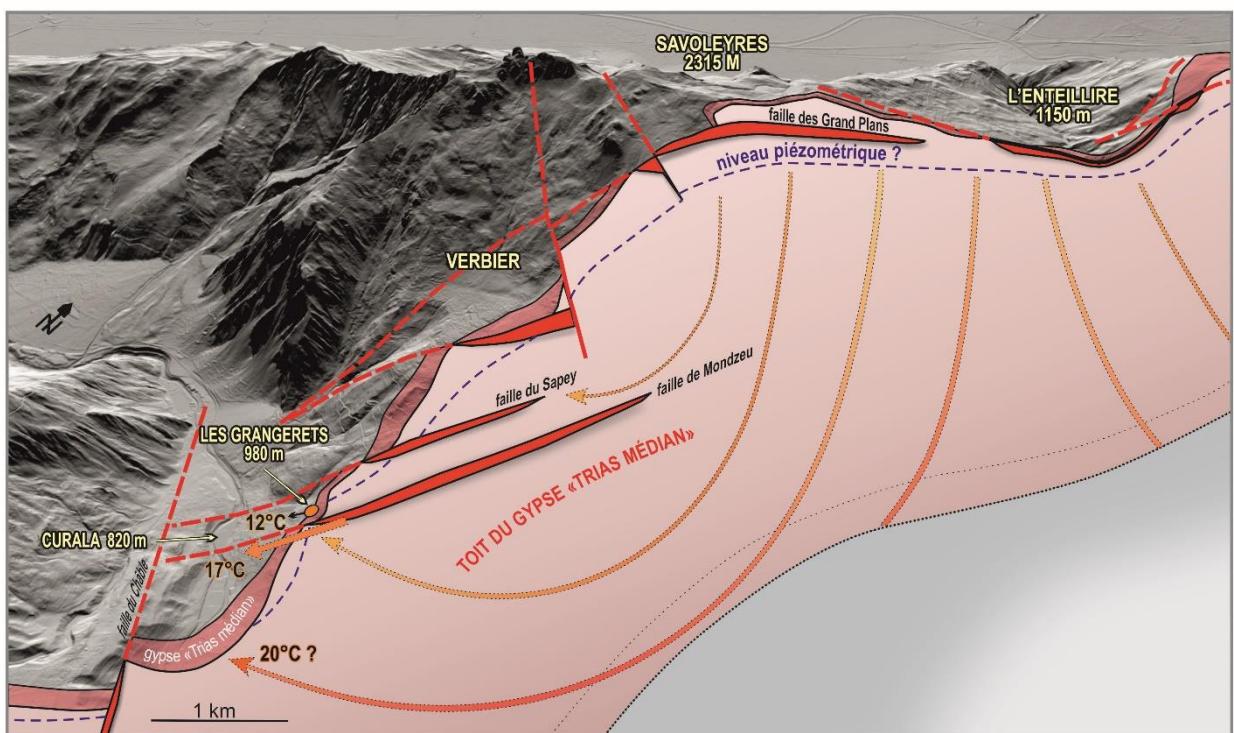


Figure 30 : Schéma conceptuel des circulations karstiques (flèches de couleur) dans la couche de gypse au sommet de la Zone Houillère externe. Le toit du gypse est dégagé et forme la surface de couleur saumon au premier plan. En rive droite de la Dranse de Bagnes, une partie des eaux thermales de ce « Trias médian » serait drainée par des failles transversales (surfaces rouges) et dirigées vers le fond de l'auge glaciaire avec des températures plus élevées que celles des sources des Grangerets.

## 6 Cibles aquifères

Chaque type d'aquifère est une cible géothermique potentielle. Tous ne remplissent malheureusement pas tous les critères pour une alimentation optimale en chaleur du futur quartier de Curala. Ils peuvent être caractérisées et évaluées de la manière suivante :



- Localement, l'aquifère **0** des alluvions de la Dranse (eaux froides) pourrait être exploité pour produire de la chaleur avec des PAC. Avec des débits de 4'000 à 10'000 l/min et un  $\Delta T$  de 3-4°C, des puissances thermiques comprises entre 1.5 et 3.9 MW<sub>th</sub> seraient disponibles (ALPGEO 2015-b). Toutefois, cette possibilité ne devrait être envisagée qu'en tant que plan B si l'exploitation des aquifères thermaux ne devait pas fournir des résultats satisfaisants
- Le même discours vaut aussi pour l'aquifère fluvio-glaciaire **1**, qui draine bien les aquifères du soubassement rocheux, mais qui refroidit aussi les eaux thermales profondes.
- Les aquifères karstiques et de fractures du « Trias médian » (**2 + 3**) sont bien documentés par plusieurs points d'eau. On peut s'attendre à des débits relativement élevés avec des températures >20°C.
- L'aquifère **4**, lié à la faille régionale supposée de Mondzeu, a été imaginé pour expliquer les remontées d'eau subthermale observée à Curala (forage BA-04). L'anomalie thermique se situe à proximité immédiate du site de Curala. Toutefois, les eaux souterraines sont très agressives et on peut s'attendre à des problèmes d'encrassement des échangeurs.
- L'aquifère **5**, lié à la faille régionale supposée du Châble, est hypothétique et n'est validé par aucun des points d'eau connus.
- Les aquifères **6** (quartzites de la Zone Houillère, source du Châtelard) et **7** (forage CHA-1 et CHA-2) ne doivent pas représenter une priorité pour l'exploitation de la géothermie dans le Val de Bagnes. D'une part, ils sont mal réalimentés. D'autre part ils sont assez éloignés du site de Curala.

La zone d'incertitude qui accompagne la position des failles englobe également une zone où la fracturation est plus importante en raison de leur proximité avec la faille. La perméabilité devrait augmenter autour de ces zones fragilisées. Ainsi, malgré une incertitude plus élevée, les zones de failles peuvent se révéler intéressante en terme d'exploitation géothermique.

Les cibles aquifères retenues sont les suivantes :

1. Aquifère fluvio-glaciaire : **1**
2. Trias médian : aquifères **2 + 3**
3. Faille de Mondzeu : aquifères **4**
4. Faille du Châble : **5**.

## 7 Choix des sites et prévisions énergétiques

### 7.1 Sites pour atteindre les cibles aquifères

Pour atteindre de manière optimale les cibles aquifères, il faut se déplacer en amont du site de Curala. Deux sites permettant d'atteindre plusieurs cibles aquifères se démarquent :

1. Site 1 (Prarreyer N) : Les cibles principales sont les aquifères karstiques et de fractures du « Trias médian » (**2 + 3**). Deux cibles secondaires peuvent être également visées, il s'agit de l'aquifère du fluvio-glaciaire (**1**) et l'aquifère de la faille du Châble (**5**).
2. Site 2 ("Abattoirs") : La cible principale correspond à l'aquifère de la faille de Mondzeu (**4**). Il s'agit ici de capter les eaux à l'origine de l'anomalie thermique à Curala (piézomètre BA-04). La cible est ici combinée à la cible aquifère de la faille du Châble (**5**). La cible secondaire correspond au sédiments fluvio-glaciaires (**1**). Ce dernier présente l'avantage d'être situé avec certitude à l'aval des résurgences des aquifères **2 + 3**.



Le plan de situation en Figure 31 indique l'emplacement des deux zones favorables à l'implantation d'un futur forage profond. L'incertitude sur la position des failles de Mondzeu (4) et du Châble (5) est élevée.

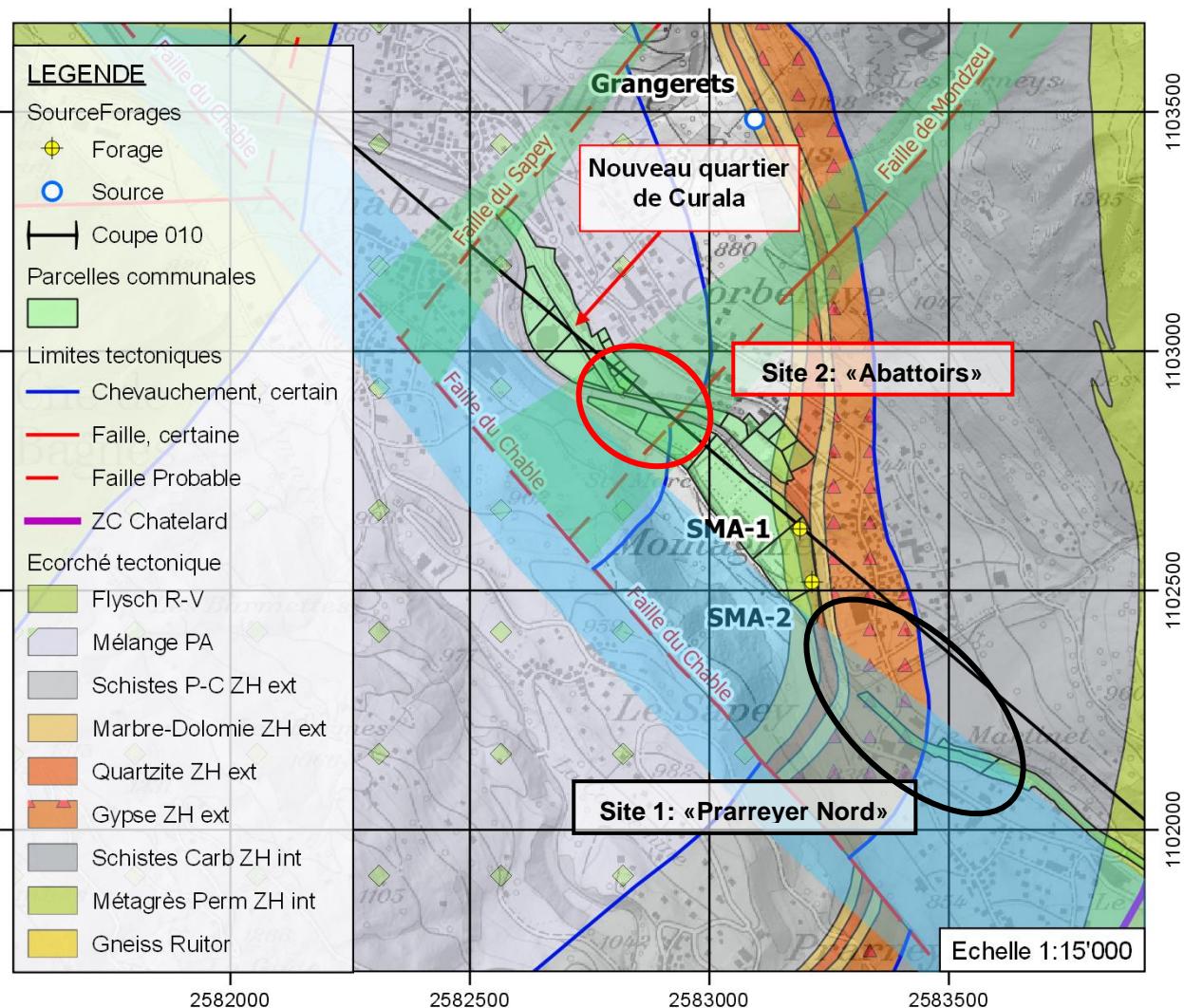


Figure 31: Plan de situation des deux sites sélectionnés pour l'implantation d'un futur forage d'exploitation géothermique. Le site 1 cible le gypse du « Trias médian », le site 2 cible la zone de dégâts de la faille de Mondzeu. Les domaines d'incertitude sur la position des failles du Châble et de Mondzeu sont représentés en bleu et en vert. Les sites 1 et 2 sont marqués par des ellipses.

Les cibles des deux sites peuvent être visualisées sur une coupe passant dans l'axe de la vallée de la Dranse (Figure 32). Elle permet de bien illustrer le fait que chaque site permet de viser plusieurs cibles potentielles.

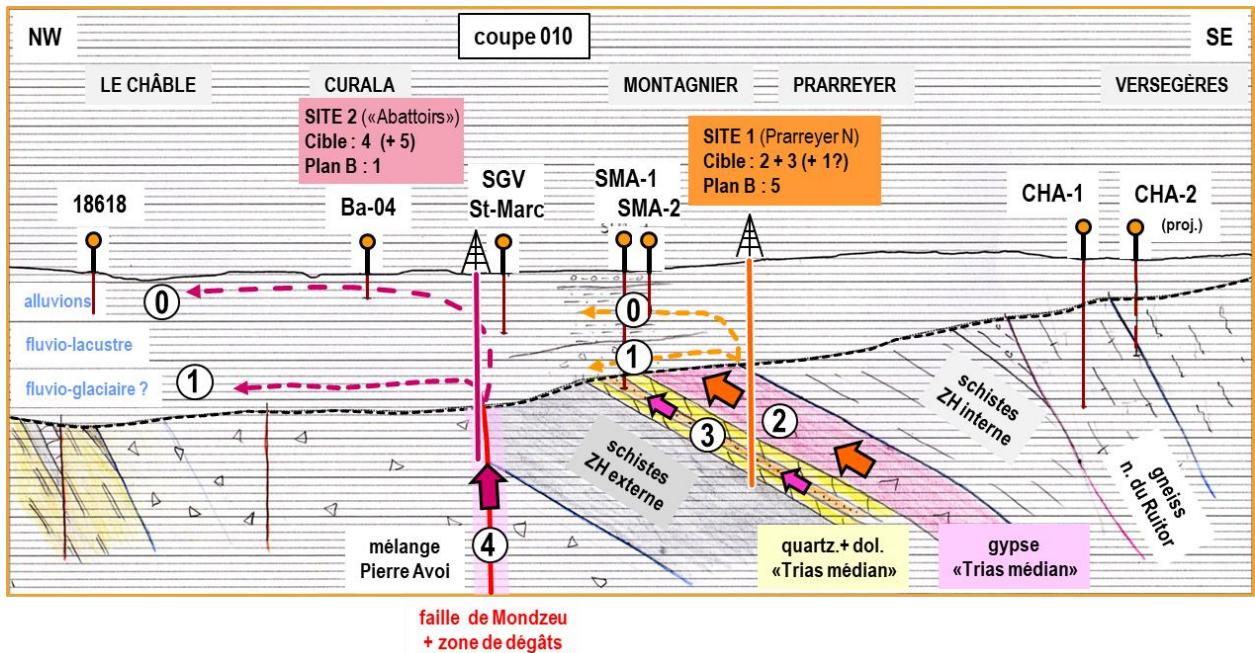


Figure 32 : Situation des cibles aquifères dans l'axe de la vallée et position des sites potentiel d'exploitation (pour les numéros des aquifères, se référer au Tableau 3). La cible 5 n'est pas représentée car parallèle à l'axe de la coupe géologique.

## 7.2 Prévisions énergétiques

Sur la base de prévisions raisonnables de débit (pompage avec une pompe immergée) et de température (gradients géothermiques de l'ordre de  $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ) des eaux souterraines, les puissances thermiques suivantes peuvent être envisagées pour les deux sites retenus (Tableau 4) :

- Site 1 – Prarreyer – Aquifère du « Trias médian » : 0.9 à 1.3 MW<sub>th</sub> (puits de 500 à 550 m)
- Site 2 – Abattoirs – Aquifère de la faille de Mondzeu : 0.5 à 0.7 MW<sub>th</sub> (puits de 450 à 500 m)



Tableau 4: Puissances thermiques calculées sur la base des prévisions de débit et température (best case et worst case). On suppose un rejet des eaux à une température de 4-5°C après valorisation thermique.

		Débit [ l/mn ]	Débit [ l/s ]	Pompe immergée	Diam. min crépines	°T eau [ °C ]	ΔT [ °C ]	P <sub>géotherm.</sub> [ kW ]	P <sub>installée</sub> [ MW ]	Equivalents logements
Site 1 - Prarreyer Puits de 500-550 m	B1) 1 puits <i>best case</i>	900	15.0	6"	176 mm	20.0	15.0	942 kW	<u>1.3 MW</u>	239
	B2) 1 puits <i>worst case</i>	500	8.3	6"	176 mm	23.0	19.0	663 kW	<u>0.9 MW</u>	168
Site 2 - Abattoirs Puits de 450-500 m	C1) 1 puits <i>best case</i>	350	5.8	6"	176 mm	24.0	20.0	488 kW	<u>0.7 MW</u>	124
	C2) 1 puits <i>worst case</i>	250	4.2	4"	115 mm	27.0	23.0	401 kW	<u>0.5 MW</u>	102

On prévoit des températures plus élevées pour le site 2, en raison d'une origine supposée plus profonde des eaux souterraines (faille). Par contre, le débit est inférieur à celui attendu dans l'aquifère du « Trias médian ».

### 7.3 Évaluation des sites

Les deux sites permettant d'atteindre les cibles géothermiques profondes ont été évalués et comparés sur la base de plusieurs paramètres (Tableau 5).

Tableau 5 : Evaluation des deux sites proposés pour la réalisation d'un puits d'exploitation

	Site 1 Prarreyer N « Trias médian »	Site 2 "Abattoirs" Failles
Coûts forage	—	—
Distance utilisateurs	—	++
Chimisme de l'eau (PAC)	+	—
Fiabilité de la cible	+	--
Débit attendu	++	—
Température de l'eau	=	+
Potentiel thermique	++	=
<b>Evaluation</b>	<b>4+</b>	<b>2-</b>



En termes de coûts globaux, le site 1 est désavantage par rapport au site 2. Les coûts des deux forages devraient être similaires : la profondeur ainsi que la couverture quaternaire, représentant le défi technique, diffèrent très peu. La grande différence réside dans la distance aux utilisateurs. En effet, le site 1 se situe à près d'un kilomètre du futur quartier. Des coûts annexes liés à l'acheminement de l'eau chaude auront un impact sur le budget global.

La chimie des eaux (cf. chapitre 4.6), montre que les eaux associées au piézomètre BA-04 sont très agressives. Les risques d'encrustement des échangeurs à l'entrée des PAC sont importants ce qui n'est pas le cas pour les eaux associées au forage SMA-1, cibles du site 1.

La cible principale du site 1 est constituée par la bande de gypse-anhydrite du « Trias médian ». Cela signifie que l'admissibilité d'un projet de forage sur ce site devra être discutée avec les services cantonaux concernés.

L'incertitude liée au site 2 est très importante car elle est principalement associée à la position des failles, qui restent, malgré tout, hypothétiques (cf. chapitre 4.4, Figure 22).

Comme le montre le Tableau 4, le potentiel thermique est meilleur pour le site 1. Le « worst case » du site 1 est meilleur que le « best case » du site 2, ceci en raison des débits attendus.

Ainsi, le site N°1 Prarreyer N (aquifère du « Trias médian ») résulte comme nettement plus favorable, malgré une plus grande distance des utilisateurs à Curala.

## 7.4 Prévision pour le site Prarreyer N

Le site de Prarreyer N présente le meilleur potentiel géothermique. Les prévisions suivantes seraient faites pour un forage sur la parcelle communale 11'367, à l'emplacement du puits de la Planche :

- 0 – 241 m : Alluvions de la Dranse et sédiments glaciaires
- 241 – 271 m : Sédiments fluvio-glaciaires, cible 1 (puissance estimée sur le log du forage SMA-1)
- 271 – 303 m : Schistes permo-carbonifères de la Zone Houillère externe
- 303 – 463 m : Gypse du Trias médian, cible 2
- 463 – 589 m : Marbres dolomitiques et quartzites de la zone Houillère externe, cible 3
- 589 - >... : Schistes permo-carbonifères de la zone Houillère externe

Un forage de 550-600 m de profondeur traverserait ainsi les cibles aquifères 1, 2 et 3.

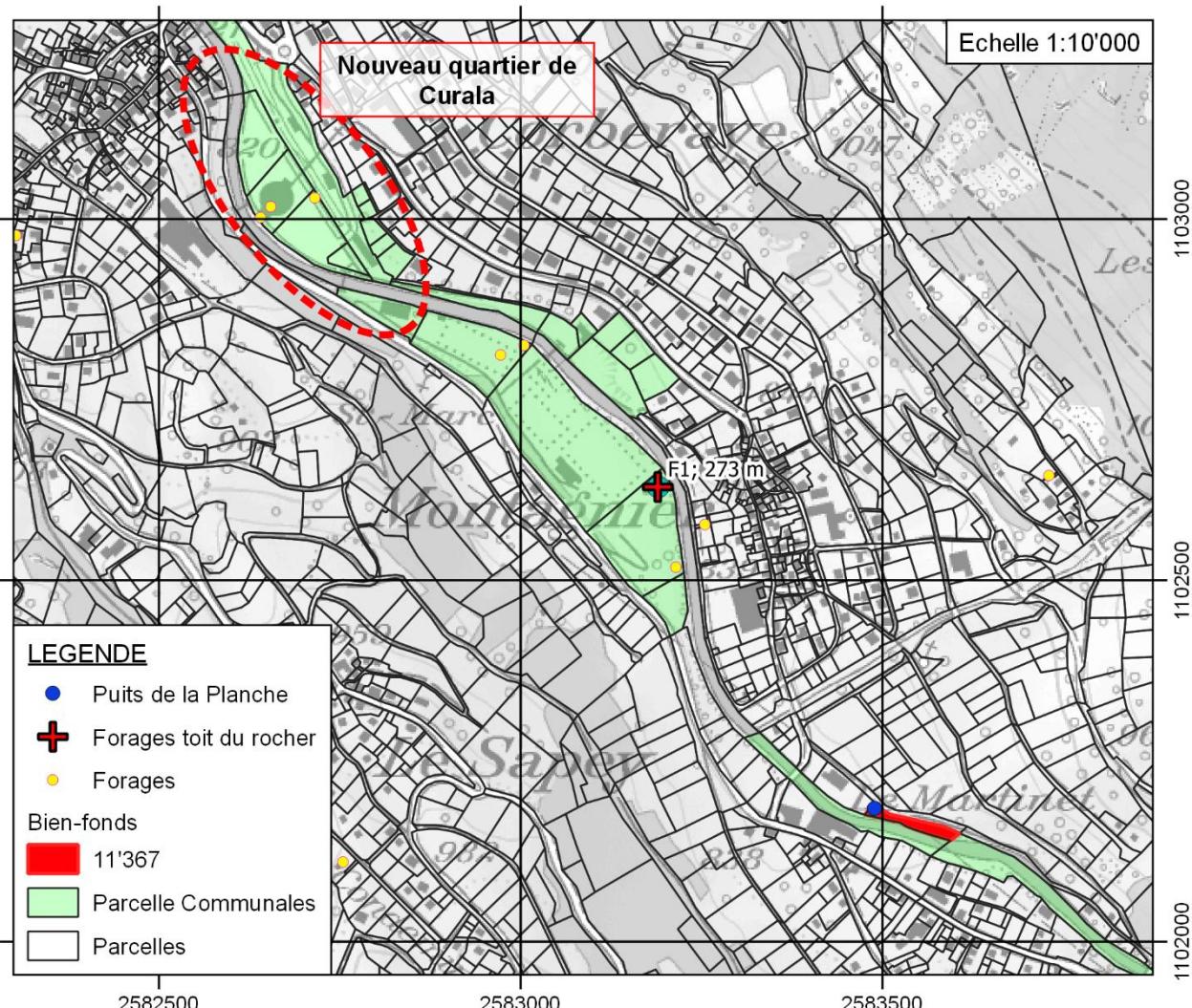


Figure 33: Site N° 1 : proposition d'implantation d'un forage sur la parcelle communale 11'367 (en rouge, secteur « Le Martinet »).

## 8 Conclusions et résumé

### Apports de la campagne de sismique réflexion

Les résultats de quatre profils de sismique-réflexion perpendiculaires à la vallée de la Dranse, répartis entre Le Châble et Bruson, ont permis de modéliser le toit du rocher. Les données du forage SMA-1 ont été utilisées pour caler les horizons en profondeur et procurent une bonne fiabilité à ce modèle. La profondeur du toit du substratum rocheux passe progressivement de 80 m au droit de Champsec à plus de 400 m au droit du Châble. Ces résultats démontrent l'épaisseur exceptionnelle du remplissage sédimentaire de la vallée et l'importance de disposer d'un modèle du toit du rocher pour pronostiquer la position de cibles géothermiques potentielles.



### Apports de l'analyse géologique et structurale

Les unités tectoniques penniques présentes dans le Val de Bagnes, ont subi plusieurs phases de déformation et les géométries résultantes sont généralement non cylindriques. La réalisation de 11 coupes croisées et de cartes d'écorché tectonique a été nécessaire pour construire plusieurs versions possibles du modèle géologique régional. L'acquisition de données de terrain ponctuelles supplémentaires a permis de choisir la plus cohérente de ces versions et de désigner le modèle de référence adapté à la caractérisation des aquifères. Il prédit en particuliers la localisation de la bande de gypse du «Trias médian» sous les terrains quaternaires, mais il n'est pas exempt d'incertitudes.

### Apports de la modélisation 3D

Les données géologiques structurales ont fait l'objet d'une modélisation numérique 3D à l'aide du logiciel MOVE. Dans un premier temps, cette démarche a permis de déceler les incohérences géométriques qui pouvaient exister entre les coupes géologiques et les cartes d'écorché tectonique. Plusieurs itérations ont permis d'aboutir à un modèle satisfaisant. Dans un deuxième temps, les surfaces géologiques principales (toit du rocher, horizons géologiques, failles) ont été interpolées en 3D. Le modèle obtenu permet de déterminer de manière prédictive la profondeur de cibles potentielles pour une trajectoire de forage donnée.

### Apports de l'étude hydrogéologique

La réalisation de nouvelles analyses et la compilation de toutes les données hydrochimiques disponibles a permis de préciser l'origine des eaux souterraines et de mieux identifier les systèmes hydrothermaux du Val de Bagnes. Les types d'eaux ont été caractérisés sur la base des ions majeurs. Des relations ont été établies sur la base de droites de mélanges et les aquifères concernés ont été différenciés en fonction des isotopes des sulfates  $^{18}\text{O}$  et  $^{34}\text{S}$ . De cette manière, 6 typologies hydrochimiques ont pu être identifiées. Ces eaux montrent un éventail de conductivité électrique allant d'environ 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (nappe de la Dranse) à plus de 6'000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (eaux du rocher dans le forage SMA-1). Les températures de ces eaux s'échelonnent entre environ 9°C (nappe de la Dranse) et 20.7 °C (eau du rocher dans CHA-1).

### Modèle conceptuel

Un modèle conceptuel, combinant le modèle géologique 3D et l'interprétation hydrogéologique, a permis d'associer les types d'eau identifiés à huit aquifères distincts :

Deux aquifères sont situés dans le remplissage sédimentaire de la vallée (alluvions de la Dranse, fluvio-glaciaire profond).

Deux aquifères sont associés au « Trias médian » (écailles de quartzites, bande de gypse).

Deux aquifères sont associés aux zones de dégâts de failles régionales (faille de Mondzeu, faille du Châble)

Deux aquifères sont constitués par les unités tectoniques surmontant la « Zone de cisaillement » du Châtelard (nappe du Ruitor, nappe de Siviez-Mischabel).

Il existe des relations entre certains de ces aquifères. Les graviers fluvio-glaciaires de la vallée de la Dranse sont par exemple potentiellement alimentés dans le fond de l'auge glaciaire par la décharge de tous les aquifères situés dans le soubassement rocheux.

Finalement, les résultats de cette étude surprennent par la variété des aquifères du soubassement rocheux du Val de Bagnes, ainsi que par les températures relativement élevées par rapport au gradient géothermique supposé être inférieur à la normale en contexte alpin. Ceci indique une continuité hydraulique en profondeur avec des systèmes hydrothermaux en pression, qui présuppose



une fracturation intense du soubassement rocheux par les failles régionales supposées et par leur zone de dégâts.

#### Cibles potentielles

Ces aquifères représentent tous des cibles potentielles pour une exploitation géothermale. Différents critères, tels que la proximité aux utilisateurs et le potentiel géothermique, ont été pris en compte pour évaluer lesquels de ces aquifères représentent des cibles adaptées au projet. Quatre cibles ont été retenues :

- Trois cibles sont constituées par des aquifères situés dans le substratum rocheux au fond de l'auge glaciaire. L'une d'entre elles est de nature stratigraphique (gypse et quartzites du « Trias médian »), les deux autres de nature structurale (zones de dégâts des failles de Mondzeu et du Châble).
- La quatrième cible concerne le remplissage sédimentaire de la vallée, plus spécifiquement les dépôts fluvio-glaciaires supposés plus perméables au fond de l'auge glaciaire.

#### Incertitudes

En raison de la complexité du contexte géologique, les modèles qui ont été développés comprennent des incertitudes importantes. Elles concernent la position exacte des contacts lithologiques lorsqu'ils sont masqués par les terrains superficiels, ainsi que l'extension, le tracé, voire l'existence des failles régionales. A l'inverse, certaines failles cachées pourraient ne pas avoir été prises en compte.

#### Sites favorables et prévisions énergétiques

Parmi les sites qui permettraient d'atteindre par forage une ou plusieurs de ces cibles, deux localités apparaissent comme les plus favorables. Elles présentent des avantages et des inconvénients par rapport aux spécificités du projet CuralaTherm.

Le site de « Prarayer Nord » montre les meilleures prévisions énergétiques et une meilleure fiabilité sur l'existence et la position de la cible. En revanche, la distance aux utilisateurs engendrerait des coûts supplémentaires liés à l'acheminement de l'eau. Il a été évalué qu'un puits de 500 à 600 m implanté sur ce site pourrait fournir une puissance de 0.9 à 1.3 MW<sub>th</sub>.

Le second site, « Abattoirs », est situé à proximité des utilisateurs, mais il présente des incertitudes majeures sur la position exacte des cibles. La chimie des eaux pourrait conduire à des problèmes d'encroutement des PAC et les débits attendus plus faibles. Il a été évalué qu'un puits de 450 à 500 m implanté sur ce site pourrait fournir une puissance 0.5 à 0.7 MW<sub>th</sub>.

## **9 Aperçu et mise en œuvre prochaine**

L'étape suivante consistera au choix du futur site d'exploitation. Une proposition d'installation sur une parcelle communale a été faite. Il s'agit ici d'étudier la faisabilité du site. En complément, il faudra chiffrer précisément les coûts d'un forage d'exploitation/exploration sur le site choisi, élaborer un projet de construction, rechercher des financements afin de monter un dossier solide pour l'obtention des différents permis de construire.



## 10 Bibliographie

- ALPGEO, 2015-b : Etude hydrogéologique de la nappe phréatique de la Dranse entre Le Châble et Champsec. Rapport hydrogéologique. Forages de reconnaissance. Suivi hydrogéologique. Evaluation du potentiel géothermique. Juillet 2015.
- ALPGEO, 2015-a : Campagne de forages de reconnaissance géothermique à Prarreyer-Versergères (septembre à décembre 2014). Rapport hydrogéologique. Forages de reconnaissance. Suivi hydrogéologique. Evaluation du potentiel géothermique. Janvier 2015.
- ALPGEO, 2014 : Chauffage Halle St-Marc. Champs de sondes géothermiques verticales (SGV) pour PAC. Rapport forages. Avril 2014.
- ALPGEO, 2013 : Campagne de forages de reconnaissance géothermique à Montagnier (octobre à décembre 2012). Rapport hydrogéologique. Janvier 2013.
- ALPGEO, 2011 : Commune de Bagnes. Evaluation du potentiel géothermique. Etude préliminaire. Décembre 2011.
- Calame, J.-J. 1954 : Etude géologique de la région de Nendaz (Valais). – Thèse Univ. Genève. Imprimerie Grivet, Genève, 55 p.
- CRSFA, 1992 : Programme GEOTHERMOVAL, recherche et mise en valeur des ressources géothermiques du Valais. Phase I. Rapport final. Fascicule n°8. Val de Bagnes. Rapport CRSFA/92.25A, 21 août 1992.
- CRSFA, 1991 : Commune de Bagnes. Evaluation du potentiel géothermique de la zone Montagnier-Villette. Rapport CRSFA/91.47, 14 janvier 1992.
- Dorner, M., 2017 : Evaluation des caractéristiques hydrogéologiques et du potentiel géothermique de l'encaissant du Val de Bagnes (VS). Master en hydrogéologie. Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, août 2017.
- GeoExpert, 1991 : Commune de Bagnes. Etude sismique de la région Montagnier-Villette. Rapport final. Novembre 1991.
- Schneider, T. 2000 : Etudes hydrogéochemique des eaux de la région de Verbier, Val de Bagnes, Valais, DEA/Master UNIL, Centre d'Analyse Minérale-
- Steck, A., Bigioggero, B., Dal Piaz, G.V., Escher, A., Martinotti, G. & Masson, H. 1999 : Carte tectonique des Alpes de Suisse occidentale, 1:100 000. Carte géologique spéciale N° 123. Service hydrogéologique et géologique national.
- Tissières, P. 2003 : Projet "Thermalisme Mayens de Bruson". Etude de sources situées en amont du Châble (Commune de Bagnes), d'avril à août 2003
- Tissières, P. 1986 : Téléverbier SA, sources du Châtelard, jaugeages 1985-1986
- Vogel, B. 2013 : De la géothermie sur le site touristique de Davos. Energies Renouvelables N° 3, juin 2013
- Widmer, F. 2000 : Instabilité liées aux formations évaporitiques du Trias de la région de Verbier, Verbier, Commune de Bagnes Valais, Travail de Diplôme, UNIL/EPFL



## 11 Annexes

**Les annexes peuvent être obtenues auprès du bureau Norbert SA à Martigny.**

**Annexe 1 :** Rapport Geo2X

**Annexe 2 :** Ecorché tectonique et données SIG

**Annexe 3 :** Coupes géologiques

**Annexe 4 :** PDF 3D

**Annexe 5 :** Plan de situation des forages et sources dans le Val de Bagnes. Synthèse des données hydrogéologiques

**Annexe 6 :** Tableau avec les résultats des analyses chimiques des eaux souterraines du Val de Bagnes.

**Annexe 7 :** Rapport d'analyse des isotopes du sulfate.