



HAL
open science

Fonctionnement d'un système hydrothermal associé à un contact tectonique alpin (La Léchère, Savoie). Apports de l'hydrogéologie, de la géochimie et de la modélisation hydrodynamique et thermique en vue de la gestion de la ressource.

Emilie Thiébaud

► **To cite this version:**

Emilie Thiébaud. Fonctionnement d'un système hydrothermal associé à un contact tectonique alpin (La Léchère, Savoie). Apports de l'hydrogéologie, de la géochimie et de la modélisation hydrodynamique et thermique en vue de la gestion de la ressource.. Hydrologie. Université de Savoie, 2008. Français. NNT: . tel-00265333

HAL Id: tel-00265333

<https://theses.hal.science/tel-00265333>

Submitted on 18 Mar 2008

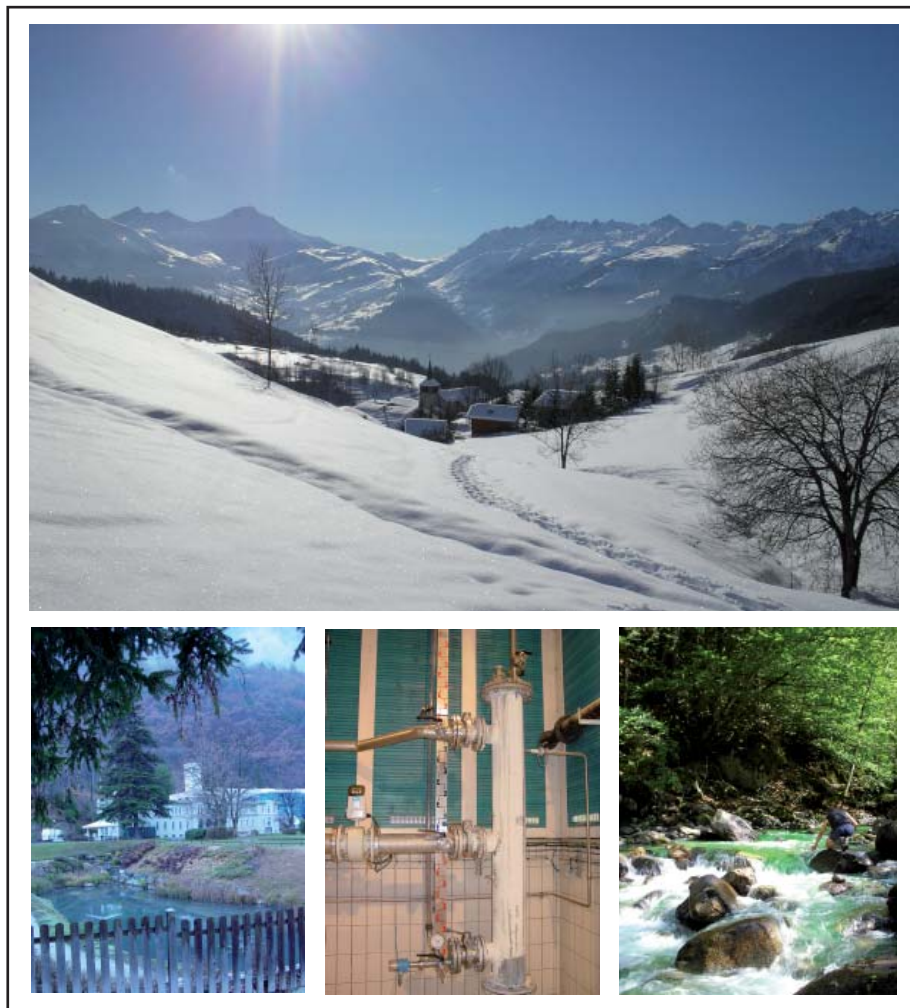
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Fonctionnement d'un système hydrothermal associé à un contact tectonique alpin (La Léchère, Savoie)

*Apports de l'hydrogéologie, de la géochimie et de la modélisation
hydrodynamique et thermique en vue de la gestion de la ressource*

Emilie THIÉBAUD



Soutenu le 1^{er} février 2008 devant le jury composé de :

Rapporteurs :

Aurèle PARRIAUX
Frédéric DELAY

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Université de Poitiers

Examineurs :

Christophe EMBLANCH
Christophe RENAC

Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse
Université Jean Monnet, Saint-Etienne

Directeurs de thèse :

Dominique GASQUET
Marc DZIKOWSKI

Université de Savoie, Chambéry
Université de Savoie, Chambéry

Illustrations de la page de garde

Panorama sur les vallées du Morel et de l'Eau Rousse
depuis le Roc Marchand

Etablissement des
Thermes et lac de la
Léchère

Tête du forage
Natacha

Coloration à la
fluorescéine du torrent
de l'Eau Rousse

Thèse de Doctorat de Géologie
Université de Savoie, Ecole Doctorale SISEO

Fonctionnement d'un système hydrothermal associé à un contact tectonique alpin (La Léchère, Savoie)

*Apports de l'hydrogéologie, de la géochimie et de la modélisation
hydrodynamique et thermique en vue de la gestion de la ressource*

Emilie THIÉBAUD

Soutenue le 1^{er} février 2008 devant le jury composé de :

Rapporteurs : Aurèle PARRIAUX Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Frédéric DELAY Université de Poitiers

Examineurs : Christophe EMBLANCH Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse
Christophe RENAC Université Jean Monnet, Saint-Etienne

Directeurs de thèse : Dominique GASQUET Université de Savoie, Chambéry
Marc DZIKOWSKI Université de Savoie, Chambéry



Remerciements

Comme la plupart des thèses, ce manuscrit est le fruit d'un travail épaulé par de nombreuses personnes. J'espère n'oublier personne...

Pour commencer, je remercie Messieurs Parriaux et Delay pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce manuscrit mais également Messieurs Emblanch et Renac de participer au jury de cette thèse.

Je remercie vivement Serge Fudral, à l'origine de ce projet de thèse et qui s'est engagé à nos côtés pour le mener à bien.

Evidemment, la plus grande contribution à la réalisation de ce travail revient à mes deux directeurs de thèse Dominique Gasquet et Marc Dzikowski. Merci à vous deux pour votre encadrement sécurisant, votre disponibilité, tant au laboratoire que sur le terrain, votre patience pour les corrections du manuscrit (malgré mon vocabulaire jurassien mêlé d'auvergnat), votre simplicité dans les rapports humains et votre bonne humeur.

Je remercie également Jacques Mudry, Catherine Bertrand et Christophe Emblanch pour m'avoir encouragée à poursuivre en thèse après mon DEA.

Le déroulement de cette thèse a été facilité par la participation financière des propriétaires de la ressource : la Communauté de Communes des Vallées d'Aigueblanche (CCVA). La décision prise par le conseil de la CCVA m'a permis de me déplacer, de me loger, de financer toute la partie analytique mais aussi le matériel métrologique. Merci à Claude Michel, président de la CCVA, pour avoir soutenu mon projet. Parmi les organismes propriétaires et exploitants, je remercie tout particulièrement Jean-Louis Garnier, directeur technique de la CCVA et Didier Suchet, directeur de la Société des Eaux Thermales de La Léchère, pour avoir mis à ma disposition toutes leurs archives et pour m'avoir guidée sur le terrain.

Je remercie également tous les acteurs concernés par l'exploitation de la ressource pour avoir partagé leur connaissance du système et participé aux réunions annuelles de présentation de mes travaux : Roland Domenget de la DDASS, Michel Masson de la DRIRE, Philippe Vigouroux et Claudine Lamotte du BRGM, Bruno Canaletta, Philippe Duboeuf, Sabine Fain et Claire Chargeron du bureau d'étude SOGREAH.

Grâce aux conventions établies avec les différentes unités d'exploitation hydroélectriques EDF, les jaugeages ont pu être réalisés en toute sécurité : un merci particulier à Jean-Pierre Thomas.

Sur le terrain, les aides ont été nombreuses. En ce qui concerne la cartographie, merci à Roger De Ascençao Guedes pour toutes les journées de terrain qu'il m'a consacrées et pour sa connaissance infailible des minéralisations de Tarentaise, mais également à Jean-Michel Bertrand pour ses éclairages sur la géologie du socle et à Serge Fudral pour ses encouragements et ses mises au point sur la géologie de la couverture sédimentaire. En ce qui concerne les prélèvements, les jaugeages et le relevé des stations de mesure, j'ai profité de toutes les visites pour embaucher du monde : j'espère être pardonnée en vous faisant apparaître ici. Un grand merci à Vincent pour la journée de prélèvement en raquettes, à Stéphanie pour les journées de terrain qui commencent souvent mal, à Yves pour la journée de forage dans les travertins, à Bernard pour l'installation des stations de mesure, à Pat pour avoir consacré plusieurs jours de congé à patauger dans la boue d'une galerie ou à replanter des piquets, à Renaud pour avoir osé embarquer sa tendre 205 dans les chemins cahotiques de Tarentaise, mais aussi à Brice, Séb, Jean-Paul, Anne-Julie. Merci également aux trois stagiaires qui ont participé à la cartographie et à la réalisation des jaugeages durant les étés 2005 et 2006 : Vincent Varlet, Cédric Bordier et Alexandre Parent (et sa famille). Sans oublier toutes les personnes de la CCVA qui m'ont accompagnée dans la galerie EDF et celles des Thermes qui m'ont apporté de l'aide lors de mes prélèvements.

Merci aux quelques personnes rencontrées sur les chemins et routes de Tarentaise pour leur accueil : M^r et M^{me} Bouvier, M^r Guillard, les bergers du hameau du Crozat, M^r Nivellet et Virginie Chierez.

En ce qui concerne la partie analytique, rien n'aurait été possible sans l'accueil du laboratoire "Magmas et Volcans" de Saint-Etienne. Merci à Frédéric Gal, Marie-Christine Gerbe mais surtout à Viviane Berthon, Bertrand Moine et Christophe Renac pour leurs conseils, leur patience lors de ma formation aux techniques analytiques et pour le temps qu'ils m'ont tous consacré.

L'interprétation des données géochimiques est le fruit de discussions et conseils fructueux : merci à Christophe Renac de Saint-Etienne, à Bernard Blavoux et Christophe Emblanch de l'Université d'Avignon, à Gian Maria Zuppi et Nicoletta pour leur accueil chaleureux et gastronomique pendant une semaine vénitienne ensoleillée, à Aurèle Parriaux et Michael Bensimon de l'EPFL ainsi qu'à Martial Dray du CRG de Thonon.

Merci à Fabien Cornaton du CHYN pour ses quelques conseils sur la modélisation du système.

L'ambiance du laboratoire a contribué à rendre plus agréable l'achèvement de cette thèse. Je remercie Jean-Jacques Delannoy de m'avoir accueillie au sein de ce laboratoire enrichissant et dynamique. Un grand merci au staff informatique : Vincent Blanc pour ses réactions rapides, André Paillet pour ses conseils d'infographie mais aussi de gastronomie (beaucoup moins suivis que les premiers) et surtout Estelle Ployon (qui va certainement apparaître dans tous les remerciements de thèse des années à venir) pour sa grande disponibilité et aussi pour les potins de labo marquant les trajets en bus. Viennent ensuite les secrétaires Renée Fenestraz et Carole Poggio pour la gestion des remboursements et du contrat. Mais le laboratoire est aussi le lieu d'échanges fructueux qui font avancer les recherches de chacun : parmi ceux-ci, merci à Jean-Yves Josnin pour ses conseils lors de la modélisation numérique mais aussi à Gérard Nicoud pour son aide lors de la réinterprétation des descriptions de forage et pour ses récits des matchs de rugby bien plus vivants que les matchs eux-mêmes ; et j'en oublie...

Je tiens également à remercier les personnes des laboratoires chambériens voisins qui ont mis à ma disposition leur matériel : Emmanuel et Violaine Naffrechoux du LCME pour le prêt du groupe électrogène et de la pompe de prélèvement et pour l'accueil dans les salles de labo, mais aussi Annie Millery du LECA pour l'utilisation de la centrifugeuse.

Merci à tous les doctorants "anciens" (Anne, Sylvain, Mélanie, Christophe, Laurence...) pour leur conseils lors de mon arrivée au labo et "nouveaux" (Dominique, Benjamin, Souhail, Charline, Pierre, Bérengère, Justine...) mais aussi à Amaïa pour les conversations de midi qui m'ont sorti la tête des eaux thermales. Une mention spéciale pour Stéphanie : en raison de la proximité de nos sujets de thèse, nos échanges et discussions nous ont portées mutuellement durant ces trois années. Merci aussi à Roberto ainsi qu'à Laudy qui m'a fait concrètement prendre conscience du confort de vie que l'on a dans un pays sans guerre...

Pour finir, merci à ma famille et mes amis d'avoir supporté mes conversations tournant presque exclusivement autour de la rédaction de ma thèse depuis quelques mois.

Pour la même raison mais aussi pour le soutien, la joie de vivre, les digressions poético-fantasques et la tendresse qu'il m'apporte, merci à Renaud...

Résumé

Les intersections entre les grands accidents tectoniques et les vallées alpines sont les lieux de convergence d'eaux souterraines, profondes et superficielles ; le système thermal de la Léchère (Tarentaise, Savoie) en est un exemple. Cette étude définit le fonctionnement de ce système, grâce à une approche interdisciplinaire associant **(1)** géologie, **(2)** hydrodynamique, **(3)** hydrogéochimie et **(4)** modélisation hydrodynamique / thermique.

(1) Le site thermal de la Léchère se trouve sur la bordure orientale du massif cristallin de Belledonne. Le socle cristallin est en contact tectonique, jalonné d'évaporites triasiques, avec la couverture delphino-helvétique essentiellement carbonatée. Cet accident a joué en chevauchement puis en décrochement et il se divise en plusieurs accidents secondaires, formant des écailles discontinues. Les eaux thermales émergent dans la vallée de l'Isère, scellée ici par l'ombilic glaciaire de Bellecombe. La réinterprétation des données de forage a permis de définir la structure de ce remplissage, de 100m d'épaisseur dans le forage Natacha. De bas en haut, l'ombilic glaciaire est constitué (i) par des dépôts glacio-lacustres imperméables, recoupés par un écroulement ancien, puis (ii) par des dépôts fluvio-glaciaires de plus en plus grossiers et enfin (iii) par les alluvions récentes de l'Isère.

(2) Le secteur étudié est caractérisé par des circulations profondes et des circulations superficielles, depuis les versants vers la vallée. Ces écoulements ont lieu le long des zones de forte perméabilité, constituées par les évaporites de l'accident de la Léchère mais aussi par la zone broyée des micaschistes de Feissons-sur-Isère. Ces zones drainent les eaux infiltrées dans les micaschistes et en moindre proportion dans les carbonates. Le système est alimenté de manière diffuse par l'infiltration des eaux de pluie mais aussi de manière ponctuelle par des pertes du réseau hydrographique. Les écoulements superficiels se font dans la zone décomprimée, qui sert également de trop plein au système profond. Dans la zone d'émergence, les eaux thermales se diffusent, dans le remplissage quaternaire, par l'intermédiaire de l'écroulement ancien. Les dépôts glacio-lacustres constituent une barrière imperméable qui rend captif l'aquifère thermal profond et une partie de l'écroulement ancien. La partie libre de l'écroulement et la nappe alluviale sont en continuité hydraulique. Tant que le niveau piézométrique de l'aquifère thermal profond restera supérieur à celui de l'aquifère superficiel, les circulations seront ascendantes.

(3) A faible profondeur, des eaux (1500 à 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$), de faciès sulfaté calcique magnésien et légèrement bicarbonaté ($\text{Ca-Mg-SO}_4 + \text{HCO}_3$), sont drainées par l'accident tectonique. Comme ces eaux triasiques superficielles, les eaux thermales captées (3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 60°C) interagissent avec les dolomies, cargneules et gypses (Ca , SO_4 , Mg). Elles se différencient ensuite par un parcours profond, de plusieurs milliers d'années, leur permettant d'atteindre une température de 90°C et d'interagir avec la halite (Cl), les roches métamorphiques (Si , K , échange Ca/Na) et les roches permo-carbonifères riches en matière organique (CH_4 , NH_4 et H_2S), avant de remonter en surface. Dans la zone d'émergence, le remplissage quaternaire est le siège d'un mélange entre les eaux thermales (3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et faciès Ca-Na-SO_4), les eaux de la nappe alluviale (800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et faciès Ca-SO_4) et les eaux triasiques superficielles (1500 à 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et faciès $\text{Ca-Mg-SO}_4 + \text{HCO}_3$). Ainsi, les eaux présentes dans l'écroulement ancien résultent d'un mélange entre pôle thermal profond et pôle triasique superficiel. Les eaux des dépôts fluvio-glaciaires et des alluvions récentes sont constituées d'un mélange, en proportion variable, entre les trois faciès.

(4) La modélisation couplée hydrodynamique / thermique a mis en évidence que les eaux thermales résultent d'un mélange d'eaux issues des deux versants, circulant avec des temps de séjour et des températures variables en fonction de la profondeur de leur parcours. Lors de la fonte des glaciers à la fin du Würm, les écoulements sont réactivés et les eaux chaudes sont chassées vers la vallée. Dans la zone d'émergence, la température des eaux thermales atteint un maximum de 100°C au bout de 3500 ans puis diminue. L'aquifère thermal est totalement refroidi en 50000 ans. A l'heure actuelle, le système est donc dans un état thermique transitoire. La mise en exploitation de la ressource thermique accélère, toutefois de façon imperceptible à l'échelle des dix ans d'observation, le refroidissement naturel de l'aquifère thermal.

Abstract

Deep and shallow underground waters are concentrated at the intersection of main structural contacts and alpine valleys. The La Léchère thermal system (Tarentaise, Savoie) is an example of such a situation. This thermal system is studied with a interdisciplinary approach associating (1) geology, (2) hydrodynamic, (3) hydrogeochemistry and (4) hydrodynamic and thermic modeling.

(1) The La Léchère thermal site is located at the eastern border of Belledonne crystalline massif. The basement is separated from the delphino-helvetic carbonated cover by Triassic evaporites, underlying a major tectonic contact. This contact is a strike-slip thrust, divided into several secondary faults which define discontinuous slices. Thermal waters rise at the intersection of the main structural contact and Isère valley, sealed here by Bellecombe glacial basin. The re-interpretation of drilling descriptions leads us to define the structure of the filling, 100m-thick in the Natacha borehole. From the bottom to the top, the glacial basin is constituted of (i) impermeable glaciolacustrine deposits, cut by an old rock avalanche, (ii) fluvio-glacial deposits and (iii) recent alluvial deposits of Isère.

(2) The studied area is characterized by deep and shallow circulations, from sides to valley. These flows are located in high-permeability zones, constituted of evaporites, from the tectonic contact, and mylonitized micaschists. These high-permeability zones drain water, infiltrated in micaschists and, in a less degree, in carbonates. The hydrothermal system is recharged by diffuse meteoric infiltration and by losses along Eau Rousse torrent. Shallow flows are located in a decompressed zone also considered to be an overflow of the deep system. In the discharge area, thermal waters diffuse in the quaternary filling through the old rock avalanche. The glacio-lacustrine deposits constitute an impermeable barrier confining the deep thermal aquifer and a part of the old rock avalanche. The unconfined rock avalanche and the alluvial aquifer are in hydraulic connection. As long as the piezometric level of the deep thermal aquifer will stay higher than that of the shallow aquifer, then flows will be ascending.

(3) At shallow depth, waters (1500 to 2500 μ S/cm), with a sulfated calcic and magnesian and a slightly bicarbonated facies (Ca-Mg-SO₄ + HCO₃), are drained by the tectonic contact. Exploited thermal waters (3000 μ S/cm and 60°C), as shallow triassic waters, interact with dolomite, cargneules and gypsum (Ca, SO₄ and Mg). Then, thermal water differs from shallow flows due to a deep flow path of several thousands years which lead them to reach a temperature of 90°C and to interact with halite (Cl), micaschists (Si, K, exchange Ca/Na) and Permo-Carboniferous rocks rich in organic matter (CH₄, NH₄ and H₂S) before upwelling towards the surface. In the quaternary filling of the discharge area, thermal waters (3000 μ S/cm and Ca-Na-SO₄ facies) are mixed with shallow triassic (1500 to 2500 μ S/cm and Ca-Mg-SO₄ + HCO₃ facies) and alluvial waters (800 μ S/cm and Ca-SO₄ facies). Thus, waters located in the old rock avalanche result of mixing between deep thermal and shallow triassic poles. Waters from the fluvio-glacial deposits correspond to mixing, with various proportions, between these three poles.

(4) Hydrodynamic and thermic modeling shows that thermal waters result of mixing between waters from the two sides of the valley and which circulate with various residence times and temperature, linked to the depth of their flow path. During deglaciation at the end of the Würm, flows are re-activated and hot waters are flushed to the valley. In the discharge area, temperature of thermal waters reaches a maximum of 100°C after 3500 years and then decreases. The total cooling of the thermal aquifer is reached after 50000 years. At present time, the hydrothermal system is in an unsteady thermic state. Thermal resource exploitation accelerates the natural cooling of the thermal aquifer. However, this acceleration is not observed during the last 10 years of monitoring.

Sommaire

Résumés	i
Sommaire.....	iii
Liste des figures	viii
Liste des tableaux.....	xii
Chapitre I : Présentation générale.....	1
I. Problématique de l'étude	3
II. L'hydrothermalisme	4
1. L'hydrothermalisme : une thématique vaste	4
1.1. L'hydrothermalisme et le magmatisme.....	4
1.2. L'hydrothermalisme et la géothermie.....	5
2. Le thermalisme	5
2.1. Historique	5
2.2. Les modes de fonctionnement	6
2.2.1) <i>Le mode de réchauffement des eaux</i>	6
2.2.2) <i>Le moteur de la remontée en surface</i>	6
2.3. Le thermalisme en France.....	7
2.3.1) <i>Cadre législatif</i>	7
2.3.2) <i>Les provinces thermales françaises</i>	9
2.3.3) <i>L'activité thermique en France</i>	11
3. Conclusion	12
III. Le site thermal de la Léchère	13
1. Contexte géographique, géologique et économique.....	13
1.1. Contexte géographique.....	13
1.1.1) <i>Contexte orohydrographique</i>	13
1.1.2) <i>Les aménagements hydroélectriques de la vallée de l'Isère</i>	15
1.1.3) <i>Contexte climatique</i>	16
1.2. Contexte géologique général.....	18
1.3. Contexte économique.....	18
1.3.1) <i>Les activités économiques dans la vallée de Tarentaise</i>	18
1.3.2) <i>L'activité thermique</i>	18
2. Historique de l'exploitation.....	19
2.1. L'apparition de la ressource en 1869	21
2.2. Le développement du site (des années 1950 à 1990)	21
2.3. La recherche d'une eau thermique non mélangée (les années 1990).....	21
2.4. Le maintien de l'équilibre exploitation/ressource (de 1998 à aujourd'hui).....	21
3. Evolution des connaissances hydrogéologiques du système.....	22
3.1. Les premiers éléments.....	22
3.2. La progression dans la compréhension globale	22
3.2.1) <i>Propositions d'un schéma de circulation</i>	22
3.2.2) <i>Le remplissage quaternaire</i>	23
3.2.3) <i>Les premiers apports de la géochimie</i>	25
3.2.4) <i>Conclusion</i>	25
3.3. A la recherche du griffon thermal	25
3.3.1) <i>La campagne de sismique réflexion</i>	25
3.3.2) <i>La prospection radon</i>	26
3.3.3) <i>La prospection électrique</i>	27
3.3.5) <i>Conclusion</i>	30
3.4. Les dernières études.....	30
3.4.1) <i>Définition des 3 aquifères présents</i>	30
3.4.2) <i>Les apports des données isotopiques</i>	30
3.4.3) <i>Etude géologique à grande échelle</i>	31
3.4.4) <i>Les deux coupes récentes de la zone d'émergence</i>	31
3.4.5) <i>Conclusion</i>	33
4. Les aspects environnementaux du site de la Léchère	33
4.1. Définitions.....	33

4.2. Les risques de détérioration qualitative de la ressource thermique	34
4.2.1) <i>Les aléas</i>	34
4.2.2) <i>La vulnérabilité du système</i>	35
4.2.3) <i>Les données bactériologiques</i>	35
4.3. Les risques de détérioration quantitative de la ressource en eau	37
4.3.1) <i>Les aléas</i>	37
4.3.2) <i>La vulnérabilité du système</i>	37
4.4. Les impacts de la ressource thermique sur son environnement	37
5. Bilan de la situation en 2004	38
5.1. Etat du système d'exploitation	38
5.2. Etat des connaissances du système et objectifs de la thèse	38
5.3. Les moyens mis en œuvre	40
5.3.1) <i>Définition de la structure géologique (Chapitre II)</i>	40
5.3.2) <i>Les aspects hydrodynamiques (Chapitre III)</i>	40
5.3.3) <i>Caractérisation des échanges fluides / roches (Chapitre IV)</i>	40
5.3.4) <i>Modélisation couplée hydrodynamique / thermique (Chapitre V)</i>	40
Chapitre II : Le contexte géologique du secteur étudié	43
I. Le contexte géologique général	43
1. Localisation du site de la Léchère dans l'Arc Alpin	43
2. La structure géologique de part et d'autre du front pennique (FP)	44
2.1. Les galeries EDF de grande échelle	45
2.2. La future liaison Lyon-Turin	45
3. Le secteur étudié	49
3.1. Le contexte géologique du site de la Léchère	49
3.2. Le thermalisme en Tarentaise et Maurienne	49
3.3. Les informations géologiques amenées par les ouvrages de petite échelle	51
3.3.1) <i>La galerie de reconnaissance EDF</i>	51
3.3.2) <i>La conduite forcée Naves-Glaize-Isère</i>	51
4. Conclusion	51
II. Description des formations géologiques	53
1. Les roches cristallines	54
1.1. Les micaschistes de Feissons-sur-Isère (MFI)	54
1.2. Les granitoïdes, métagranites et gneiss orthodérivés	54
1.2.1) <i>Les métagranites et gneiss de Pussy-Plan du Col</i>	56
1.2.2) <i>Le granite de la Lauzière</i>	57
1.2.3) <i>Le granite de Notre-Dame de Briançon</i>	57
2. Les roches sédimentaires du Permo-Carbonifère au Jurassique supérieur	57
2.1. La couverture du rameau interne de Belledonne	59
2.1.1) <i>Le Permo-Carbonifère (de 359 à -251 Ma)</i>	59
2.1.2) <i>Le Trias moyen (de -245 à -228 Ma)</i>	59
2.2. Les matériaux constituant la nappe delphino-helvétique (figure II.15)	60
2.2.1) <i>Le Trias supérieur (de -228 à -199 Ma)</i>	60
2.2.2) <i>Le Jurassique (de -199 à -145 Ma)</i>	60
3. Les formations quaternaires	61
3.1. Les dépôts liés aux glaciers	61
3.2. Les autres dépôts superficiels	63
3.3.1) <i>Les alluvions récentes</i>	63
3.3.2) <i>Les dépôts gravitaires</i>	63
3.3.3) <i>Les dépôts encroûtant : les travertins</i>	64
4. Conclusion	65
III. Les apports de la carte géologique réalisée	66
1. Le socle	66
2. Le Permo-Carbonifère	67
2.1. Les conglomérats du Biollay	67
2.2. Les "bandes" permo-carbonifères (forêt de Barlet, route du Cudray)	67
3. La couverture sédimentaire dauphinoise	67
4. Le contact à proximité de la zone d'émergence	69
4.1. Le secteur de Petit Cœur - la Coèche	69

4.2. La galerie EDF et le secteur de la Route de la Forêt	69
5. Les écaïlles tectoniques	69
5.1. Le système d'écaïlles de Celliers, la Thuile et le Crozat	69
5.2. L'écaïlle de Combelouvière	69
5.3. Les écaïlles des Arcochons	70
6. L'accident de la Léchère en s'éloignant de la zone d'émergence.....	70
6.1. L'Homme de Beurre	70
6.2. Le col de la Louze	71
6.3. Le lac de Roselend	71
7. Conclusion	72
IV. Analyse de la fracturation du massif.....	73
1. Tectonique régionale.....	73
2. Méthodologie.....	73
2.1. Les mesures réalisées sur le terrain.....	73
2.2. Le traitement des données.....	74
3. Résultats	74
3.1. Analyse des plans striés.....	74
3.2. Les rosaces directionnelles	74
3.3. Veines alpines.....	75
4. Conclusion	76
V. Réinterprétation des données de forage dans la zone d'émergence thermique....	77
1. Les données disponibles	78
2. Le substratum	79
3. Le remplissage quaternaire.....	79
4. Proposition d'un schéma de circulation dans la zone d'émergence	79
VI. Conclusion.....	82
1. La structure géologique du secteur étudié.....	82
2. Conséquences sur les écoulements	83
Chapitre III : Aspects hydrodynamiques	87
I. Les données d'entrée	87
1. Les zones de perte et d'apport sur le réseau hydrographique	87
1.1. Le réseau hydrographique et son substratum.....	87
1.1.1) <i>Le bassin versant de l'Eau Rousse.....</i>	<i>87</i>
1.1.2) <i>Le bassin versant du Grand Nant de Naos.....</i>	<i>88</i>
1.2. Méthodologie	88
1.2.1) <i>Plan des mesures de débits sériés.....</i>	<i>88</i>
1.2.2) <i>Les jaugeages</i>	<i>88</i>
1.3. Résultats.....	89
1.4. Conclusion	92
2. L'infiltration	92
2.1. Les stations météorologiques.....	92
2.2. Evaluation des gradients altitudinaux et de la pluie efficace.....	93
3. Conclusion	95
II. Caractérisation du comportement hydrodynamique des différents aquifères..	96
1. Les caractéristiques des différents aquifères présents dans la zone d'émergence.....	96
1.1. Estimation de la transmissivité.....	96
1.2. Relations hydrodynamiques entre les points d'observation	98
2. Les réponses du système aux signaux d'entrée.....	99
2.1. Dans la zone d'émergence	99
2.1.1) <i>L'acquisition des données</i>	<i>99</i>
2.1.2) <i>Les résultats (figure III.7).....</i>	<i>101</i>
2.2. Dans la galerie de reconnaissance EDF	105
2.2.1) <i>L'acquisition des données</i>	<i>105</i>
2.2.2) <i>Les résultats (figure III.12).....</i>	<i>106</i>
III. Conclusion.....	107

Chapitre IV : Caractérisation des interactions fluides-roches	111
I. L'utilisation de l'hydrogéochimie dans l'étude des systèmes thermaux.....	111
II. Analyses chimiques des eaux et des roches du secteur étudié	112
1. Analyses physico-chimiques des eaux	112
1.1. Données acquises sur tous les aquifères (campagne 2005-2006)	112
1.1.1) <i>Plan d'échantillonnage et méthodologie</i>	112
1.1.2) <i>Paramètres physiques et faciès chimiques des eaux prélevées</i>	112
1.1.3) <i>Indices de saturation et géothermométrie</i>	117
1.1.4) <i>Analyses en Composantes Principales des données physico-chimiques</i>	120
1.1.5) <i>Evolution temporelle des paramètres physico-chimiques</i>	123
1.1.6) <i>Echange Ca/Na et interaction avec les dolomies</i>	126
1.1.7) <i>Evaluation des phénomènes de mélange dans la zone d'émergence</i>	129
1.2. Données acquises sur les forages thermaux (depuis 1949).....	130
1.2.1) <i>Données disponibles</i>	130
1.2.2) <i>Les faciès chimiques des différents forages</i>	130
1.2.3) <i>ACP des analyses physico-chimiques des forages thermaux</i>	131
1.2.4) <i>Evolution temporelle des paramètres physico-chimiques</i>	133
2. Acquisition d'une minéralisation spécifique au contact des roches.....	137
2.1. Echantillonnage des roches.....	137
2.2. Echantillonnage des eaux	137
2.3. ACP des éléments traces.....	139
2.4. Discussion et conclusion.....	141
III. Analyse de la phase gazeuse des eaux thermales de la Léchère	142
1.1. Données antérieures à cette étude.....	142
1.2. Données acquises pour cette étude	142
2. Résultats	145
2.1. Les espèces soufrées (sulfures s.l.)	145
2.2. Le radon	145
2.3. Les autres gaz	146
IV. Analyses isotopiques des eaux et des roches du secteur étudié.....	147
1. Analyses isotopiques des eaux	147
1.1. Echantillonnage et méthodologie.....	147
1.2. Aire d'alimentation.....	148
1.2.1) <i>La relation à la droite météorique</i>	148
1.2.2) <i>Les gradients altitudinaux</i>	148
1.2.3) <i>Détermination des altitudes moyennes des aires d'infiltration</i>	149
1.3. Temps de séjour des eaux.....	150
1.3.1) <i>Tritium et CFC</i>	150
1.3.2) <i>Carbone</i>	152
2. Apport des analyses isotopiques des roches	157
2.1. Origine des sulfates et des sulfures dans les eaux thermales	157
2.1.1) <i>Description des données</i>	157
2.1.2) <i>Résultats</i>	157
2.2. Température de dépôt des travertins de la route de la Forêt	158
2.2.1) <i>Description des données</i>	158
2.2.2) <i>Résultats</i>	158
V. Conclusion.....	159
Chapitre V : Modélisation numérique couplée hydrodynamique/thermique	163
I. Introduction.....	163
1. Concepts fondamentaux de la modélisation couplée hydrodynamique / thermique	163
2. Domaines d'application de la modélisation couplée hydrodynamique/thermique	165
3. Les écoulements et les flux de chaleur dans les versants montagneux	166
II. Mise en place d'un modèle numérique.....	167
1. Objectifs de la modélisation.....	167
2. Modèle conceptuel des écoulements du site de la Léchère	168
3. Modèle numérique : géométrie du modèle et maillage	169

III. La modélisation hydrodynamique	170
1. Calibration hydrodynamique sur les données actuelles	170
1.1. Conditions aux limites	170
1.1.1) Les entrées.....	170
1.1.2. Les sorties.....	170
1.2. Paramètres hydrodynamiques.....	172
1.3. Résultats.....	173
2. Simulation hydrodynamique en absence de la galerie EDF et des forages thermaux.....	174
IV. La modélisation thermique.....	175
1. La démarche adoptée.....	175
2. Mise en place du gradient géothermique durant la période glaciaire (simulation 1)	176
2.1. Conditions aux limites	176
2.2. Paramètres du modèle	176
2.3. Résultats.....	176
3. Perturbation du gradient géothermique par les circulations d'eau (simulation 2).....	177
3.1. Conditions aux limites	178
3.2. Résultats.....	178
4. Impacts simulés des ouvrages présents au niveau du site thermal (simulation 3).....	180
V. Conclusion.....	182
Chapitre VI : Conclusion générale	185
I. Synthèse	185
1. Alimentation.....	185
2. Parcours souterrain.....	186
3. Emergence	188
II. Conséquences sur l'exploitation de la ressource.....	189
1. Vulnérabilité du système	189
2. Un forage de secours ?	190
3. Reconnaissances géologiques.....	191
III. Perspectives de recherche.....	191
1. Métrologie	191
2. Modélisation couplée hydrodynamique / thermique.....	192
3. Modélisation géochimique	192
Bibliographie	193
Annexes.....	209
ANNEXE 1 : Historique de l'exploitation des eaux thermales de la Léchère	A.2
ANNEXE 2 : Description des forages réalisés sur le secteur de la Léchère	A.4
ANNEXE 3 : Carottage réalisés dans les travertins de la Léchère.....	A.40
ANNEXE 4 : Résultats des campagnes de jaugeage.....	A.41
ANNEXE 5 : Essais par pompages réalisés sur les forages thermaux du site de la Léchère.....	A.44
ANNEXE 6 : Méthodologie des analyses physico-chimiques et résultats de la campagne 2005-2006.....	A.49
ANNEXE 7 : Formules de calculs géothermométriques.....	A.54
ANNEXE 8 : Données physico-chimiques des forages thermaux de la Léchère.....	A.56
ANNEXE 9 : Analyses chimiques (majeurs, traces et terres rares) des roches du secteur étudié	A.66
ANNEXE 10 : Analyses des éléments traces des eaux des forages thermaux de la Léchère.....	A.69
ANNEXE 11 : Analyses utilisées pour le calcul des gradients isotopiques en rive droite et en rive gauche de l'Isère (Dray, 2000)	A.71
ANNEXE 12 : Méthodologie des analyses des isotopes stables (O, H et C) et résultats de la campagne 2005-2005.....	A.72
PLANCHE HORS-TEXTE n°1 : Carte géologique interprétative	
PLANCHE HORS-TEXTE n°2 : Coupes géologiques interprétatives	
PLANCHE HORS-TEXTE n°3 : Schéma structural du secteur de la Léchère et analyse de la fracturation	

liste des figures

Figure I.1 : Modèle de circulation des fluides au sein d'un système hydrothermal d'un volcan actif (Finizola (2002), modifié)...	4
Figure I.2 : Carte de localisation des sites de thermalisme en France (Division Nationale des Eaux Minérales et Thermales 2003, modifié).....	8
Figure I.3 : Schéma hydrogéologique des différents types d'eau minérale des Pyrénées (Pomerol et Ricour, 1992).....	8
Figure I.4 : Coupe géologique à l'échelle plurikilométrique des réservoirs à l'origine de la minéralisation de la source d'Allevard, tirée du programme ECORS (complétée) (d'après Dazy et Razack, 1989 in Courtois, 2005a)	9
Figure I.5 : Schéma de circulation du système thermal de Dax (Blavoux, 1998 modifié).....	10
Figure I.6 : Coupe schématique du graben du Forez et zones de circulation possibles de l'eau en profondeur (Gal, 2005)	10
Figure I.7 : Schéma de circulation des eaux minérales d'Evian (Blavoux, 1998)	11
Figure I.8 : Evolution de la fréquentation des établissements thermaux français de 1958 à 2004.....	12
Figure I.9 : Carte de localisation des sites thermaux de Savoie et de quelques sites limitrophes	13
Figure I.10 : Schéma orohydrographique de la zone de la Léchère avec implantation des stations météorologiques et des aménagements hydroélectriques	14
Figure I.11 : Panorama sur les vallées de Grande Maison et de Naves depuis la route entre Doucy et Combelouvière	15
Figure I.12 : Panorama sur les vallées de l'Eau Rousse et du Morel depuis le Roc Marchand.....	15
Figure I.13 : Carte des précipitations en Savoie (données APS, 1999-2006).....	16
Figure I.14 : Précipitations annuelles aux stations de Moûtiers et de Grand Naves de 1975 à 2005 (données MétéoFrance)	17
Figure I.15 : Pluviosité et température journalière à la station de Celliers sur une année hydrologique	17
Figure I.16 : La fréquentation des thermes de la Léchère (données BRGM et CNETH).....	19
Figure I.17 : Plan du site thermal de la Léchère, localisation des forages et de la galerie de reconnaissance EDF	20
Figure I.18 : Bloc diagramme du contexte géologique des sources de la Léchère (Menard, 1981)	22
Figure I.19 : Coupe schématique de la zone d'émergence de la Léchère (Poul et Iundt, 1985)	23
Figure I.20 : Carte piézométrique de la nappe alluviale en février 1952 (Solétanche, 1952)	24
Figure I.21 : Interprétation structurale de la campagne de sismique réflexion haute résolution 3D (Anonyme, 1994, modifié).26	26
Figure I.22 : Carte des anomalies radon (Malatrait <i>et al.</i> , 1994)	27
Figure I.23 : Cartes des résistivités du sous-sol à différentes profondeur (75, 100, 150 et 200m) d'investigation établies à partir de dispositifs rectangles (Malatrait <i>et al.</i> , 1994).....	28
Figure I.24 : Carte thermique à 5m de profondeur établie à partir des diagraphies réalisées sur les forages F1, Olod, RII, RIII, RIV, RV, RVI, RVII et RIX (Corrignan, 1996a modifié).....	29
Figure I.25 : Schéma systémique décrivant la nature des eaux rencontrées dans la zone d'émergence de la Léchère.....	30
Figure I.26 : Coupe de la zone d'émergence proposée par SOGREAH (1998a, modifié).....	32
Figure I.27 : Coupe de la zone d'émergence proposée par SOGREAH (2003, modifié)	33
Figure I.28 : Schéma systémique représentant la notion de risque pour la ressource en eau sur le secteur étudié.....	34
Figure I.29 : Evolution des concentrations en Legionella Pneumophilla sur les forages thermaux de la Léchère (RII, RVI, RVII, RX) et mise en évidence de la corrélation entre concentration en LP et température de l'eau dans le forage RVII.....	36
Figure I.30 : Schéma de l'équipement de la tête du forage Natacha	38
Figure II.1 : Carte simplifiée des Alpes Françaises (Rossi <i>et al.</i> , 2005, modifié)	43
Figure II.2 : Positions des différentes unités dans leur contexte post-rift (a) et dans leur contexte actuel post-collision (b). Log lithostratigraphiques du domaine dauphinois, d'après Agard et Lemoine (2003).....	44
Figure II.3 : Schéma structural de part et d'autre du front pennique (FP), implantation des galeries EDF, du futur tunnel LTF et localisation des échantillons de gypse prélevés pour les analyses isotopiques du soufre	45
Figure II.4 : Coupe géologique de la galerie Isère-Arc, venues d'eau et température du rocher mesurée à l'avancement (Bordet, 1961)	46
Figure II.5 : Coupe géologique de la galerie Arc-Isère (Barféty <i>et al.</i> , 1984, d'après Gasquet, 1979)	47
Figure II.6 : Coupe géologique prévisionnelle du projet de tunnel ferroviaire Lyon-Turin (d'après Ménard et Sacchi, 1996).....	48
Figure II.7 : Schéma structural du secteur étudié réalisé à partir des cartes géologiques au 1/50 000 du BRGM (Barféty <i>et al.</i> , 1984, Debelmas <i>et al.</i> , 1989, Antoine <i>et al.</i> , 1992, Doudoux <i>et al.</i> , 1999)	50
Figure II.8 : Diagramme de Schoeller-Berkalov représentant les faciès des différentes sources thermales de la région	51
Figure II.9 : Coupe observée dans la galerie de reconnaissance EDF (rapport inédit EDF)	52
Figure II.10 : a) Coupe géologique de la galerie de Feissons-sur-Isère (Bordet, 1961), b) Détail du fond de la vallée de Glaize (Bordet, 1961)	52
Figure II.11 . Carte de localisation des échantillons de roches prélevés.....	53

Figure II.12 : Description pétrographique des trois faciès identifiés dans la formation des MFI.....	56
Figure II.13 : Description pétrographique des gneiss de Pussy.....	56
Figure II.14 : Description pétrographique des granites de la Lauzière et de Notre-Dame de Briançon.....	57
Figure II.15 : Colonne lithostratigraphique de la couverture delphino-helvétique.....	58
Figure II.16 : Description pétrographique des roches permo-carbonifères	59
Figure II.17 : Mise en place des dépôts glaciaires, proglaciaires et périglaciaires (d'après Nicoud, inédit et Campy et Macaire, 2003).....	62
Figure II.18 : Photographie du versant de Doucy en 1901 (Jeudy, 2006, modifié)	63
Figure II.19 : Glissement de la route de Combelouvière à la Thuile.....	63
Figure II.20 : Modèle simplifié de tuff déposé par une source perchée et développant un environnement marécageux (b) à proximité du point de résurgence (a) (in Ford et Pedley, 1996, modifié de Pedley, 1990)	64
Figure II.21 : Les travertins situés à l'arrière des thermes de la Léchère et au niveau de la Route de la Forêt.	65
Figure II.22 : Cristallisation de gypse en choux-fleurs et d'oxydes de fer dans le faciès des micaschistes.....	66
Figure II.23 : Exemples de plis observés dans la couverture delphino-helvétique.....	68
Figure II.24 : Inclinaison des plans axiaux des microplis en fonction de leur position sur les grandes structures plissées.....	68
Figure II.25 : Influence de la pétrographie sur la nature des eaux au Roc Marchand.....	68
Figure II.26 : Doline dans les gypses (les Arcochons).....	70
Figure II.27 : Contact entre le socle et la couverture delphino-helvétique observé à l'Homme de Beurre.....	71
Figure II.28 : Le contact tectonique au NE du col de la Louze	71
Figure II.29 : Le contact tectonique au Lac de Roselend.....	72
Figure II.30 : Etat de contraintes des différentes phases de déformation alpine.....	73
Figure II.31 : Schéma de la méthode des levés de fracturation systématique	74
Figure II.32 : Stéréogrammes des pôles des veines alpines sur l'ensemble du secteur (projection sur l'hémisphère inférieur)	75
Figure II.33 : Schéma montrant les différentes structures formées par les 3 phases de déformation et les possibilités de circulation qui en découlent	76
Figure II.34 : Carte de localisation des différents forages du secteur	77
Figure II.35 : Base du substratum, reconstituée à partir de données de forage lors de la réalisation du barrage des échelles d'Annibal situé à l'amont de la Léchère (Gignoux et Barbier, 1955).....	78
Figure II.36 : Coupes reconstituées à partir des données de forage disponibles sur le secteur de la Léchère	80
Figure II.37 : Bloc diagramme de la structure géologique de la zone d'émergence et circulation des différents types d'eau	81
Figure II.38 : Légende des figures II.35 et II.36.....	81
Figure II.39 : Blocs diagrammes schématiques des possibilités de circulation sur les versants de Celliers et de Naves.....	84
Figure III.1 : Echanges entre réseau hydrographique et substratum, carte synthétique réalisée à partir des résultats des deux campagnes de jaugeage 2005 et 2006	90
Figure III.2 : Précisions sur les échanges entre réseau hydrographique et substratum dans le bassin versant de l'Eau Rousse, campagne réalisée durant l'été 2006	91
Figure III.3 : La station météorologique EDYTEM, installée à Celliers (1400 m d'altitude).....	93
Figure III.4 : Formules de Turc (1961) utilisées pour évaluer l'évapotranspiration potentielle	94
Figure III.5 : Répartition des transmissivités (en m ³ /s) obtenues par les essais par pompage sur les forages Olod, RIV, RV, RVI, RVII et RX ainsi que des charges et artésianismes observés au niveau des forages RVI, RVII, RX et Natacha au moment de leur réalisation : implication sur la définition de la structure géologique	97
Figure III.6 : Essai par pompage réalisé sur les forages Natacha et RVII en mars 2003	99
Figure III.7 : Niveaux piézométriques suivis dans la zone d'émergence thermique (Natacha, RVII, RII, Pz taxi, Pz poste, Isère) du 22/12/00 au 17/09/07.....	100
Figure III.8 : Corrélogrammes croisés entre lame d'eau à Celliers et niveau de Natacha pour les années 2006 et 2007.....	101
Figure III.9 : Enregistrements des niveaux piézométriques des forages Natacha et RVII du 01/01/06 au 31/12/06, pluviométrie et température à la station de Celliers (1400m) et évaluation des temps de réponse de l'aquifère thermal par analyse qualitative.....	102
Figure III.10 : Enregistrements des niveaux piézométriques des forages Natacha et RVII du 01/01/07 au 17/09/07, pluviométrie et température à la station de Celliers (1400m) et évaluation des temps de réponse de l'aquifère thermal par analyse qualitative.....	103
Figure III.11 : Schéma de la station de mesure en continu, installée dans la galerie EDF.....	105
Figure III.12 : Données enregistrées durant la période de fonte nivale (du 28/03/06 au 15/08/07) par la station installée dans la galerie EDF	106
Figure III.13 : Relations hydrodynamiques entre la zone de recharge et les sortie d'une part et entre les différents aquifères de la zone d'émergence d'autre part	108
Figure IV.1 : Cartes de localisation des points de prélèvement de la campagne 2005-2006	113

Figure IV.2 : Relation entre température et conductivité des eaux prélevées lors de la campagne 2005-2006	115
Figure IV.3 : Diagramme de Piper des eaux des différents aquifères prélevés lors de la campagne 2005-2006	116
Figure IV.4 : Diagrammes de Schoeller-Berkalov des eaux des différents aquifères prélevés lors de la campagne 2005-2006....	117
Figure IV.5 : Indices de saturation des eaux du forage Natacha calculés pour différentes températures (analyse du 24/10/04)	117
Figure IV.6 : Indices de saturation des différentes eaux prélevées, 30/08/06	118
Figure IV.7 : a) Evaluation de la température atteinte par les eaux thermales de la Léchère à l'aide de différents géothermomètres b) Evaluation de la température d'équilibre des eaux à partir des IS	119
Figure IV.8 : ACP réalisées sur les données physico-chimiques de la campagne 2005-2006	120
Figure IV.9 : Schéma systémique définissant les éléments marqueurs des différents pôles présents dans la zone d'émergence .	121
Figure IV.10 : Evolution des paramètres physico-chimiques des forages Natacha et RVII durant la campagne de prélèvement 2005-2006.....	122
Figure IV.11 : Conductivité des forages Natacha et RVII enregistrée en continu par le système NAPAC (année 2006)	123
Figure IV.12 : Evolution des paramètres physico-chimiques des points de la galerie EDF et de la source RF durant la campagne de prélèvement 2005-2006.....	124
Figure IV.13 : Evolution des paramètres physico-chimiques du piézomètre poste durant la campagne de prélèvement 2005-2006	125
Figure IV.14 : Diagramme Cl en fonction de Na des eaux des différents aquifères du site de la Léchère ainsi que des eaux thermales de Brides et Salins (Siméon, 1980)	126
Figure IV.15 : Diagramme SO_4 en fonction de Ca des eaux des différents aquifères du site de la Léchère ainsi que des eaux thermales de Brides et Salins (Siméon, 1980).....	127
Figure IV.16 : Diagramme HCO_3 en fonction de Ca des eaux des différents aquifères du site de la Léchère ainsi que des eaux thermales de Brides et Salins (Siméon, 1980).....	128
Figure IV.17 : Diagramme Mg en fonction de Ca des eaux des différents aquifères du site de la Léchère ainsi que des eaux thermales de Brides et Salins (Siméon, 1980)	128
Figure IV.18 : Evaluation des phénomènes de mélange à partir de l'ACP réalisée sur l'ensemble des échantillons prélevés durant la campagne 2005-2006	129
Figure IV.19 : Diagrammes de Schoeller-Berkalov des eaux des forages thermaux de la Léchère	131
Figure IV.20 : ACP réalisée sur les analyses physico-chimiques des forages thermaux de la Léchère.....	132
Figure IV.21 : Evaluation des proportions de mélange dans les forages thermaux à partir de l'ACP réalisée sur l'ensemble des échantillons prélevés durant la campagne 2005-2006 associé au analyses des forages thermaux	132
Figure IV.22 : Evolution des eaux des forages RII et RVII entre le début de leur exploitation et aujourd'hui.....	133
Figure IV.23 : Evolution des paramètres physico-chimiques du forage RII de 1949 à 2003	134
Figure IV.24 : Evolution des paramètres physico-chimiques du forage RVII de 1987 à 2004	135
Figure IV.25 : Evolution des paramètres physico-chimiques du forage Natacha de 1998 à 2005	136
Figure IV.26 : ACP réalisées sur les teneurs en éléments traces des eaux (a) et des roches (b) du secteur étudié	140
Figure IV.27 : Protocole de prélèvement de l'eau du forage Natacha pour les analyses de ^{222}Rn et de gaz dissous.....	144
Figure IV.28 : Equations de la réduction bactérienne des sulfates (Clark et al., 1995)	145
Figure IV.29 : Chaîne de désintégration radioactive de ^{238}U avec les temps de demi-vie de chaque élément	146
Figure IV.30 : Relation δD en fonction de $\delta^{18}O$, campagne 2005-2006.....	148
Figure IV.31 : Gradients isotopiques en rive droite et rive gauche de l'Isère.....	149
Figure IV.32 : Teneurs moyennes annuelles en 3H à la station de Thonon à partir des concentrations mensuelles pondérées par la hauteur des précipitations, Ravailleau (2001), modifié	151
Figure IV.33 : Relation $\delta^{13}C$ en fonction de $\log(pCO_2)$ pour les eaux du secteur étudié	152
Figure IV.34 : Comparaison des signatures en ^{14}C et en $\delta^{13}C$ des eaux du forage Natacha par rapport à celles des différents réservoirs de C	153
Figure IV.35 : Formules d'équilibration du $\delta^{13}C_{CMTD}$ en systèmes ouvert et fermé sur le CO_2	154
Figure IV.36 : Contributions des trois origines de C dans les eaux du forage Natacha.....	154
Figure IV.37 : Application des modèles d'âge classiques (Tamers, 1960, Pearson et Hanshaw, 1970, Mook, 1976, Fontes et Garnier, 1979, Salem et al., 1980, Eichinger, 1983, Olive, 1999 in Simler, 2007).....	155
Figure IV.38 : Formules de calcul des facteurs de dilutions du ^{14}C par la réduction des sulfates et l'arrivée de CO_2 mantellique, d'après Kattan (2002).....	155
Figure IV.39 : a) Calcul des facteurs de dilution du ^{14}C par la réduction des sulfates et l'arrivée de CO_2 profond	156
b) Application des modèles d'âge classiques à partir de la valeur de ^{14}C initiale ainsi corrigée	156
Figure IV.40 : Equations de fractionnement calcite-eau et calcite- HCO_3	158
Figure IV.41 : Acquisition de la minéralisation des eaux du site de la Léchère	160

Figure V.1 : Equations fondamentales régissant les écoulements	163
Figure V.2 : Equations fondamentales régissant les flux de chaleur	164
Figure V.3 : Flux contrôlé par la topographie (d'après Hubbert, 1940 in Domenico et Schwartz, 1998)	166
Figure V.4 : Schéma de la fissuration et de la répartition de l'eau dans un versant montagneux (Bordet, 1971)	166
Figure V.5 : Illustration des effets de la topographie sur les écoulements et sur la répartition des températures	167
Figure V.6 : Modèle conceptuel du système thermal de la Léchère	168
Figure V.7 : Géométrie et maillage du modèle 2D vertical du système de la Léchère	169
Figure V.8 : Conditions aux limites de la calibration hydrodynamique	171
Figure V.9 : Répartition de la conductivité hydraulique K (en m/s) issue de la calibration hydrodynamique	172
Figure V.10 : Résultats de la calibration hydrodynamique	174
Figure V.11 : Résultats de la simulation hydrodynamique en absence du forage Natacha et de la galerie EDF : répartition des charges dans le massif	175
Figure V.12 : Simulation thermique 1 : mise en place du gradient géothermique	177
Figure V.13 : Conditions aux limites de la simulation thermique 2 : perturbation du gradient géothermique par les circulations d'eau	178
Figure V.14 : Résultats de la simulation thermique 2 : perturbation du gradient géothermique par les circulations d'eau	179
Figure V.15 : Simulation thermique 2 : évolution simulée du gradient géothermique au niveau de la vallée après la fin de la dernière glaciation	180
Figure V.16 : Simulation 3, impacts simulés des ouvrages présents sur le site thermal	181
Figure VI.1 : Schéma global du fonctionnement du système d'écoulement versants/vallée dans le secteur de la Léchère	187
Figure VI.2 : Définition du risque de dégradation de l'aquifère thermal profond	189
Figure VI.3 : Carte de localisation pour l'implantation de forages de reconnaissance	190

liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification des eaux thermales (Moret, 1946)	5
Tableau I.2 : Limites de qualité des eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine	7
Tableau I.3 : Récapitulatif des caractéristiques des forages thermaux réalisés sur le site de la Léchère	19
Tableau I.4 : Bilan sur l'état des connaissances du système thermal de la Léchère à l'issue de la synthèse bibliographique et objectifs de la thèse	39
Tableau II.1 : Sites thermaux associés aux contacts tectoniques	49
Tableau II.2 : Liste non exhaustive des minéraux secondaires observés dans les fentes alpines en fonction de la nature de l'encaissant (Bertrand et al., 2006).....	55
Tableau III.1 : Conductivités aval mesurées et théoriques sur la section 1 de l'ER, années 2005 et 2006 (en $\mu\text{S}/\text{cm}$).....	91
Tableau III.2 : Localisation et caractéristiques des stations Météo France présentes du secteur de la Léchère	92
Tableau III.3 : Gradients altitudinaux annuels de pluviométrie sur les versants de Celliers et Naves et gradients altitudinaux mensuels de température sur le versant de Celliers (juillet 2005 à juin 2006)	93
Tableau III.4 : Valeurs des Evapotranspiration Réelle (ETP) et Pluie Efficace (PE) en mm à Celliers (1400m)	94
Tableau III.5 : Bilan des Pluies Efficaces et du Ruissellement sur les bassins versants de l'Eau Rousse et du Grand Nant de Naves.....	95
Tableau III.6 : Résultats des essais par pompage réalisés sur les forages thermaux du site de la Léchère	97
Tableau III.7 : Evolution de la température ($^{\circ}\text{C}$) et de la conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des forages RVI et RVII pendant les essais par pompage de 1987 (Eberentz, 1987).....	98
Tableau IV.1 : Moyennes des paramètres physico-chimiques mesurés durant la campagne 2005-2006	114
Tableau IV.2 : Tableau d'analyses du 24/10/04 qui a servi à calculer les indices de saturation du forage Natacha	117
Tableau IV.3 : Tableau des analyses des différents forages thermaux.....	131
Tableau IV.4 : Tableau synthétique des éléments traces analysés dans les roches et les eaux	138
Tableau IV.5 : Intervalles de variation des analyses des éléments traces réalisées sur les forages thermaux de la Léchère	138
Tableau IV.6 : Tableau des analyses des éléments traces réalisées sur les eaux des différents aquifères du secteur de la Léchère.....	138
Tableau IV.7 : Eléments traces présents dans les eaux et les roches.....	141
Tableau IV.8 : Comparaison des teneurs en éléments traces des eaux du forage Natacha et de la galerie EDF avec les teneurs observées par Kilchmann et al. (2004) dans les aquifères évaporitiques et cristallins.....	141
Tableau IV.9 : Tableau synthétique définissant l'origine des éléments traces contenues dans les eaux du forage Natacha	142
Tableau IV.10 : Tableau d'analyses du ^{222}Rn et du ^{226}Ra dans les forages thermaux de la Léchère (données internes)	143
Tableau IV.11 : Tableau de l'analyse des gaz dissous du forage Natacha de 1999	143
Tableau IV.12 : Suivi des teneurs en sulfures par dosage iodométrique, en degré sulhydrométrique ($^{\circ}\text{SF}$) des eaux du forage Natacha (du 23/11/05 au 04/05/06).....	143
Tableau IV.13 : Tableau de l'analyse des gaz dissous du forage Natacha (2007) comparée à celle des eaux thermales d'Allevard (1985) (Courtois et Vigouroux, 2005a) et à celle de l'atmosphère	144
Tableau IV.14 : Tableau synthétique des analyses des teneurs en espèces soufrées.....	144
Tableau IV.15 : Quelques exemples internationaux et français de teneurs en ^{222}Rn dans les eaux thermales	146
Tableau IV.16 : Analyses du $\delta^{13}\text{C}$ et du ^{14}C des eaux du forage Natacha par différents laboratoires	147
Tableau IV.17 : Calcul des altitudes moyennes des aires d'infiltration des points prélevés lors de la campagne 2005-2006	150
Tableau IV.18 : Tableau des analyses de ^3H réalisées sur les eaux du site de la Léchère (Siméon, 1980, Poul et Iundt, 1985 et Dray, 2003)	151
Tableau IV.19 : Analyses des rapports $\delta^{34}\text{S}$ (SO_4), $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4), $\delta^{34}\text{S}$ (H_2S) et $\delta^{34}\text{S}$ (S^{2-}) des eaux thermales de la Léchère et des évaporites	157
Tableau IV.20 : Analyses du $\delta^{18}\text{O}$ des échantillons de travertins et des eaux du forage Natacha et de la source RF	158
Tableau V.1 : Contraintes du modèle : conditions de charge et de débit, temps de transfert, températures observés	167
Tableau V.2 : Calcul des Pluies Efficaces (PE), calculées avec la formule de Turc mensuel et affectées au modèle	170
Tableau V.3 : Comparaison des paramètres réels et des paramètres obtenus lors de la calibration hydrodynamique.....	172
Tableau V.4 : Comparaison des conductivités hydrauliques de la nappe alluviale et de l'écroulement ancien estimées grâce aux essais par pompage et des mêmes conductivités attribuées au modèle.....	173
Tableau V.5 : Comparaison des températures réelles et des températures simulées.....	178

Chapitre I : Présentation générale

Le chapitre I établit un bilan des connaissances autour de l'hydrothermalisme en général puis autour du site thermal de la Léchère en particulier. La synthèse bibliographique des études techniques réalisées sur le secteur permet de définir plus précisément le point de départ et les objectifs de cette étude.

Chapitre I : Présentation générale

I. Problématique de l'étude

Les intersections entre les grands accidents tectoniques et les vallées alpines sont très souvent des lieux de convergence d'eaux souterraines, profondes et superficielles, circulant dans les versants encadrant les vallées. Les remplissages quaternaires des anciennes vallées glaciaires camouflent souvent l'existence de ces ressources thermales (Moret, 1950a). Le site thermal de la Léchère en est un exemple, pour lequel l'exploitation de la ressource permet d'avoir à disposition un jeu de données relativement conséquent.

Cette étude du système thermal de la Léchère se fait en partenariat financier avec le propriétaire de la ressource : la Communauté de Communes des Vallées d'Aigueblanche (CCVA). Participent également à ces travaux l'exploitant de la ressource (Société des Eaux Thermales de la Léchère), le Bureau des Recherches Géologiques et Minières (BRGM), le bureau d'étude SOGREAH ainsi que les instituts de veille sanitaire : la Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales (DDASS) et la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE). Les éléments de compréhension, amenés par cette étude, serviront de bases pour répondre aux questions de ces acteurs.

Ces questions concernent non seulement des aspects pratiques :

- Quel est le degré de vulnérabilité du système thermal ?
- Quelles en sont les conséquences pour la gestion et l'exploitation de la ressource ?
- Et plus particulièrement, peut-on implanter un forage d'exploitation de secours et à quel endroit ?

...mais également des aspects fondamentaux plus généraux, nécessaires à la communication envers les curistes et la population locale et qui peuvent se résumer ainsi :

- Pourquoi une ressource thermique de cette nature existe-t-elle à la Léchère ?

Afin de répondre à ces questions, une vision globale du système est nécessaire. Cette étude concerne donc les deux bassins versants encadrant le site et prend en compte les écoulements souterrains profonds mais également plus superficiels. Ce mémoire s'articule autour de six grands volets :

- Le chapitre I établit un bilan des connaissances autour de l'hydrothermalisme en général puis autour du site thermal de la Léchère en particulier. La synthèse bibliographique des études techniques réalisées sur le secteur permet de définir plus précisément le point de départ et les objectifs de cette étude.
- Le chapitre II définit la structure géologique. Dans ce but, les formations géologiques sont décrites, une cartographie de la zone de contact tectonique est réalisée, la fracturation du massif est analysée et la structure du remplissage quaternaire dans la zone d'émergence est précisée.
- Le chapitre III traite des aspects hydrodynamiques du système. Les entrées du système (infiltration et pertes du réseau hydrographique) sont quantifiées. Les relations hydrodynamiques entre les aquifères présents dans la zone d'émergence thermique sont établies. Les réponses du système aux signaux d'entrée sont analysées.
- Le chapitre IV est consacré à l'étude des échanges fluides-roches grâce à l'outil hydrogéochimique. Pour cela, les éléments majeurs, les éléments traces et les isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$ et ^{14}C) des eaux et des roches du secteur ainsi que la composition de la phase gazeuse des eaux du forage Natacha sont analysés.
- Le chapitre V rend compte des résultats de la modélisation numérique couplée hydrodynamique et thermique, basée sur un modèle conceptuel construit à partir des informations des chapitres précédents.
- Le chapitre VI synthétise l'ensemble des éléments apportés par cette étude et propose des réponses aux questions évoquées précédemment.

II. L'hydrothermalisme

1. L'hydrothermalisme : une thématique vaste

Le terme d'hydrothermalisme regroupe tous les phénomènes liant les circulations d'eau et leur réchauffement. Bien qu'il n'existe pas de définition précise, on peut considérer que ceci englobe trois thématiques principales de recherche : l'hydrothermalisme comme manifestation du magmatisme, la géothermie et enfin les sources thermales exploitées par les stations thermales.

1.1. L'hydrothermalisme et le magmatisme

Les études sur les phénomènes hydrothermaux au niveau des dorsales océaniques portent essentiellement sur les interactions fluides-roches au niveau des fumeurs noirs (Paulick *et al.*, 2006) ou du plancher basaltique (Bodei *et al.*, 2006). Ces zones présentent aussi l'intérêt d'être le siège de l'apparition des premières formes de vie sur Terre (Li et Kusky, 2007).

Les manifestations hydrothermales sont également présentes dans les zones de magmatisme récent, au niveau des sites volcaniques (Finizola, 2002, Federico *et al.*, 2004) avec les fumerolles ou au niveau des intrusions plutoniques avec les soffioni. La figure I.1 montre un modèle de fonctionnement des systèmes thermaux en contexte de volcanisme actif (Finizola, 2002). Dans ce type de contexte, les eaux vont lessiver les roches volcaniques et s'enrichir en gaz issus du magma. L'étude des manifestations hydrothermales en contexte volcanique permet, par exemple, de mettre en place des systèmes de surveillance des éruptions.

En lien avec cette thématique, on peut citer l'étude des fentes ou veines minérales. En effet, les déformations tectoniques affectant les massifs cristallins mènent souvent au développement de circulations de fluides hydrothermaux anciens comme dans le massif du Mont Blanc (Rossi *et al.*, 2005).

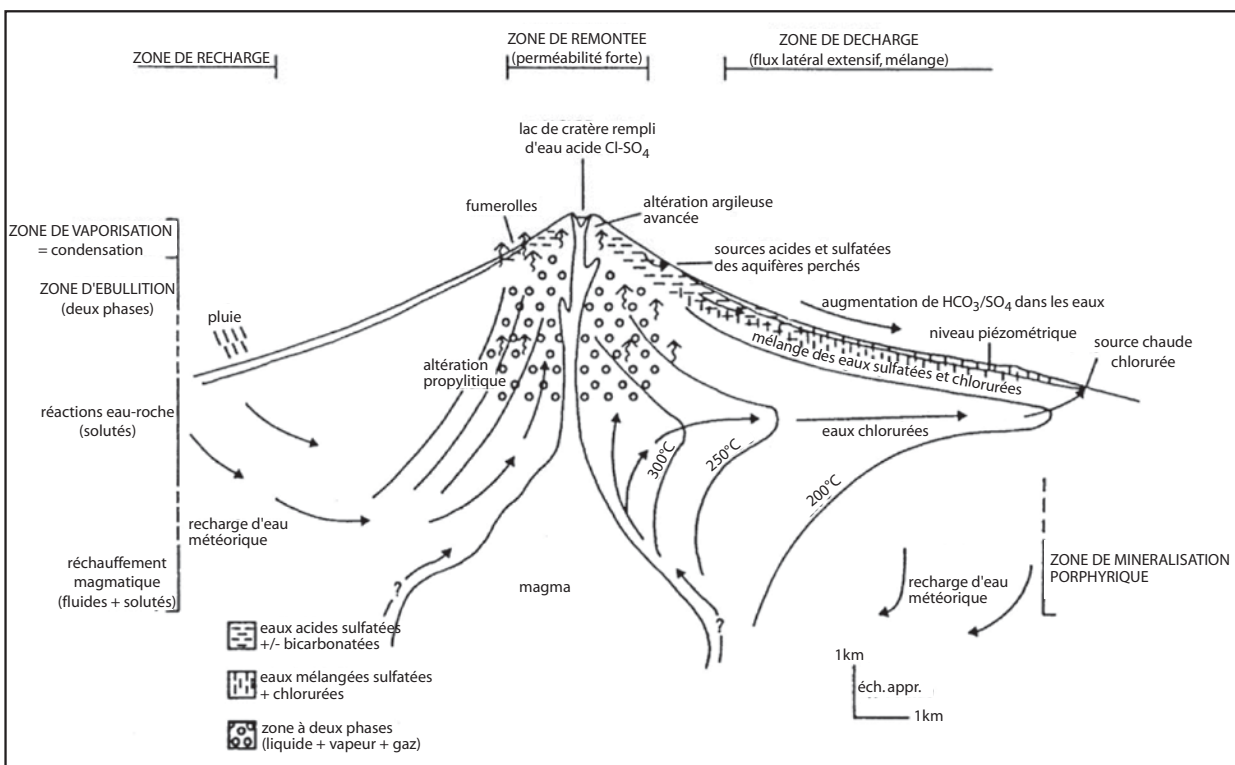


Figure I.1 : Modèle de circulation des fluides au sein d'un système hydrothermal d'un volcan actif (Finizola (2002), modifié)

1.2. L'hydrothermalisme et la géothermie

L'énergie géothermique apparaît comme une part non négligeable de l'avenir énergétique de la planète. En simplifiant, l'exploitation de cette énergie consiste à injecter de l'eau dans un forage profond et à la récupérer chaude par un autre forage. L'implantation de telles infrastructures doit se faire dans les zones à fort gradient géothermique. Bertani (2005) dresse un bilan des ressources géothermiques mondiales. Les Philippines apparaissent comme le plus gros producteur d'énergie géothermique avec 9253 GWh/an en 2003 soit 19,1% de la production d'énergie nationale. La principale ressource d'énergie géothermique française est représentée par la zone géothermale de Bouillante en Guadeloupe (Traineau *et al.*, 1997) mais les recherches se tournent actuellement vers les ressources des autres départements d'outre mer (Genter et Traineau, 2004). En métropole, le site de Soultz-sous-Forêts sert de site atelier pour développer l'exploitation de ce type d'énergie (Gérard *et al.*, 2006).

Dans cette thèse, nous écarterons ces deux volets de l'hydrothermalisme et nous nous limiterons à l'étude des émergences chaudes exploitées par les stations thermales.

2. Le thermalisme

2.1. Historique

Dans les temps anciens, la présence de sources chaudes ne trouvait d'explications que dans les croyances religieuses. Jusqu'au XIX^{ème} siècle, les textes ne traitent que des aspects descriptifs des eaux thermales et de leurs effets thérapeutiques (Baudry, 1736, Debrest, 1778, Opaix, 1816, Socquet, 1824 et Ganderax, 1827). Durand-Fardel (1857) commence à évoquer l'origine des eaux thermales comme "des volcans réduits à la partie acqueuse" ou encore des "émanations gazeuses, lesquelles [...] arrivent à la surface condensées en eaux minérales et thermales". Le débat sur l'origine juvénile ou météorique des eaux thermales commence.

Moret (1946) propose une classification des sources thermales en fonction de quatre critères : le type d'émergence, l'origine des eaux, la cause de la remontée et l'origine de la température (tableau I.1).

type d'émergence	origine des eaux	cause de la remontée	origine de la température
diaclasses failles filons contact sédimentaire plissement griffon diffus	vadose juvénile mixte	pression hydrostatique force expansive de la vapeur d'eau gaz en suspension différence de densité capillarité	gradient géothermique volcanisme réactions physico-chimiques exothermiques

Tableau I.1 : Classification des eaux thermales (Moret, 1946)

Dans les années 1960 à 1980, les études sur les sources thermales tentent de mettre en relation la nature de la ressource avec le contexte géologique (Blavoux, 1966, Teisseyre, 1968, Le Maréchal, 1976, Siméon, 1980, Vuataz, 1982 et Toro, 1988).

Dans les années 1990, la nature et la répartition des sources thermales sont analysées à l'échelle du pays, en Espagne (Cuchi-Oterino *et al.*, 2000), en Slovaquie (Melioris, 2000), au Canada (Grasby et Hutcheon, 2001) ou encore en Russie (Vinograd, 2004).

La plupart des études récentes (années 2000) se focalisent sur des points particuliers tels que la géochimie ou la modélisation thermodynamique des systèmes thermaux. Les études pluridisciplinaires, prenant en compte à la fois la géologie, l'hydrogéologie, l'hydrodynamique, la géochimie et la thermique des sites sont moins nombreuses (Muralt, 1999, Finizola, 2002, Baietto *et al.*, 2005, Durand, 2005, Le Fanic, 2005, Duriez, 2006, Guyomard, 2006 et Gallino, en cours).

2.2. Les modes de fonctionnement

Le fonctionnement de tous les systèmes thermaux est marqué par 3 étapes :

- un transfert des eaux météoriques vers la profondeur ;
- un réchauffement des eaux ;
- une remontée rapide à la surface.

Blavoux (1995) considère que les eaux thermales sont **majoritairement** alimentées par les eaux météoriques et l'origine juvénile proposée par Moret (1946) peut donc être rejetée. Les sources thermales se différencient alors en fonction de deux critères : le mode de réchauffement des eaux et le moteur de la remontée des eaux vers la surface.

2.2.1) Le mode de réchauffement des eaux

A partir d'environ 30 à 50 m de profondeur, la température augmente sous l'effet du flux géothermique interne. Le gradient géothermique dépend de la valeur du flux terrestre et de la conductivité des roches selon l'équation (1) :

$$q = -k \frac{dt}{dz} \quad (1)$$

avec : q le flux géothermique en W/m²

k la conductivité thermique des roches en W/m/°C

$\frac{dt}{dz}$ le gradient géothermique en °C/m

Le gradient géothermique est en moyenne de 1°C/33m (ou 0,03°C/m) (Burger *et al.*, 1985) et va être modifié par différents facteurs que l'on peut dissocier en facteurs externes et internes. Les facteurs externes ne modifient pas la valeur du flux géothermique et regroupent : la nature des roches encaissantes, la topographie, l'érosion, les variations paléo-climatiques et les circulations d'eau (Kohl *et al.*, 2001). Les facteurs internes vont modifier la valeur du flux géothermique. D'après Finizola (2002), les phénomènes responsables de cette modification sont : le magmatisme actif ou récemment actif (cénozoïque), la tectonique (menant à un amincissement de la croûte) et le métamorphisme profond.

2.2.2) Le moteur de la remontée en surface

La remontée rapide vers la surface se fera par l'intermédiaire de zones de forte perméabilité telles que des failles, diaclases, filons ou contacts sédimentaires. Le moteur de cette remontée peut être de trois types :

- La pression hydrostatique : une différence d'altitude entre la zone d'infiltration et la zone d'émergence va créer une différence de charge suffisante pour faire remonter les eaux vers la surface. On parle de système en U ou de siphon.
- La présence de gaz dissous : les eaux thermales peuvent contenir des gaz dissous. Ils proviennent soit d'émissions depuis les chambres magmatiques (CO₂, H₂, N₂) soit de phénomènes superficiels (comme la réduction des sulfates par les bactéries par exemple) libérant de l'H₂S ou du CO₂. La présence de ces gaz dissous va accélérer la remontée vers la surface. En effet, lorsque la pression diminue au moment de la remontée, les gaz dissous sont libérés sous forme libre et ceci provoque une diminution de densité du fluide alors constitué de deux phases : liquide et gazeuse (Valles, 2007).
- La différence de densité de l'eau chaude : la densité de l'eau diminue lorsque la température augmente. Ceci favorise aussi la remontée des eaux vers la surface mais constitue rarement une condition suffisante.

Pour chaque source étudiée, il convient de définir ces deux critères. Cependant, chaque source thermique est particulière et peut présenter un ou plusieurs modes de réchauffement ainsi qu'un ou plusieurs moteurs de remontée.

2.3. Le thermalisme en France

2.3.1) Cadre législatif

En France, le cadre législatif (Académie de Médecine et Ministère de la Santé) définit plusieurs types “d’eaux de boisson”.

- Les eaux de distribution publique

Ce sont soit (i) des eaux souterraines provenant de sources ou de forages, soit (ii) des eaux superficielles.

La composition physico-chimique de ces eaux ne doit pas dépasser les normes de potabilité française (décret 2001-1220 du 20 décembre 2001, cf. tableau I.2).

GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	LIMITES DE QUALITE	UNITE	
Paramètres organoleptiques	Coloration après filtration	200	mg/l (échelle platine/cobalt)	
Paramètres liés à la structure naturelle des eaux	température	25	°C	
	chlorures	200	mg/l	
	sulfates	250	mg/l	
	sodium	200	mg/l	
	pourcentage d'oxygène dissous	30	%	
Substances indésirables	nitrates	eaux superficielles	50	mg/l
		autres eaux	100	mg/l
	ammonium	4	mg/l	
	oxydabilité en milieu acide	10	mg/l O ₂	
	phénols para-nitraniline et 4-amino-antipyrine	0,1	mg/l	
	agents de surface (réagissant au bleu de méthylène)	0,5	mg/l (laury-sulfate)	
	hydrocarbures dissous émulsionnés après extraction	1	mg/l	
	zinc	5	mg/l	
	baryum	eaux superficielles	1	mg/l
Substances toxiques	arsenic	100	µg/l	
	cadmium	5	µg/l	
	cyanures	50	µg/l	
	chrome total	50	µg/l	
	mercure	1	µg/l	
	plomb	50	µg/l	
	sélénium	10	µg/l	
	pesticides	5	µg/l	
	hydrocarbures polycycliques	1	µg/l	
Paramètres microbiologiques	Escherichia coli	20000	/100ml	
	Entérocoques	10000	/100ml	

Tableau I.2 : Limites de qualité des eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine fixées pour l'application de la procédure prévue aux articles 5 et 7 (3°) du présent décret (décret 2001-1220, Annexe III)

- Les eaux de source

Il s'agit d'eaux d'origine souterraine soumises elles-aussi à des normes de potabilité (décret 89-369 du 6 juin 1989) mais qui ne doivent subir aucun traitement ou adjonction.

- Les eaux minérales naturelles

Ce sont des eaux d'origine souterraine soumises uniquement aux normes de potabilité bactériologique. Elles ne doivent subir aucun traitement ou adjonction. Leur composition physico-chimique, non soumise aux normes de potabilité, doit néanmoins rester constante vis-à-vis de l'analyse de référence prise en compte dans le décret d'autorisation à exploiter la ressource. Une eau minérale se distingue des autres eaux par des caractéristiques physico-chimiques particulières (fortes conductivité et température ou teneur élevée en certains éléments traces par exemple) qui lui confèrent des propriétés thérapeutiques.

Il n'existe pas de définition légale des eaux thermales mais les eaux exploitées dans les établissements thermaux sont soumises aux mêmes réglementations que les eaux minérales naturelles. L'autorisation d'exploiter une ressource thermique est délivrée par Arrêté Ministériel après l'instruction du dossier par la Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales (DDASS) et sa présentation au Conseil Départemental d'Hygiène (CDH). La Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) n'est plus impliquée dans l'instruction des dossiers de demande d'autorisation d'exploiter une eau minérale depuis 2006.

Du point de vue hydrogéologique, les eaux minérales sont des eaux souterraines présentant une forte minéralisation et les eaux thermales sont considérées comme des eaux dont la température dépasse celle des eaux souterraines de la région (Pomerol et Ricour, 1992, Alfaro 1994). Une eau thermique n'est donc pas nécessairement minérale et vice-versa mais les eaux sont très souvent thermales et minérales car la minéralisation et le réchauffement des eaux souterraines sont intimement liés.

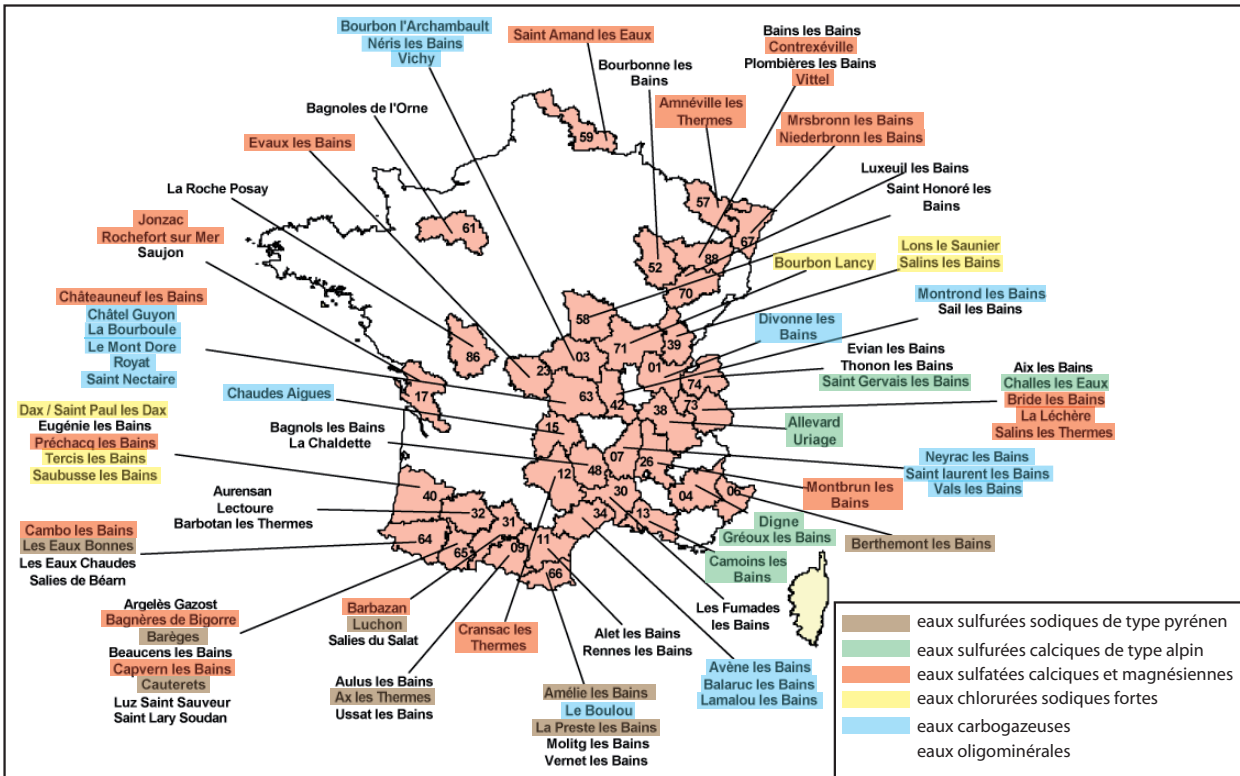


Figure I.2 : Carte de localisation des sites de thermalisme en France (Division Nationale des Eaux Minérales et Thermales 2003, modifié)

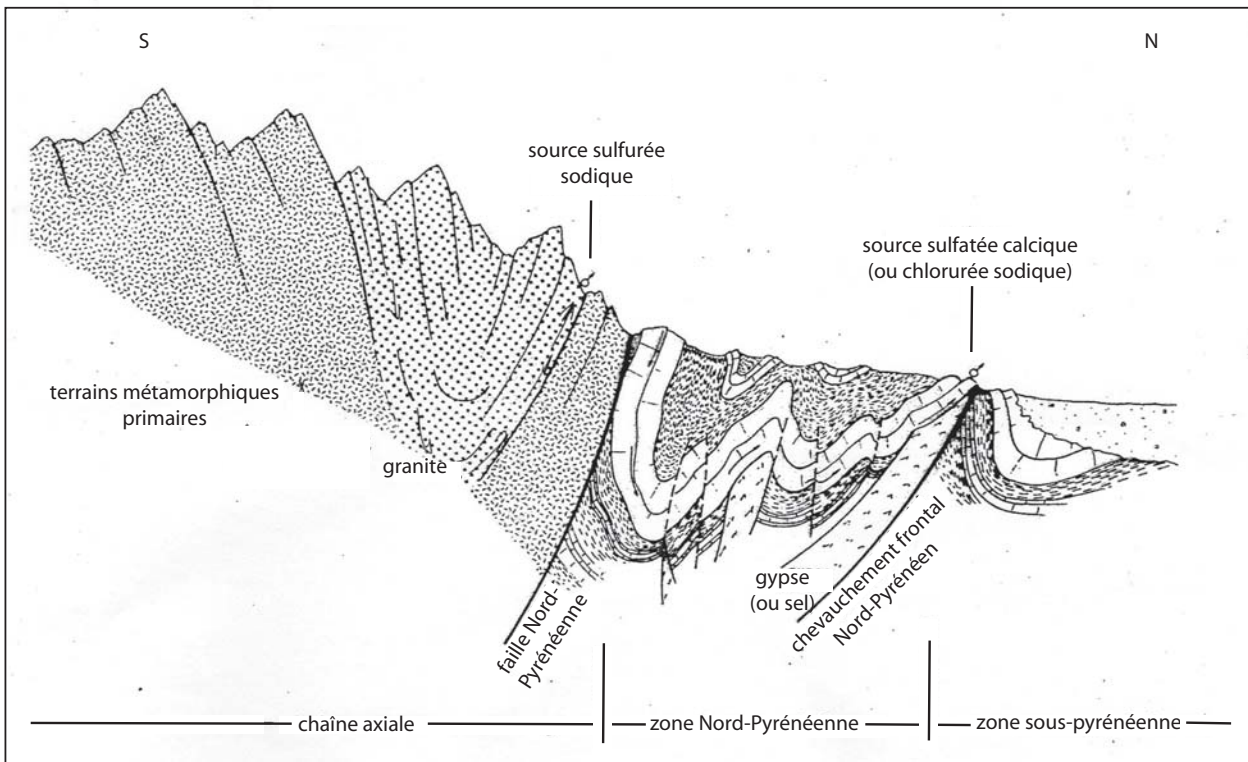


Figure I.3 : Schéma hydrogéologique des différents types d'eau minérale des Pyrénées (Pomerol et Ricour, 1992)

2.3.2) Les provinces thermales françaises

En France, le patrimoine thermal est très varié. On peut subdiviser la France en provinces thermales en fonction des caractéristiques chimiques des eaux. Ces caractéristiques sont liées aux conditions de fonctionnement décrites précédemment mais également à la nature des roches encaissantes dans lesquelles elles circulent. Le spectre de la minéralisation des eaux thermales françaises est large, les eaux présentent des conductivités de quelques centaines de $\mu\text{S}/\text{cm}$ (pour les eaux peu minéralisées comme celles d'Evian) jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de $\mu\text{S}/\text{cm}$ (pour les eaux chlorurées sodiques fortes comme celles de Salins-les-Bains ou Lons-le-Saunier).

On peut distinguer cinq provinces thermales françaises (Canellas et Blavoux, 1995), (figure I.2) :

- Les eaux sulfurées sodiques de type pyrénéen ($\text{Na-H}_2\text{S}$)

Ces eaux, caractéristiques de la zone axiale des Pyrénées (figure I.3), circulent dans les massifs granitiques fracturés qui sont en contact avec des terrains métamorphiques primaires imperméables. Leur circulation se fait à grande profondeur (5 à 7km) et leur température à l'émergence est de l'ordre de 60 à 80°C. Leur caractéristique sulfurée provient de l'altération de la pyrite et leur minéralisation est relativement faible. Les meilleurs exemples de ce type d'eaux thermales sont les eaux de Luchon (Haute Garonne) et Ax-les-Thermes (Ariège).

- Les eaux sulfurées calciques de type alpin ($\text{Ca-H}_2\text{S}$)

On trouve ces eaux au niveau des fronts de chevauchement des Alpes Occidentales marqués par les évaporites, et servant de niveaux de décollement des chevauchements. Pendant leur parcours, elles s'enrichissent en sulfates qui sont ensuite transformés en sulfures par réduction bactérienne. Ce groupe d'eaux thermales n'est pas très homogène car certaines peuvent également s'enrichir en halite. La source d'Allevard (figure I.4), par exemple, se charge en sulfates du Trias qui sont ensuite dégradés par les bactéries, présentes dans le circuit thermal grâce à la libération de CH_4 par la couverture sédimentaire.

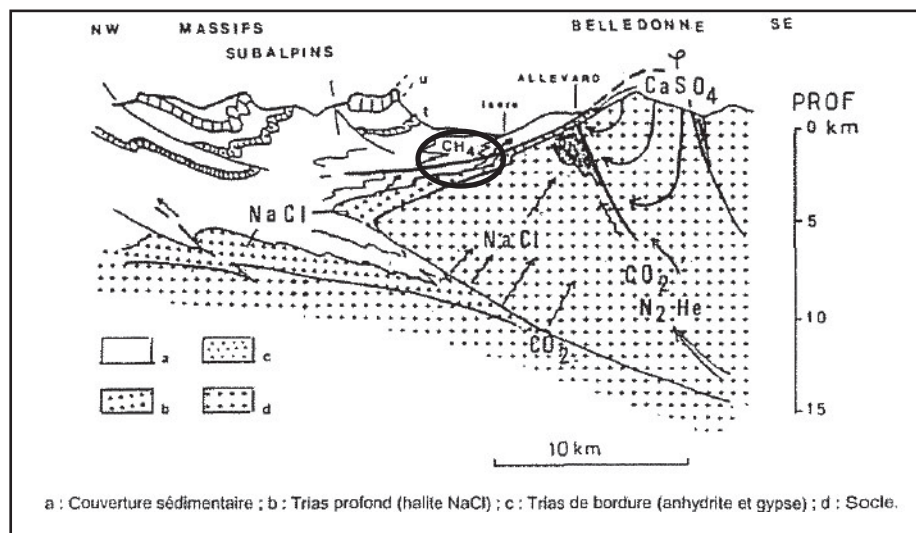


Figure I.4 : Coupe géologique à l'échelle plurikilométrique des réservoirs à l'origine de la minéralisation de la source d'Allevard, tirée du programme ECORS (complétée) (d'après Dazy et Razack, 1989 in Courtois, 2005a)

- Les eaux sulfatées calciques et magnésiennes (Ca-Mg-SO_4)

On trouve ce type d'eau au niveau des grands accidents jalonnés d'évaporites aussi bien dans les Alpes avec Brides-les-Bains (Savoie), que le long du chevauchement frontal Nord-Pyrénéen (figure I.3) avec Capvern-les-Bains (Hautes-Pyrénées). De même, à l'Est du bassin parisien, les eaux profondes sont marquées par leur circulation dans les dépôts triasiques et remontent en surface par l'intermédiaire de grandes failles comme à Vittel (Vosges). Pour ces eaux, les sulfates ne sont pas ou peu transformés en sulfures.

- Les eaux chlorurées sodiques fortes (Na-Cl)

Ces eaux sont en contact avec de la halite. On les trouve soit dans le bassin aquitain au niveau des diapirs de sel comme à Dax (Landes) (figure I.5), soit dans le Jura externe au niveau des chevauchements comme à Salins-les-Bains (Jura). A Dax, la mise en place d'un diapir de sel a permis de réunir deux conditions nécessaires à l'émergence d'eau thermo-minérale : (i) la verticalisation des couches réservoirs du Sénonien et (ii) la mise en contact des eaux du réservoir sénonien avec de la halite (Le Fanic, 2005).

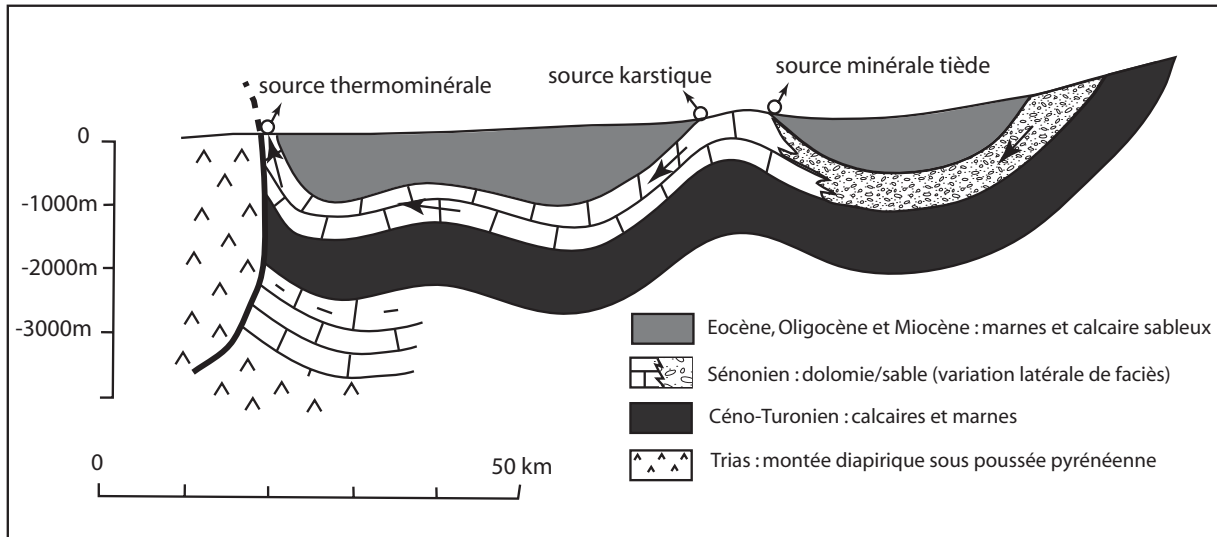


Figure I.5 : Schéma de circulation du système thermal de Dax (Blavoux, 1998 modifié)

- Les eaux carbogazeuses (Na-HCO₃-CO₂ ou Ca-HCO₃-CO₂)

Elles représentent une vaste province s'étendant de la Limagne à l'Allier en passant par le Massif Central. Elles contiennent du CO₂ d'origine profonde, libéré par des fractures ouvertes de direction NE-SW. Elles sont bicarbonatées sodiques dans le Massif Central et bicarbonatées calciques dans les zones où le socle est recouvert par des dépôts sédimentaires. Ainsi, les eaux carbogazeuses de Montrond (Loire) (figure I.6) sont issues du bassin détritique du Forez et sont marquées par des arrivées de CO₂ d'origine profonde provenant du socle hercynien fracturé.

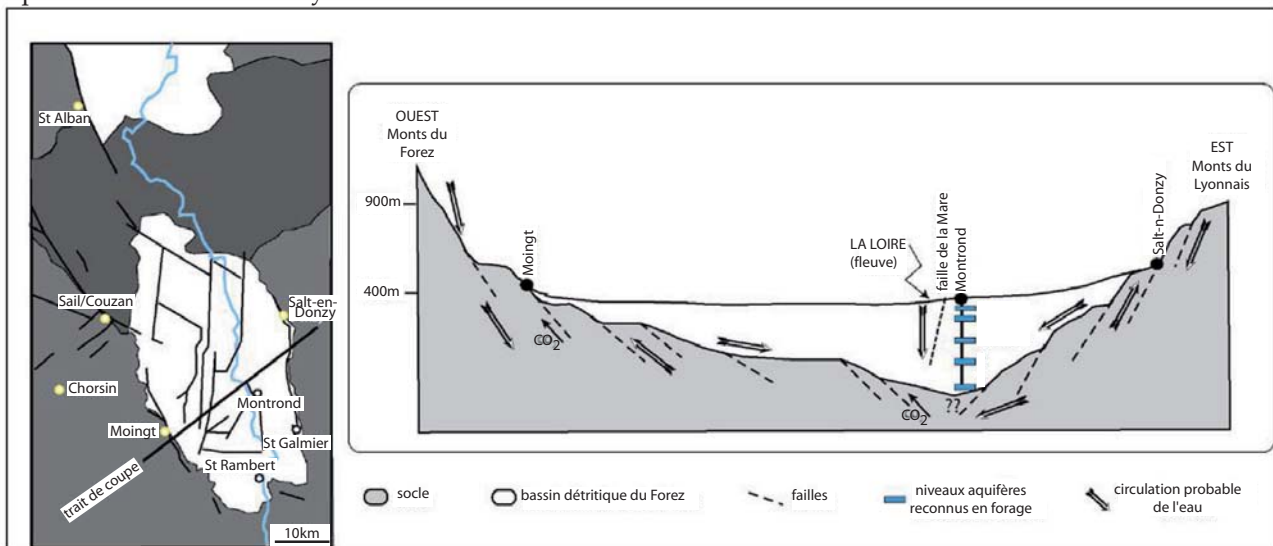


Figure I.6 : Coupe schématique du graben du Forez et zones de circulation possibles de l'eau en profondeur (Gal, 2005)

Tous ces faciès chimiques peuvent présenter des minéralisations plus ou moins intenses. Ainsi, on parlera d'eaux oligominérales pour toutes les eaux thermales faiblement minéralisées (< 500µS/cm). Elles correspondent à des eaux chaudes circulant à grande profondeur mais dont l'encaissant ne permet pas d'acquérir une forte minéralisation comme ceci est le cas dans les domaines calcaires à Aix-les-Bains (Savoie) ou dans les aquifères du bassin aquitain avec Aurenosa (Gers). Les eaux d'Evian (figure I.7) circulent dans des dépôts quaternaires et acquièrent un faciès bicarbonaté calcique très peu minéralisé.

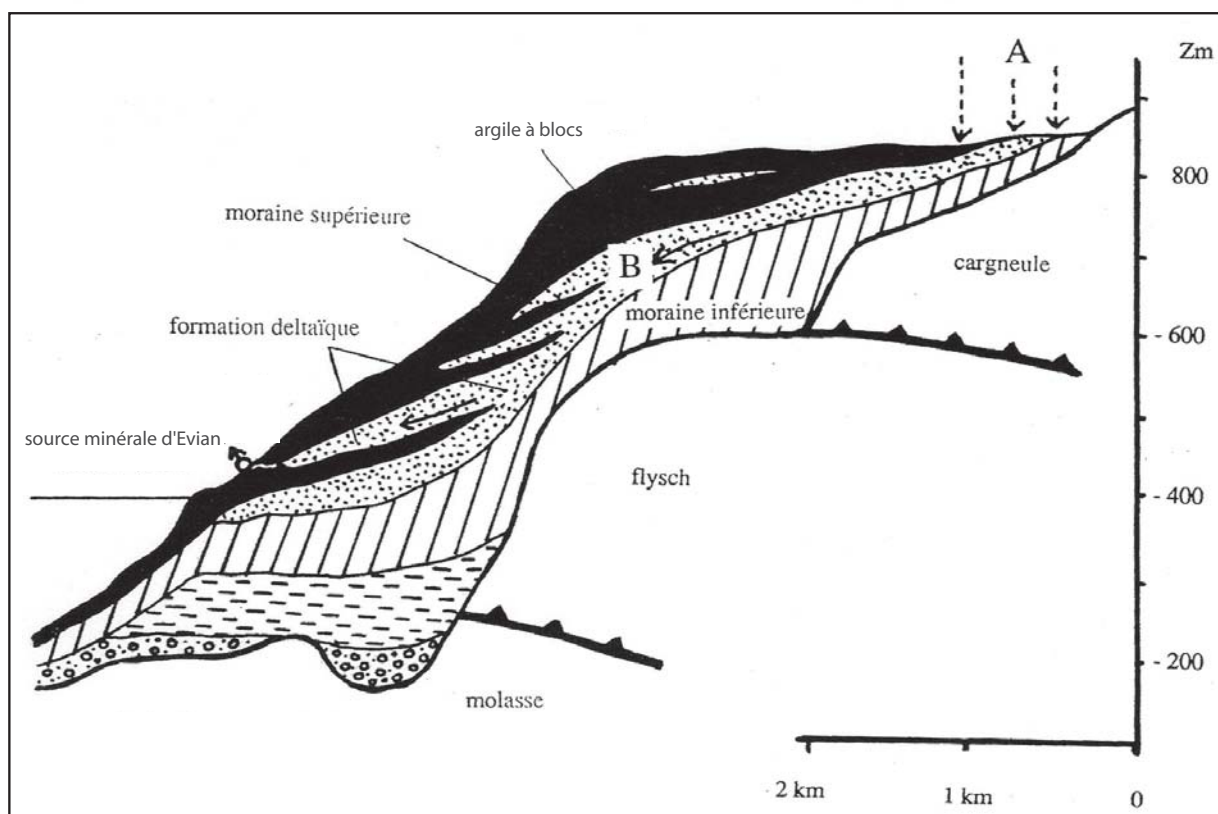


Figure I.7 : Schéma de circulation des eaux minérales d'Evian (Blavoux, 1998)

2.3.3) L'activité thermique en France

La ressource thermique constitue une part non négligeable du patrimoine naturel français autour de laquelle a pu se développer une activité socio-économique importante. Il existe plusieurs organismes français s'articulant autour des diverses problématiques liées à l'exploitation thermique : thérapeutique, économie, techniques d'exploitation de la ressource, installations sanitaires, etc... Le principal organisme est la Fédération Thermale et Climatique Française (FTCF) regroupant : l'Association Nationale des Maires des Communes Thermales (ANMCT) ; le Conseil National des Exploitants Thermaux (CNETH) ; le Syndicat National des Médecins des stations thermales, climatiques et marines ; la Société Française d'Hydrologie et de Climatologie Médicales ; les Fédérations Régionales ainsi que les universitaires et scientifiques concernés par le thermalisme (médecins essentiellement). Deux autres organismes se sont formés autour de problématiques plus spécifiques : l'Association Française des Techniques Hydrothermales (AFTH) pour tout ce qui concerne les aspects de gestion de la ressource thermique et l'Association Française pour la Recherche Thermale (AFRETH) essentiellement tournée vers les recherches cliniques.

Il existe une centaine de sites thermaux en France majoritairement présents dans les Pyrénées, les Alpes, le NE de la France et le Massif Central (figure I.2). La région Rhône-Alpes en totalise dix-sept à elle seule et le département de la Savoie regroupe cinq sites thermaux.

La fréquentation de l'ensemble des stations thermales françaises est d'environ 500 000 curistes par an et la station la plus fréquentée est la station de Dax avec environ 50 000 curistes par an (données CNETH). La fréquentation globale des stations thermales françaises a augmenté régulièrement de 1956 à 1986 puis n'a cessé de diminuer jusqu'en 2006 (figure I.8).

L'activité thermique développe de manière non négligeable l'activité économique d'une région. En effet, le CNETH estime que l'activité thermique génère en France 100 000 emplois directs et indirects (logements, laboratoires, activités culturelles, loisirs et commerces).

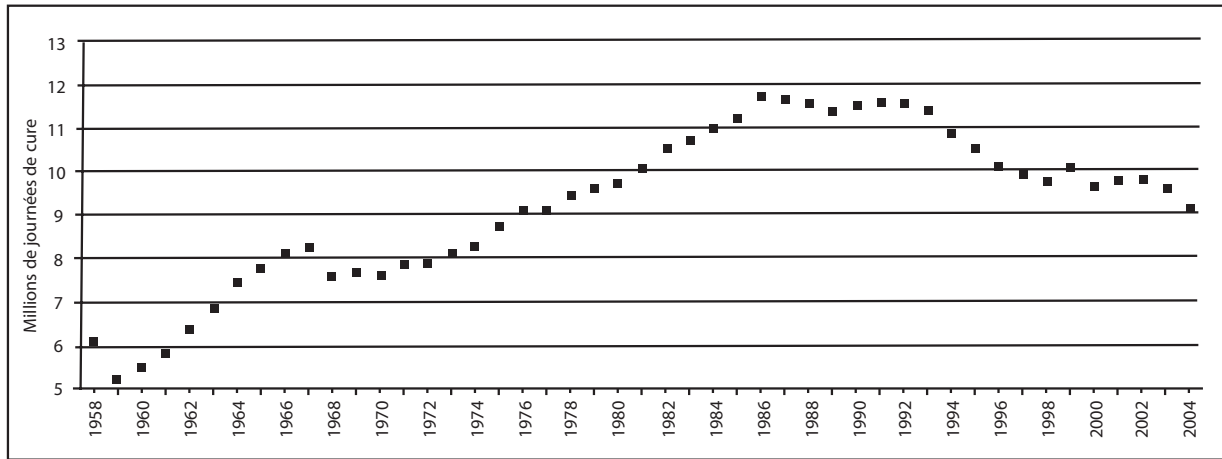


Figure I.8 : Evolution de la fréquentation des établissements thermaux français de 1958 à 2004

(sources : la Gazette Officielle du Thermalisme, Syndicat National des Etablissements Thermaux, Fédération Thermale et Climatique Française in Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, 2006)

En fonction des caractéristiques des eaux, les traitements effectués dans les différentes stations thermales françaises se divisent en 12 orientations thérapeutiques principales : la rhumatologie, les voies respiratoires, la phlébologie, la dermatologie, les maladies de l'appareil digestif, les maladies de l'appareil urinaire, les maladies cardio-artérielles, les affections psychosomatiques, la neurologie, la gynécologie, les affections des muqueuses bucco-linguales et les troubles du développement de l'enfant.

Des pathologies différentes peuvent être traitées dans un même établissement thermal. D'après le CNETH, la majorité des cures concerne la rhumatologie (60%) suivie par le traitement des voies respiratoires (25%) et de l'appareil urinaire et digestif (7,5 à 8%).

Bien que la vocation des établissements thermaux reste majoritairement thérapeutique, une petite part du marché (5%) s'oriente vers la remise en forme (spas et thermes ludiques).

3. Conclusion

Les eaux exploitées par les stations thermales sont majoritairement d'origine météorique. Elles présentent différents types de fonctionnement lié au mode de réchauffement des eaux (gradient géothermique simple ou accentué par la topographie, le magmatisme et/ou la tectonique) et du moteur de la remontée en surface (la pression hydrostatique, le gaz-lift et/ou la différence de densité). La France comprend 5 grandes provinces thermales marquées par des faciès chimiques très variés. L'acquisition de ces différents types de minéralisation est très fortement liée au contexte géologique de chacun des sites (nature des roches encaissantes, fracturation, contexte tectonique,...). Fortes de cette diversité, les eaux thermales françaises occupent une place économique non négligeable et elles sont utilisées comme traitement pour 12 grandes orientations thérapeutiques. Dans ce contexte thermal général, il convient maintenant de replacer le cas particulier de la Léchère.

III. Le site thermal de la Léchère

1. Contexte géographique, géologique et économique

1.1. Contexte géographique

1.1.1) Contexte orohydrographique

La Léchère se situe en Savoie (73) dans la vallée de Tarentaise, à environ 70 km de Chambéry, entre les villes d'Albertville au NW et Moûtiers au SE (figure I.9). Les forages ainsi que l'établissement thermal sont implantés sur la rive gauche de l'Isère autour d'un petit lac d'eau chaude. Le secteur d'étude englobe les bassins versants du torrent de Glaize et du Grand Nant de Naves en rive droite de l'Isère et de l'Eau Rousse et du Morel en rive gauche (figure I.10).

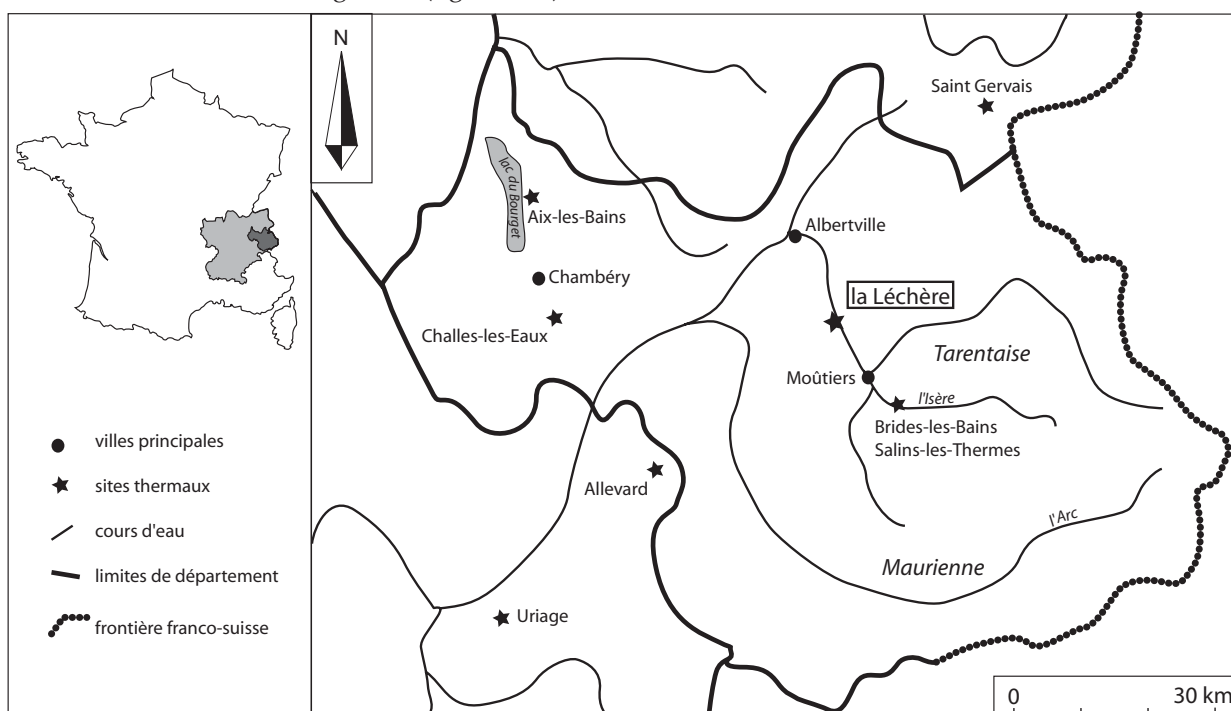


Figure I.9 : Carte de localisation des sites thermaux de Savoie et de quelques sites limitrophes

Le site thermal de la Léchère est situé à une altitude de 440m dans la vallée de l'Isère qui s'écoule, en Tarentaise, du SSE vers le NNW. Sur chaque versant qui encadre la vallée de l'Isère, les crêtes et affluents sont orientés SSW-NNE (figure I.10).

En rive droite de l'Isère, on trouve deux affluents (figure I.11) :

- Le torrent de Glaize est encaissé dans la Vallée de la Grande Maison. Seul l'amont est alimenté par des affluents. La ligne de crête de son bassin versant culmine à 2534m (Pointe de Comborsier).
- Le Grand Nant de Naves, beaucoup moins encaissé, s'écoule au sein d'une ancienne vallée glaciaire suspendue. A l'amont, le réseau est intensément ramifié tandis qu'à l'aval, le Grand Nant de Naves reçoit très peu d'affluents. La ligne de crête du bassin versant culmine à 2500m (Pointe du Dzonfié).

En rive gauche, on trouve également deux affluents (figure I.12) :

- L'Eau Rousse, relativement encaissée, est alimentée par de nombreux affluents qui entaillent le socle cristallin sur sa rive gauche. La ligne de crête du bassin versant culmine à 2829m (Grand Pic de la Lauzière).
- Le Morel s'écoule dans une vallée très peu encaissée. Sa partie aval est complètement aménagée par un système de seuils qui limite l'instabilité du versant de Celliers. La ligne de crête du bassin versant culmine à 2592m (Pointe du Mottet).

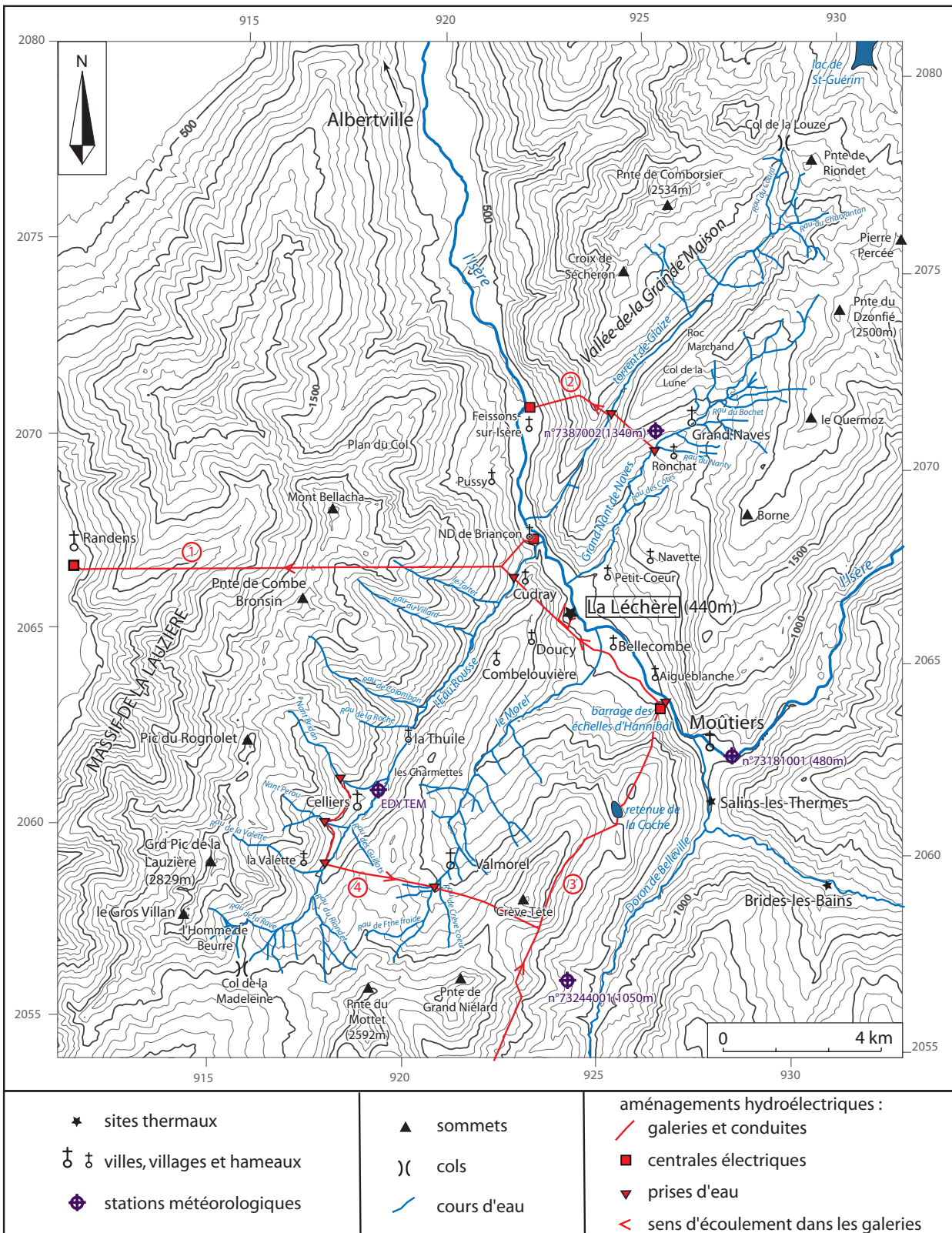


Figure I.10 : Schéma oro-hydrographique de la zone de la Léchère avec implantation des stations météorologiques et des aménagements hydroélectriques

① galerie Isère-Arc, ② conduite forcée Naves-Glaize-Isère, ③ aménagement de la Coche, ④ conduites et prises d'eau

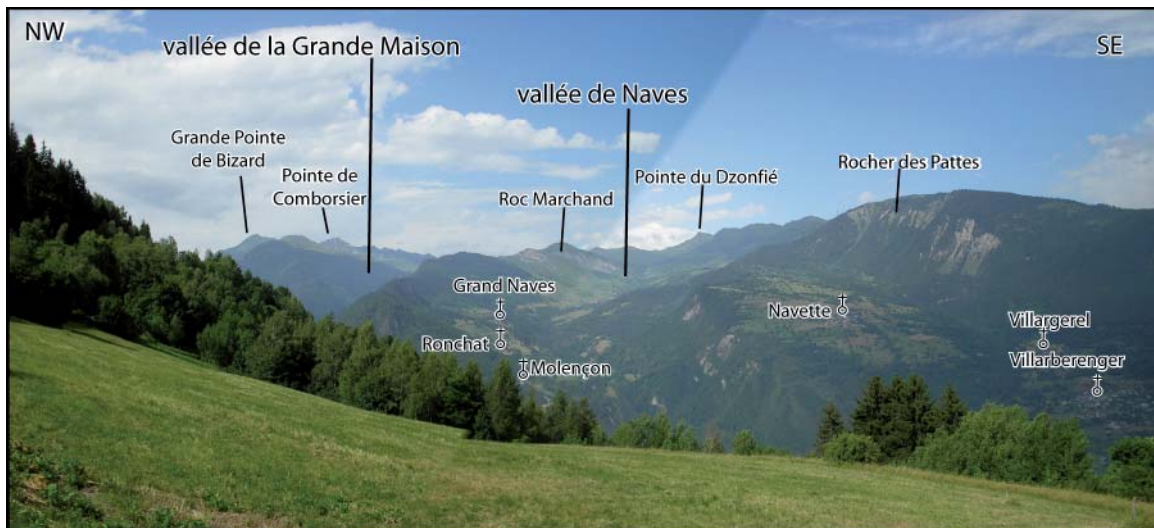


Figure I.11 : Panorama sur les vallées de Grande Maison et de Naves depuis la route entre Doucy et Combelouvière

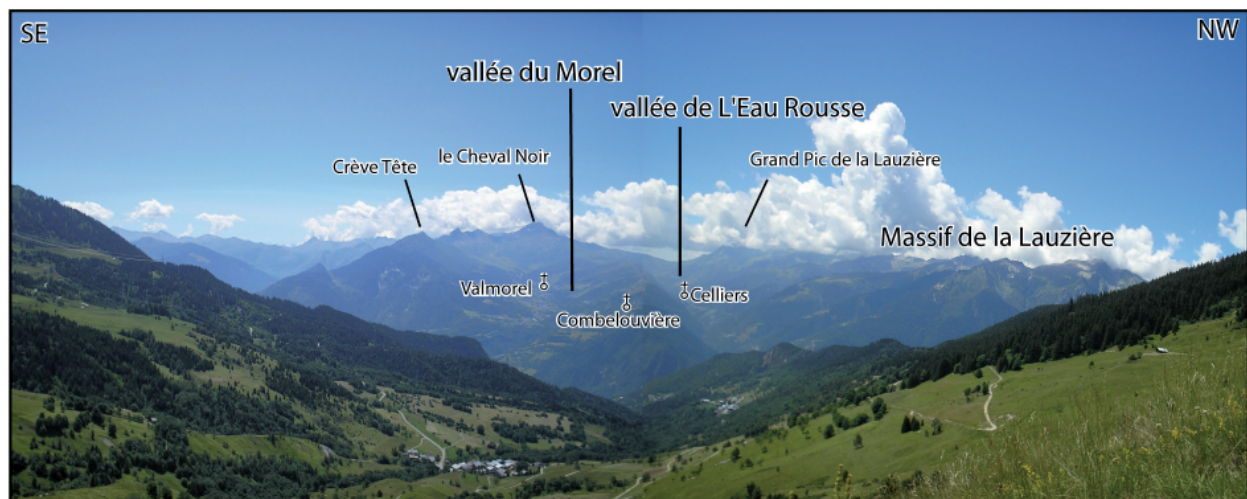


Figure I.12 : Panorama sur les vallées de l'Eau Rousse et du Morel depuis le Roc Marchand

1.1.2) Les aménagements hydroélectriques de la vallée de l'Isère

Les dénivelés importants de la Tarentaise confèrent à la vallée un bon potentiel pour la production d'énergie hydroélectrique. D'après Luczyszyn et Chemery (2003), les cours d'eau de la Tarentaise permettent de produire 5% de l'énergie renouvelable en France soit environ 1% de la production totale d'énergie.

Sur le secteur étudié, on distingue plusieurs galeries hydroélectriques localisées sur la figure I.10 et décrites ci-dessous :

- ① l'aménagement Isère-Arc qui relie Aigueblanche à Randens avec la fenêtre de la Léchère qui permet d'accéder à la galerie principale ;
- ② la conduite forcée entre le Nant de Naves (au niveau de Grand Naves), le torrent de Glaize et l'Isère (au Nord de Feissons-sur-Isère) ;
- ③ l'aménagement de la Coche : une conduite mène l'eau depuis une prise sur le Nant Brun jusqu'à la retenue de la Coche puis de cette retenue vers le barrage des échelles d'Hannibal ;
- ④ les conduites et les prises d'eau sur le Ruisseau de Bridan, le Nant Perou, l'Eau Rousse et le Morel convergeant vers la conduite ③.

Les aménagements ① et ② ainsi que le barrage des échelles d'Hannibal ont été réalisés dans les années 1950 et les aménagements ③ et ④ dans les années 1970.

1.1.3) Contexte climatique

La Tarentaise est soumise à un climat montagnard marqué par :

- un hiver avec des précipitations neigeuses et une durée d'enneigement de plusieurs mois à partir de 1300-1400 m,
- un été avec un fort contraste de température entre le jour et la nuit (10°C d'écart moyen enregistré à la station de Celliers en juillet 2005).

De plus, le relief montagnard influence de façon directe le climat et induit : (i) une augmentation de la pluviosité et une diminution de la température en altitude, (ii) une modification des températures en fonction de l'exposition (adrets ou ubacs), (iii) une protection de certaines zones vis à vis des vents.

La vallée de la Tarentaise, comme celle de la Maurienne, présentent une particularité supplémentaire (figure I.13). Les vallées sont, en effet, marquées par des précipitations annuelles inférieures à celles observées dans la Combe de Savoie. Les dépressions arrivant d'Ouest viennent "buter" contre les premiers reliefs de la Chartreuse et des Bauges sur lesquels elles vont décharger leurs précipitations. Lorsque les vallées plus internes sont atteintes, les précipitations ne sont plus disponibles en aussi grande quantité.

L'implantation des 4 stations météorologiques du secteur se trouve sur la figure I.10. On distingue 3 stations Météo France :

- Moûtiers (n°73181001) : 480m ;
- la Léchère (n°73187002) : 1340m, située à Grand Naves ;
- Saint-Jean de Belleville (n°73244001) : 1050m.

Depuis juin 2005, nous avons installé une quatrième station au niveau de Celliers, à 1300m d'altitude. Cette nouvelle station a été implantée à la même altitude que la station de Grand Naves de façon à obtenir le signal de pluviométrie, dans des conditions similaires, sur chaque versant de l'Isère. Nous avons donc des données météorologiques pour la vallée de l'Isère ainsi que pour les deux versants qui l'encadrent.

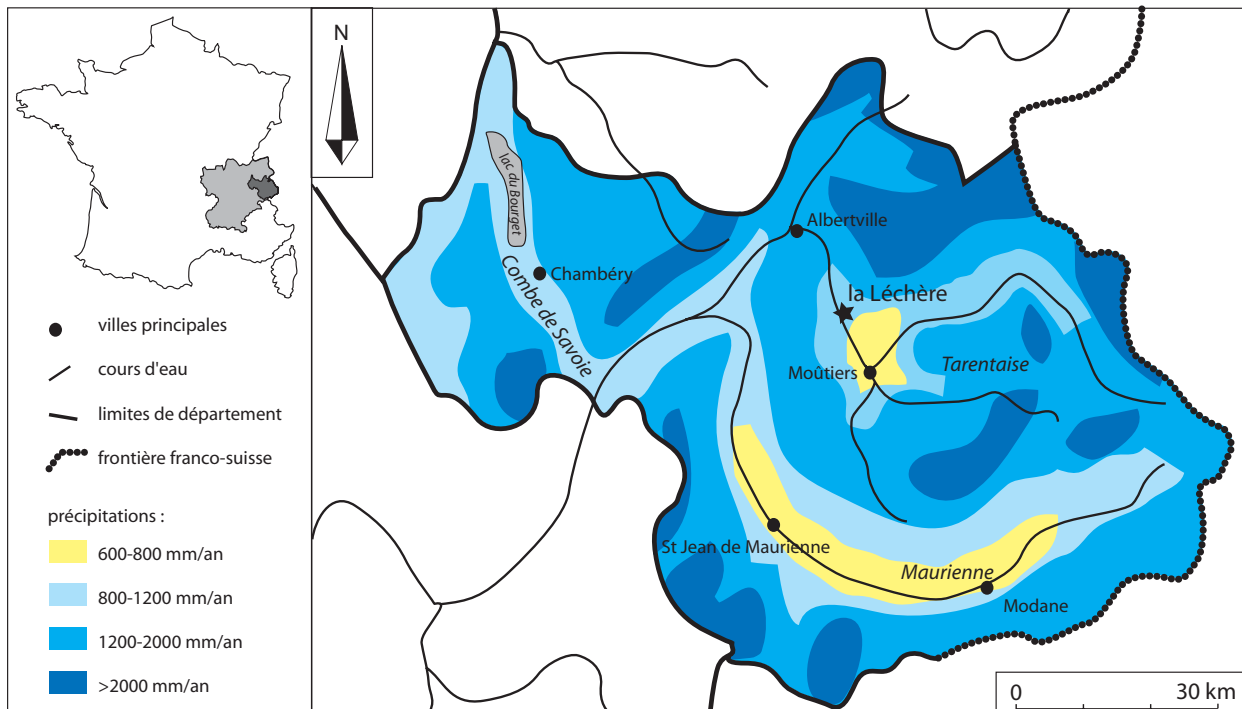


Figure I.13 : Carte des précipitations en Savoie (données Association des Pays de Savoie, 1999-2006)

Comme le montrent les enregistrements aux stations de Moûtiers et Grand Naves (figure I.14), les années 2005 et 2006 sont marquées par des précipitations plutôt basses (685 et 929,5 mm) par rapport aux années précédentes et par des températures moyennes d'environ 11°C. A Celliers, la température journalière moyenne maximale est de 21°C et la minimale de -12°C (figure I.15). De plus, l'année hydrologique est marquée par une période de forte infiltration de mars à mai.

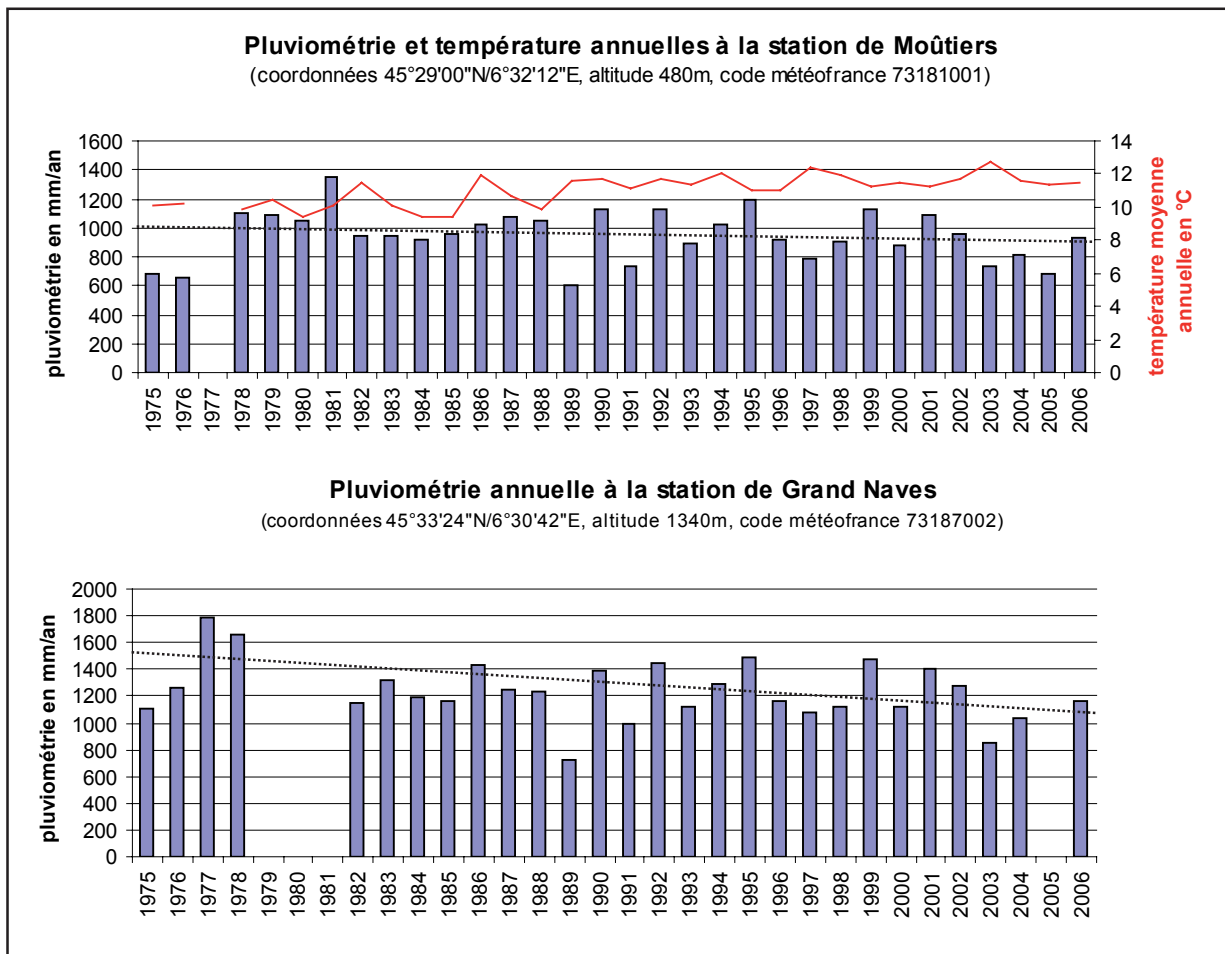


Figure I.14 : Précipitations annuelles aux stations de Moûtiers et de Grand Naves de 1975 à 2005 (données MétéoFrance) en pointillés : tendance générale

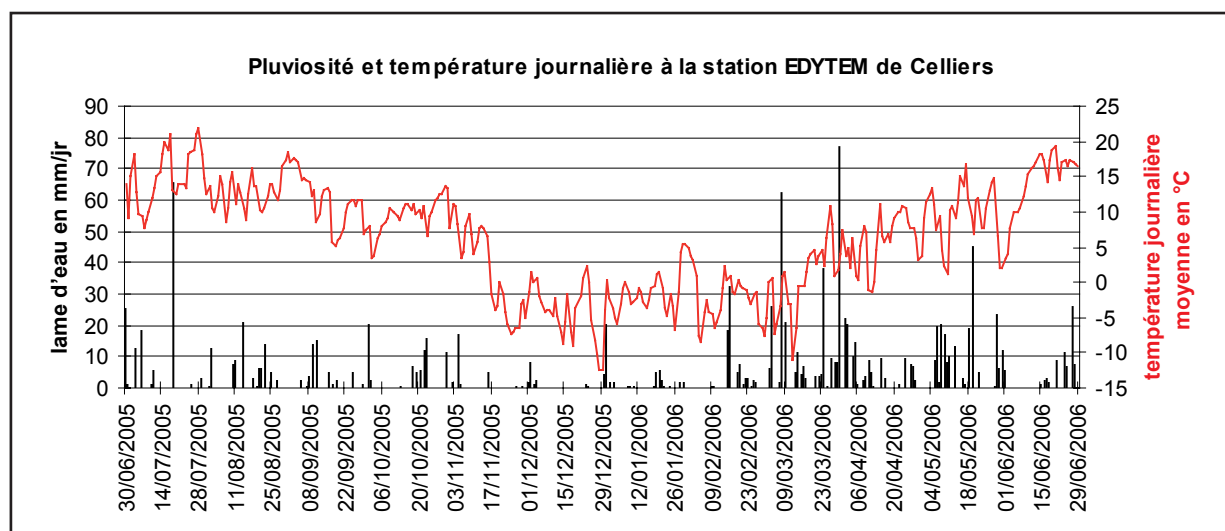


Figure I.15 : Pluviosité et température journalière à la station de Celliers sur une année hydrologique (pendant les périodes neigeuses, le signal de pluie est enregistré au moment où la neige fond dans le pluviomètre)

1.2. Contexte géologique général

Quelques éléments du contexte géologique sont nécessaires pour comprendre l'historique de l'évolution des connaissances du système thermal de la Léchère. Ce contexte sera décrit ici de manière très succincte et plus précisément dans le chapitre II.

Le site thermal de la Léchère est implanté au niveau d'un contact tectonique, orienté NW-SE, affectant les vallées de l'Eau Rousse et du Grand Nant de Naves. Le fonctionnement de ce contact tectonique est complexe et polyphasé, incluant une phase de chevauchement (Antoine *et al.*, 1992) et une phase de décrochement (Bertrand *et al.*, 2006). Il est penté vers le SE et souligné par des dépôts triasiques (dolomies, cargneules, gypse et anhydrite) ayant servi de niveau de décollement. A l'Ouest de ce contact, affleurent les micaschistes du socle. Tandis qu'à l'Est, la couverture delphino-helvétique, essentiellement carbonatée et marneuse, est affectée par une succession de plis d'axe NNE-SSW et à vergence NW.

Le contact tectonique recoupe la vallée de l'Isère au niveau de la Léchère. A cet endroit, il est scellé par les dépôts de l'ombilic glaciaire d'Aigueblanche, développé à l'amont du verrou de Notre Dame de Briançon.

1.3. Contexte économique

1.3.1) Les activités économiques dans la vallée de Tarentaise

D'après Luczyszyn et Chemery (2003), historiquement, la Tarentaise a développé un système agropastoral avec un élevage dominant, accompagné par l'artisanat, l'exploitation minière et le commerce avec l'Italie. A la fin du XIX^{ème} siècle, le territoire s'est orienté vers l'industrie grâce à l'énergie fournie par les aménagements hydroélectriques. C'est une industrie lourde (métallurgie et chimie) qui se développe alors ; puis des activités de sous-traitance telles que la mécanique, la chaudronnerie et la maintenance industrielle. A partir des années 1990, le tourisme se développe et constitue actuellement un levier non négligeable de l'activité économique dans le canton de Moûtiers. La filière bois (exploitation forestière, scierie et transformation du bois) ainsi que le thermalisme constituent les activités secondaires de la région.

1.3.2) L'activité thermique

L'eau thermale de la Léchère, exploitée actuellement par le forage Natacha, présente un faciès sulfaté calcique et sodique (Na-Ca-SO₄) et une température de 60°C. Ce faciès correspond à la province thermale des zones de chevauchements alpins.

Les orientations thérapeutiques des thermes de la Léchère sont la rhumatologie (pathologie majoritairement concernée par les cures thermales en France) ainsi que la phlébologie et la gynécologie. Les eaux de la Léchère font l'objet d'études sur les effets thérapeutiques des cures thermales par l'intermédiaire du Centre de Recherche Universitaire de La Léchère (CRULL), dépendant de l'Université Joseph Fourier de Grenoble.

Un espace bien-être est ouvert depuis 2006 suivant la tendance des thermes français à s'ouvrir vers une nouvelle clientèle. La fréquentation des thermes de la Léchère est passée de 6420 à 8730 curistes entre 1987 à 1997 (figure I.16) contrairement à la tendance nationale plutôt à la baisse (figure I.8). En 1998, un problème de contamination bactériologique a mené à la fermeture de l'établissement. L'année suivante, la fréquentation est alors tombée à 4216 curistes, pour retrouver une fréquentation relativement stable d'environ 6000 curistes par an depuis 2000. Cette fréquentation de 6000 curistes par an est légèrement plus élevée que celle de la majorité des établissements français qui s'inscrit entre 1000 et 5000 curistes par an (figure I.16).

L'établissement est ouvert de janvier à octobre pour l'espace bien-être et d'avril à octobre pour les cures thermales.

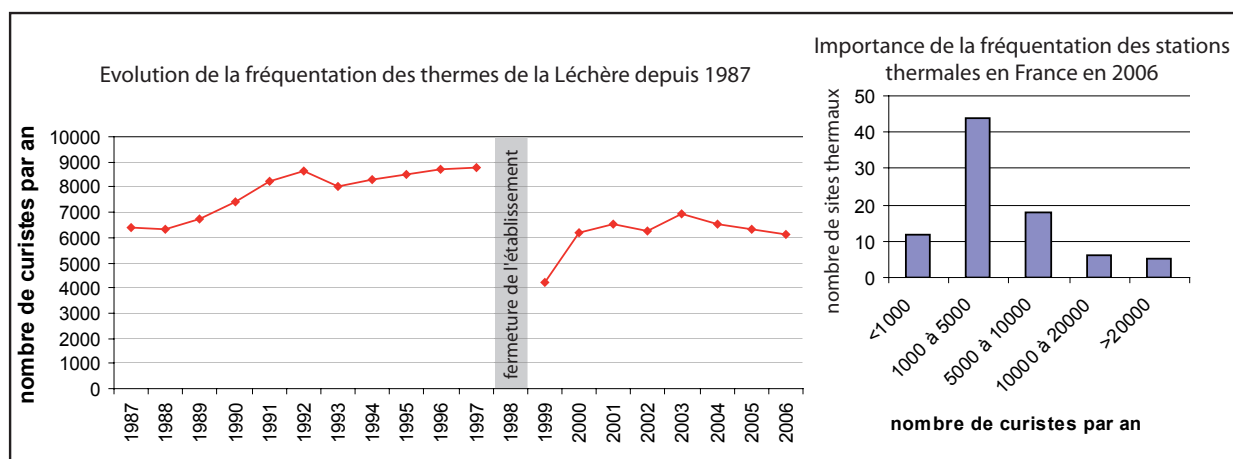


Figure I.16 : La fréquentation des thermes de la Léchère (données BRGM et CNETh)

2. Historique de l'exploitation

Un historique détaillé de l'exploitation du site de la Léchère se trouve en annexe 1.

La ressource thermique de la Léchère n'est découverte qu'en 1869. Alors propriété de M^r et M^{me} Stern, la ressource thermique ne commence réellement à être exploitée qu'en 1925. En 1985, le site est vendu au District du Bassin d'Aigueblanche qui deviendra ensuite la CCVA. A partir de 1987, ce dernier va concéder la gestion de l'exploitation à la Société des Eaux Thermales de La Léchère.

De 1887 à 1998, 11 forages, de plus en plus profonds et nommés successivement Radiana I à XI ont été réalisés dans un rayon de 50 m autour du lac de la Léchère (figure I.17). Leurs caractéristiques principales sont reportées dans le tableau I.3 et leur description complète est reportée en annexe 2.

forage	année de réalisation	profondeur en m	t°C des eaux en °C	équipement	productivité
RI	1887	7	52-54	7 tubes enfoncés dans le sol pointes arrachées en 1997	avant 1930 : ? à partir de 1930 : 300l/min 1983 : abandon définitif
RII	1944	16,8	52-53	crépine sur les 80cm du fond	à partir de 1950 : 20l/min pour la buvette jusque? (après 1987 date du dernier AM) débit maintenu à 1m ³ /h jusqu'en 2006
RIII	1947	16	51	crépine sur les 2 derniers m cimentation en 1997	1950-1987 : ? après 1987 : < 200l/min abandon en janvier 1997
RIV	1952	13	49,5	crépine de 8 à 12m cimentation en 1997	1954-1984 : ? après 1987 : 200l/min abandon en janvier 1997
RV	1983	22,6	45-46	crépine de 17,35 à 21,35m cimentation en 1997	à partir de 1987 : <200l/min 1996 : 20m ³ /h jusque?
RVI	1986	71,5	47	crépine de 57 à 68,5m obturation en 1998	mis en exploitation en 1990 ? abandon en 1993
RVII	1987	80	46-56	avant 1998 : crépine de 56 à 80m après 1998 : open-hole de 69,6 à 74m	mis en exploitation en 1990 ? à partir de 1994 : 42m ³ /h abandon en 1998, débit maintenu à 0,5m ³ /h
RVIII	1994	126	11,4-19,2	rebouché après foration	jamais exploité
RIX	1994	104	24,2-40,2	obturation en 1998	jamais exploité
RX	1996	105	50-54	crépine de 57,6 à 100m obturation en 1998	jamais exploité
RXI ou Natacha	1998	200	63	open-hole de 186 à 204m	depuis 2000 : 45m ³ /h

mélange "FIRA" à partir de 1987

Tableau I.3 : Récapitulatif des caractéristiques des forages thermaux réalisés sur le site de la Léchère

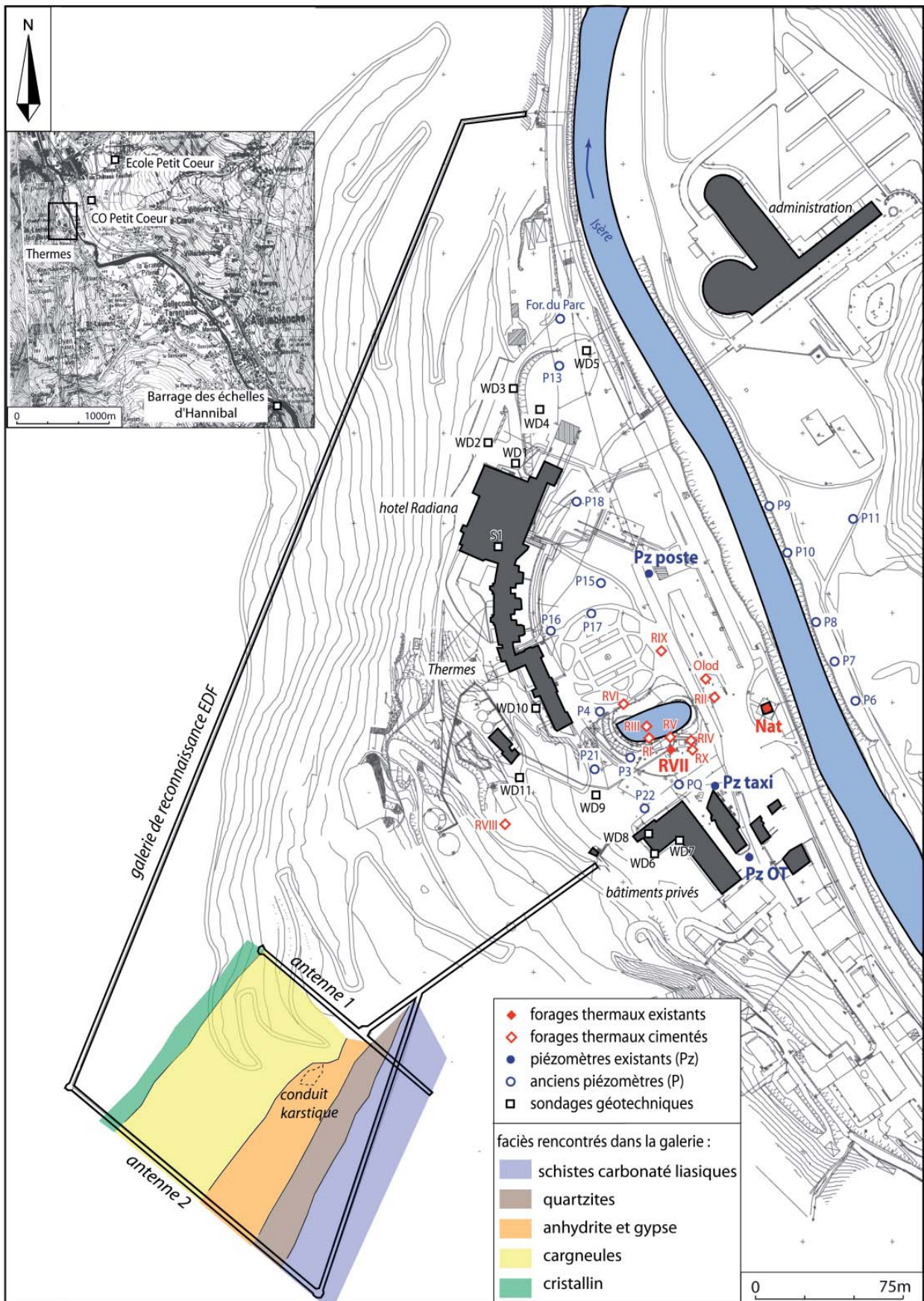


Figure I.17 : Plan du site thermal de la Léchère, localisation des forages et de la galerie de reconnaissance EDF

2.1. L'apparition de la ressource en 1869

Les sources sont connues depuis septembre 1869, après l'effondrement de terrain qui a produit deux excavations sur chaque rive de l'Isère. Des eaux chaudes ont rempli l'excavation de la rive gauche tandis que l'excavation de la rive droite s'est remplie d'eaux froides. Dans un premier temps, les habitants de la région se baignaient directement dans le petit lac ; puis dès 1887, les eaux thermales sont captées de façon rudimentaire par des tubes de quelques mètres enfoncés dans le fond du lac. A cette époque, les eaux naturellement radioactives sont considérées comme bénéfiques. Pour cette raison, le premier système de captage est nommé Radiana I. Le forage Radiana II sera réalisé en 1944 (principalement destiné à alimenter une buvette à partir de 1950) puis Radiana III en 1947.

2.2. Le développement du site (des années 1950 à 1990)

Les aménagements hydroélectriques de la chute Isère-Arc et le barrage des échelles d'Hannibal ont été réalisés dans les années 1950 (figure I.10). La réalisation de ce barrage a mené à une réduction importante du débit de l'Isère et notamment au niveau de la Léchère. Dans ce contexte, une campagne de reconnaissance hydrogéologique a été réalisée afin d'évaluer les perturbations engendrées par ces aménagements sur la ressource thermique (Solétanche, 1952). Cette étude a permis de réaliser plusieurs piézomètres de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres de profondeur (localisés sur la figure I.17 et décrits en annexe 2) ainsi que des forages de reconnaissance dont le futur forage thermal Radiana IV. Ce n'est ensuite qu'en 1983 que le forage Radiana V a été réalisé et c'est le mélange FIRA qui est alors exploité (tableau I.3). Dans les années 1980, le dispositif de captage apparaît insuffisant par rapport au besoin de 2400m³/jr (Eberentz, 1988). C'est pourquoi deux nouveaux forages Radiana VI et VII, beaucoup plus profonds que les précédents, sont réalisés en 1986 et 1987.

2.3. La recherche d'une eau thermale non mélangée (les années 1990)

Au début des années 1990, le besoin en eau thermale devient plus important que les débits exploités par les forages existants. Il est alors nécessaire d'implanter de nouveaux forages, si possible directement dans le griffon thermal. C'est pourquoi tous les forages réalisés durant cette période ont une profondeur supérieure à 100m. Les forages Radiana VIII et Radiana IX, réalisés en 1994, se sont révélés improductifs car les faciès des eaux rencontrées étaient trop éloignés de celui du forage RVII. Quant au forage Radiana X, réalisé en 1996, il n'a jamais pu être exploité à cause d'un problème de contamination bactériologique mis clairement en évidence à cette date.

2.4. Le maintien de l'équilibre exploitation/ressource (de 1998 à aujourd'hui)

Ce n'est qu'en 1998 que le forage Radiana XI, renommé ensuite Natacha, profond de 200m, a permis de capter l'eau thermale au niveau du griffon. Depuis cette date, seul ce forage est exploité à un débit artésien bridé de 45m³/h.

Parallèlement à chaque étape de cette exploitation, de nouvelles données hydrogéologiques sont acquises et l'état des connaissances du système thermal de la Léchère évolue. Une bibliographie complète des études réalisées sur le site de la Léchère a été synthétisée (Thiébaud, 2005) et seuls les traits principaux sont exposés ici.

3. Evolution des connaissances hydrogéologiques du système

3.1. Les premiers éléments

Le rapport réalisé par le Garde-Mine (Goddard, 1888) fait part, dans un premier temps, de la localisation du griffon thermal à proximité du lac d'eau chaude. Dans un deuxième temps, l'origine de la minéralisation des eaux thermales de la Léchère (comparables aux eaux de Salins-les-Thermes et Brides-les-Bains) est attribuée à une interaction avec la bande triasique présente "à 200 m au Nord du hameau de la Léchère". La formation des deux effondrements est expliquée par la "corrosion" des roches triasiques par les eaux. D'autres effondrements au niveau de Petit Cœur trouveront la même explication dans les années suivantes (Lienhard et Pachoud, date inconnue ; Pachoud, 1971 et Achard, 1972). Lemoine (1930, in Amat-chantoux, 1984) estime que l'aire d'alimentation serait d'une surface de 10 à 15 km² et s'étendrait entre les Avanchers, Doucy et la région du Col de la Madeleine. Ces premiers éléments sont avancés comme des postulats et ce n'est qu'à partir des années 1950 que des études plus précises sont réalisées afin d'améliorer la compréhension du système dans sa globalité.

3.2. La progression dans la compréhension globale

3.2.1) Propositions d'un schéma de circulation

Selon Aubignat (1981), la circulation souterraine suivrait le parcours suivant : en altitude, les eaux météoriques s'infiltrent dans les bancs de Trias puis s'enfoncent en profondeur où elles acquièrent leur thermalité ainsi que leur minéralisation et enfin remontent à la surface sous l'effet de la pression hydrostatique le long de la faille entre socle et sédiments. Les tufs agglomérés constituent un manteau imperméable face à la remontée des eaux et conditionnent l'artésianisme. L'eau doit alors circuler dans un autre niveau aquifère constitué par les terrains sédimentaires. Une fois dans les sédiments, l'eau continue son cheminement jusqu'à ce qu'elle trouve un exutoire en surface. Les effondrements de 1869 ont conditionné l'émergence des eaux en surface. A l'issue d'une étude par prospection électrique, Ménard (1981, in Amat-Chantoux, 1984) propose un schéma de la zone d'émergence (figure I.18) permettant de

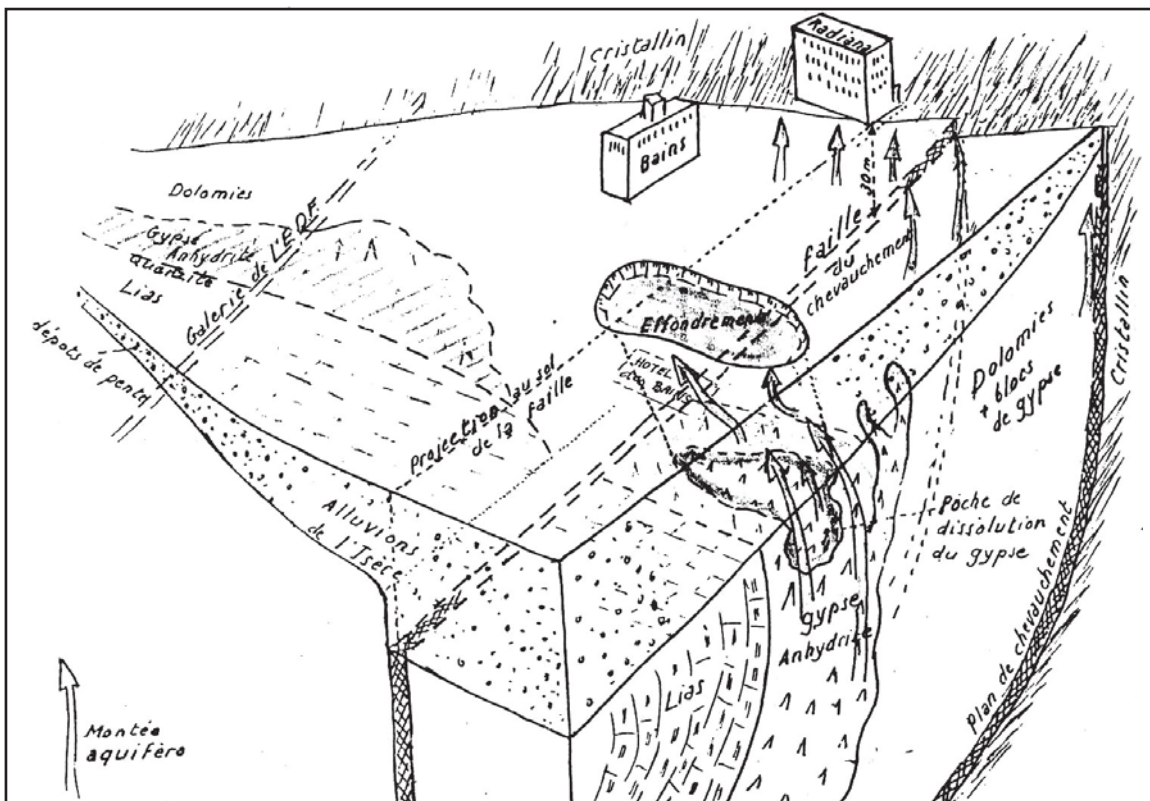


Figure I.18 : Bloc diagramme du contexte géologique des sources de la Léchère (Menard, 1981, in Amat-Chantoux, 1984)

localiser, sous le lac, une faille liée au chevauchement principal.

Un peu plus tard, Poul et Iundt (1985) présentent une autre coupe de la zone d'émergence (figure I.19) où le contact entre le socle et la couverture sédimentaire, marqué par la présence de gypse et cargneules, permet aux eaux thermales de remonter jusqu'au remplissage quaternaire. Sur cette représentation, le remplissage quaternaire est constitué par une masse "d'alluvions de l'Isère" et sur chaque versant de colluvions récentes et même anciennes sur le versant SSE.

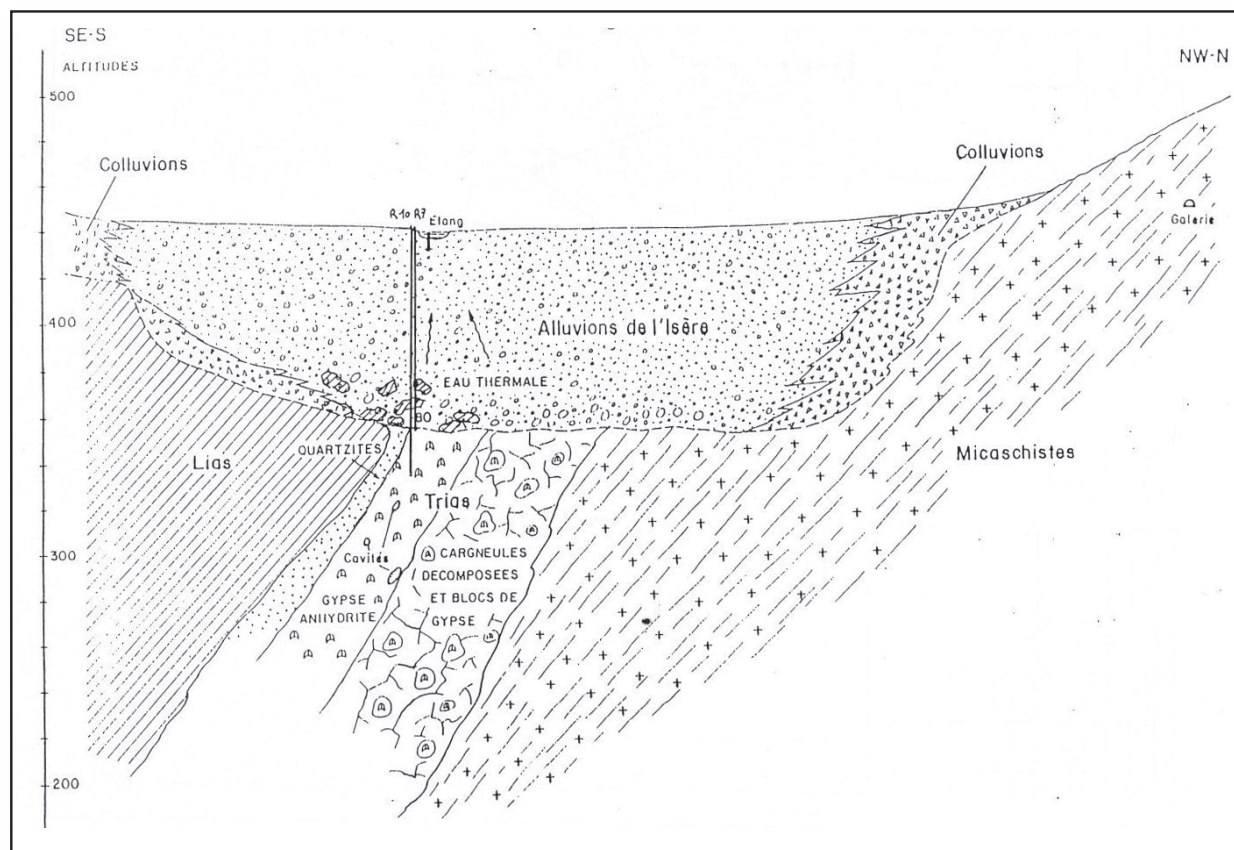


Figure I.19 : Coupe schématique de la zone d'émergence de la Léchère (Poul et Iundt, 1985)

3.2.2) Le remplissage quaternaire

L'étude Solétanche (1952) a permis d'avoir une bonne appréhension de la structure du remplissage quaternaire (voir la description des forages en annexe 2). Celui-ci est caractérisé par :

- une épaisseur de plus de 40m au niveau de P5 (localisé sur la figure I.17) qui atteint même plus de 60m en rive droite de l'Isère (P10) ;
- la présence, en surface, de sables et graviers à galets devenant de plus en plus fins en profondeur (le forage P10 est constitué de sables fins de 50 à 60 mètres de profondeur) ;
- des perméabilités, obtenues par essais, de l'ordre de 10^{-3} m/s sauf au niveau du lac où la perméabilité est de 10^{-2} m/s.

Deux types d'eau ont été rencontrés au sein du remplissage : une eau minéralisée chaude se présentant "sous forme de lentilles [...] n'atteignant pas la rive droite de l'Isère" et des eaux plus froides (27°C) au niveau de P15. Les phénomènes de mélange des eaux thermales avec les eaux superficielles dans le remplissage quaternaire sont clairement mis en évidence ici.

De plus, lors de la réalisation d'un forage géotechnique (S1), Besson (1987) a décrit la présence d'une cavité de 2m de haut dans le remplissage quaternaire. En effet, ce remplissage est marqué par la présence de zones indurées, vraisemblablement par la précipitation des eaux très minéralisées (thermales ou non) qui circulent au sein des dépôts superficiels.

Lors de l'étude Solétanche réalisée en 1952, les relations entre la nappe quaternaire, le lac et l'Isère ont pu être identifiées par la réalisation de cartes piézométriques (figure I.20). Globalement, les eaux de la nappe s'écoulent vers l'Isère et cette observation a été confirmée par la présence d'une zone plus chaude et plus minéralisée en rive gauche de l'Isère.

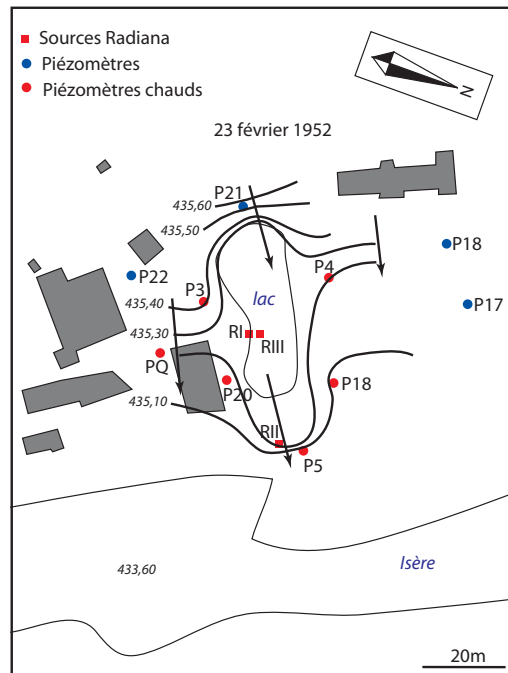


Figure I.20 : Carte piézométrique de la nappe alluviale en février 1952 (Solétanche, 1952)

3.2.3) Les premiers apports de la géochimie

Poul et Iundt (1985) sont les premiers à réaliser une étude spécifique sur l'aspect géochimique de la zone d'émergence thermique. Ils distinguent alors deux types d'eau :

- les eaux thermales (Olod, RII, RIII, RIV et RV) de type sulfaté, chloruré, calcique et sodique et marquées par de fortes teneurs en Li et B ;
- les eaux froides (galerie EDF et forage du parc) de type sulfaté, bicarbonaté, calcique et magnésien.

Il apparaît alors que le forage RII constitue le pôle thermo-minéral et que les eaux des autres forages résultent d'un mélange entre ce pôle thermal et des eaux superficielles ayant une composition différente de celles de la galerie EDF et du forage du Parc.

L'utilisation des géothermomètres à silice et à Na/Li donne respectivement des températures atteintes par les eaux de RII de 67 et 162°C.

Les données isotopiques (^3H , $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) de cette étude ont permis d'affirmer que (i) le système thermal est alimenté par des eaux météoriques ayant une signature comparable à celles qui alimentent le pôle froid et (ii) que le pôle froid est constitué par des eaux récentes.

Plus tard, Dubar et Corrigan (1998) réalisent un traitement statistique de type analyse multidimensionnelle sur les analyses des eaux des forages RII, RIV, RV, RVI, RVII, RIX, RX, Olod. Ce traitement leur permet de tirer les conclusions suivantes :

- Les eaux thermales, dont RVII représente le pôle, sont caractérisées par les éléments Na, Cl, SiO_2 et NH_4 . Elles sont saturées en quartz, en gypse et en calcite.
- Dans la dernière partie de leur parcours, les eaux thermales se mélangent avec des eaux superficielles froides et plus riches en Ca, Mg et HCO_3 .
- La contribution du pôle froid augmente au cours du temps dans le forage RVII.

L'application du géothermomètre à silice sur les eaux du forage RVII donne une température atteinte de 80°C.

3.2.4) Conclusion

Ces premières recherches menées sur le site de la Léchère ont permis (i) d'esquisser un schéma de circulation (infiltration en altitude, circulations au niveau du contact triasique), (ii) de proposer des hypothèses sur la structure de la zone d'émergence ; (iii) de définir la nature et le rôle joué par le remplissage quaternaire et enfin (iv) de mettre en évidence les phénomènes de mélange entre eau thermique et eaux superficielles. Au vu de ces nouvelles hypothèses, les prospections suivantes vont tenter d'intercepter le griffon avant les phénomènes de mélange. Elles vont aboutir en 1998 à la mise en production du forage Natacha de 200m de profondeur, répondant à cette exigence.

3.3. A la recherche du griffon thermal

De nombreux moyens de prospection indirecte ont été mis en œuvre afin d'implanter un forage permettant de capter directement le griffon thermal : sismique réflexion, prospection radon, prospection électrique, au terme desquels seront implantés les forages RVIII et RIX. A l'issue de la réalisation de ces deux forages qui se sont révélés improductifs, des diagraphies thermiques et chimiques tenteront d'apporter une meilleure appréhension du griffon et permettront d'implanter le forage RX.

3.3.1) La campagne de sismique réflexion

Une campagne de sismique réflexion haute résolution 3D a été réalisée par la CGG (Anonyme, 1994). L'interprétation des profils sismiques a permis de déterminer la position du toit du substratum et de localiser des failles. Afin de déterminer la profondeur du toit du substratum, le premier réflecteur continu des profils sismiques a été assimilé au contact entre le substratum et les dépôts superficiels. Toutes les discontinuités affectant ce réflecteur ont été considérées comme des failles. Ne disposant pas de données de sismiques de puits, la conversion des temps doubles en profondeur n'a pu se faire qu'en calant le profil sismique obtenu au niveau du forage RVII avec la coupe géologique de ce forage. Par approximation, une même loi de vitesse de 912m/s a ensuite été appliquée sur tout le secteur, bien que l'hétérogénéité des dépôts superficiels laisse supposer que les vitesses soient très variables. Cette interprétation a permis d'établir la carte des isobathes du toit du substratum où sont également localisées les discontinuités observées (figure I.21). L'établissement de cette carte permet de voir :

- deux zones fracturées orientées NE-SW situées de part et d'autre du lac ;
- la zone de fracture située au NW du lac forme une dépression ;
- une fracture N-S, située au bord de l'Isère, relie les deux zones fracturées NE-SW.

Il est à noter que les profondeurs du substratum estimées par la sismique et celles réellement observées dans les forages réalisés par la suite sont globalement cohérentes à 10-20m près. Les forages existant au moment de la réalisation de cette campagne (tous sauf RVIII, RIX et Natacha) ne sont vraisemblablement pas situés à l'aplomb des zones fracturées.

Cette campagne sismique a été réinterprétée par le bureau d'étude SOGREAH (1999) en attribuant, cette fois, une signification structurale à chaque réflecteur permettant de déterminer la position des contacts entre les différentes unités du substratum. Pourtant, la sismique réflexion permet de détecter uniquement des réflecteurs marqués par des contacts peu redressés entre deux formations présentant un contraste d'impédance. Sachant que les différentes unités du substratum de la zone d'émergence ne présentent pas de contraste d'impédance suffisant et que les contacts sont vraisemblablement très redressés, il ne peut être accordé aucun crédit à cette nouvelle interprétation.

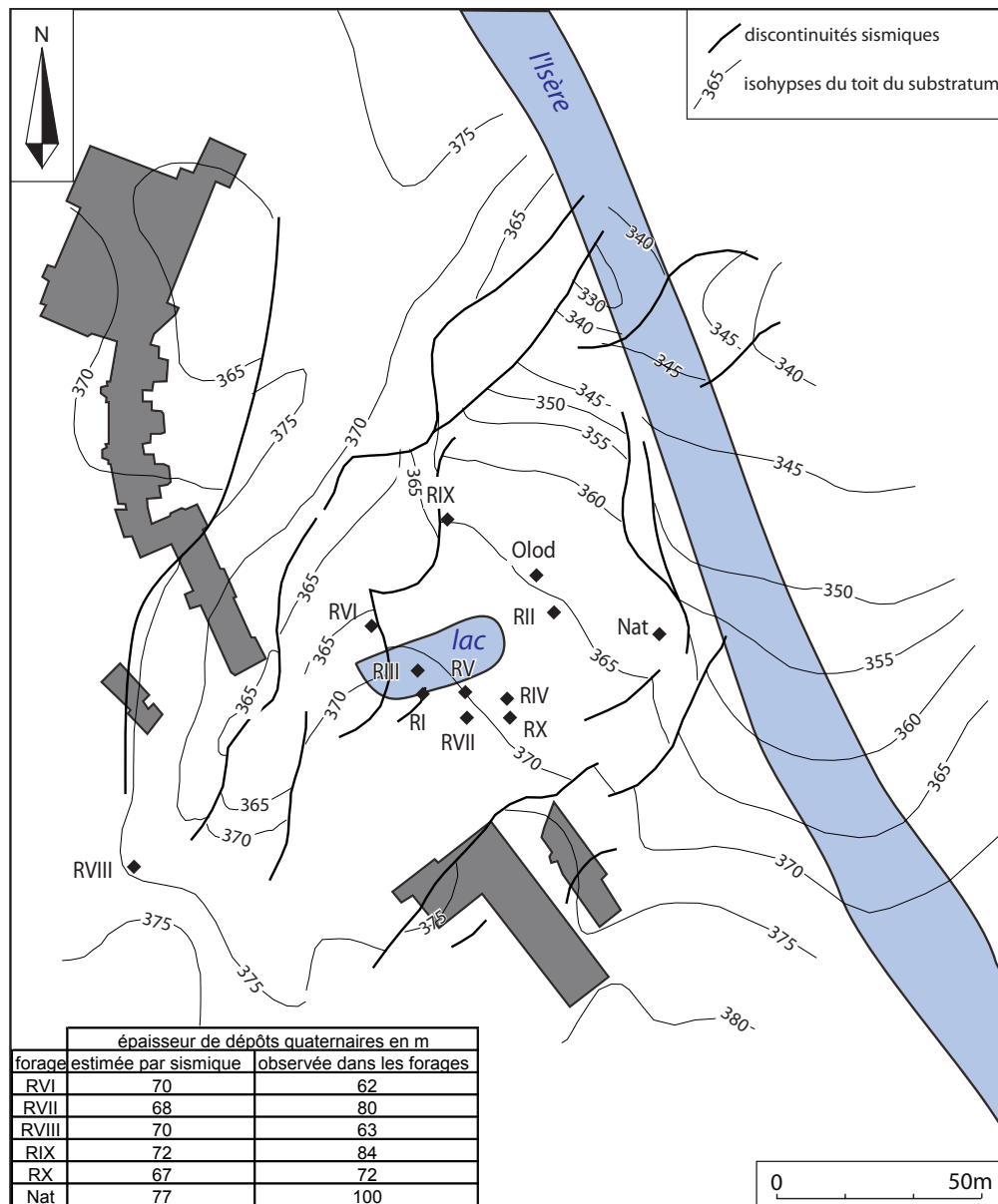


Figure I.21 : Interprétation structurale de la campagne de sismique réflexion haute résolution 3D (Anonyme, 1994, modifié)

3.3.2) La prospection radon

Le radon est un gaz produit de manière naturelle dans la croûte terrestre. En effet, le radon ²²²Rn fait partie d'une chaîne de désintégration radioactive dont l'élément père est l'uranium ²³⁸U (t_{1/2} Rn = 3,6 jours). Ce dernier est un élément constitutif de nombreuses roches de la croûte terrestre (granites, schistes, argiles...). Le radon émis par désintégration va migrer sous forme gazeuse ou dissoute vers la surface par l'intermédiaire des pores, fissures et failles. Les mesures d'émanation du radon sont classiquement utilisées dans la recherche d'eau minérale (Bonijoly, 2006) car elles permettent de repérer la présence de failles profondes empruntées aussi bien par le radon que par les eaux.

Les teneurs en radon des sols (à quelques dizaines de centimètres dans le sol) ont été mesurées sur le site thermal de la Léchère (Maltrait *et al.*, 1994). Les résultats de cette prospection (figure I.22), montrent la présence de plusieurs zones d'anomalies de la teneur en radon, dont une située au niveau du parc et les autres constituées par quelques points très localisés sur le versant. Ces derniers ne semblent pas s'aligner selon les structures tectoniques NE-SW caractéristiques du secteur.

Sachant qu'au niveau de la zone d'émergence thermale, le radon se déplace vraisemblablement de manière complètement diffuse au sein du remplissage quaternaire, la localisation des anomalies reste difficilement interprétable.

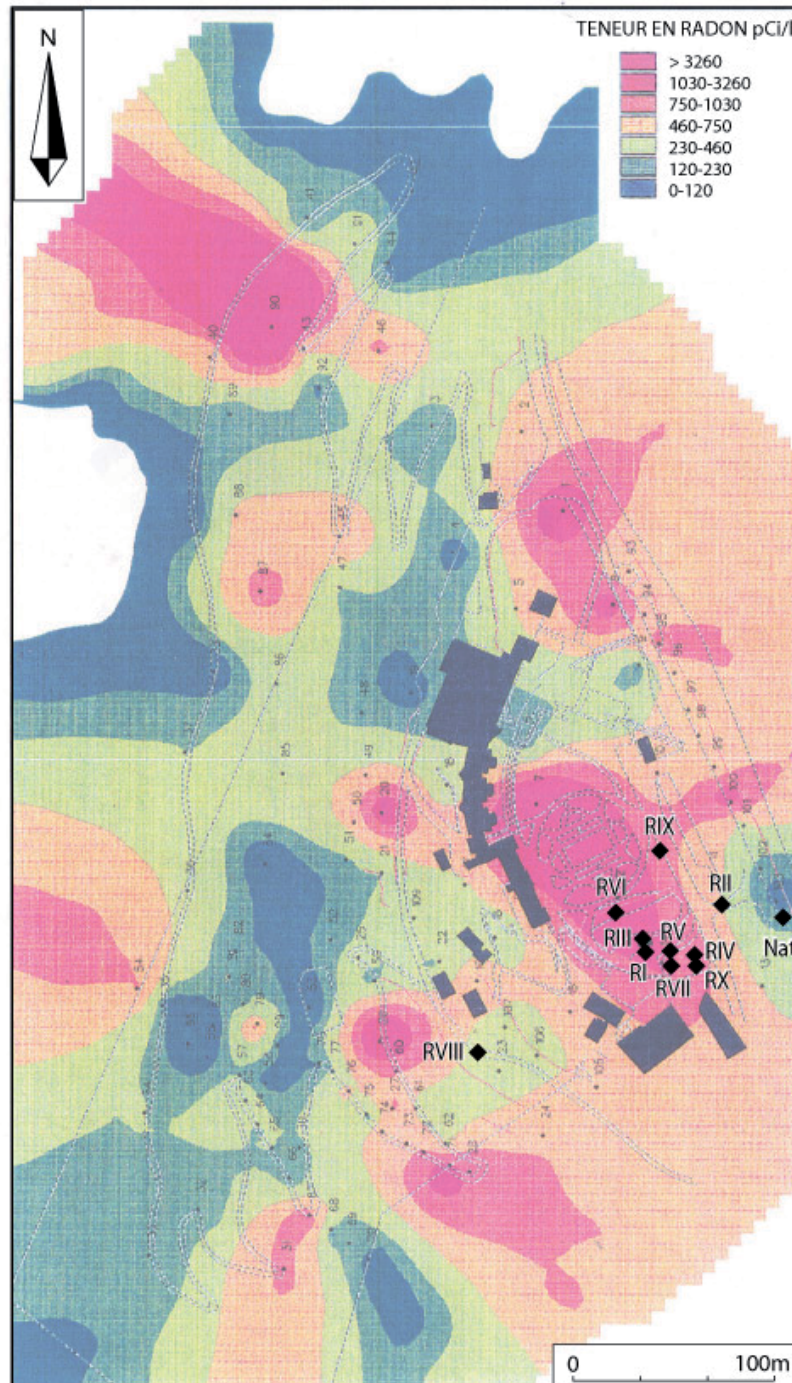


Figure I.22 : Carte des anomalies radon (Malatrait *et al.*, 1994, modifié)

3.3.3) La prospection électrique

La prospection électrique (Malatrait *et al.*, 1994) a permis de localiser le contact entre micaschistes et couverture sédimentaire le long d'un profil passant par le chemin au dessus des thermes. Dans un second temps, des cartes de résistivités de la zone d'émergence ont été établies à différentes profondeurs d'investigation (figure I.23). Les zones faiblement résistives sont interprétées comme des formations gorgées d'eau thermique. Ces cartes mettent en évidence :

- à 75, 100 et 200m de profondeur, deux zones de faible résistivité ; l'une située au niveau de l'entrée de l'établissement thermal et l'autre au niveau du lac ;
- à 150m de profondeur, la zone située sous le lac présente cette fois une forte résistivité ; ceci est interprété comme la zone d'effondrement qui a formé le lac.

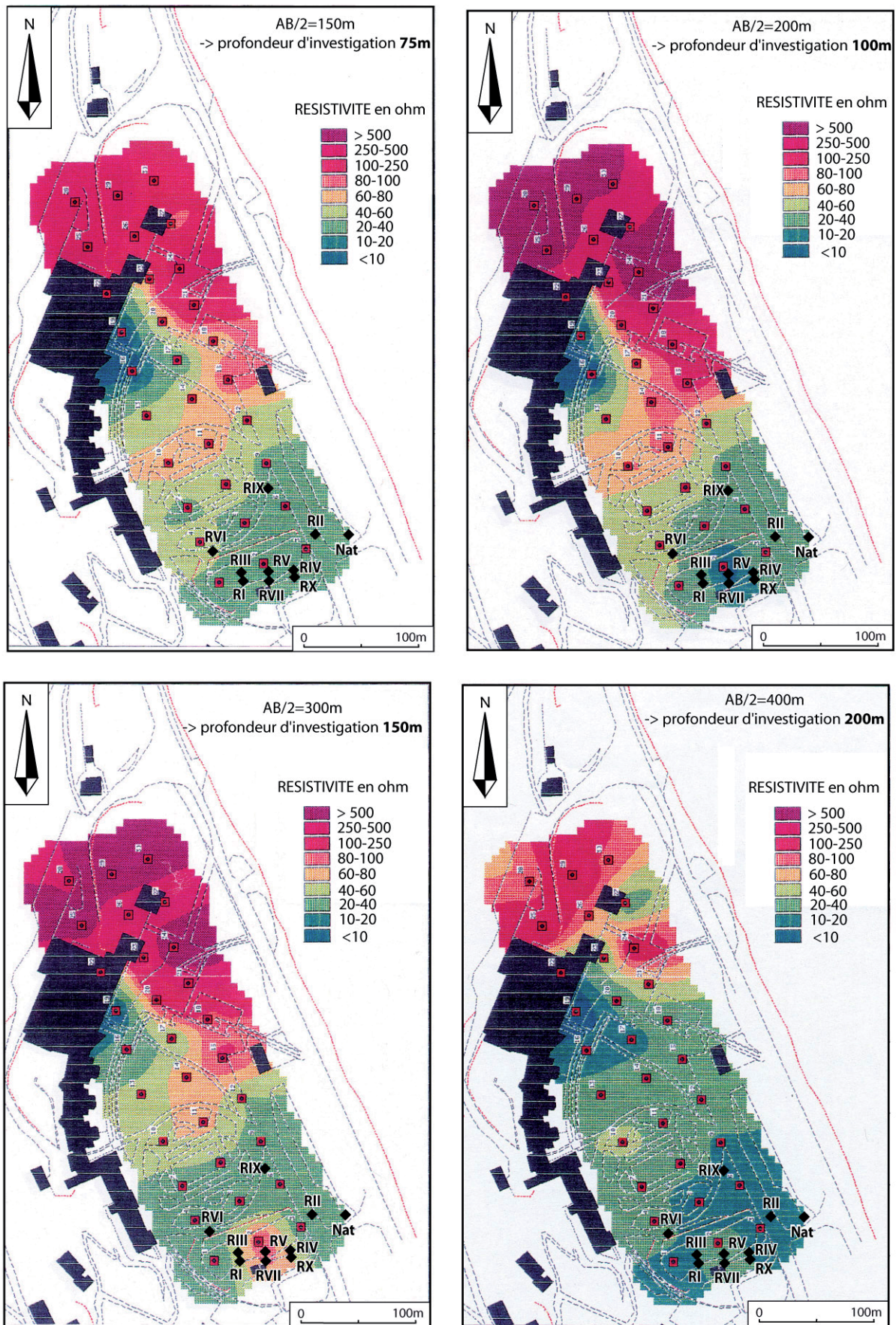


Figure I.23 : Cartes des résistivités du sous-sol à différentes profondeur (75, 100, 150 et 200m) d'investigation établies à partir de dispositifs rectangulaires (Malatrait *et al.*, 1994, modifié)

Ces trois prospections indirectes (sismique, radon et électrique) sont à l'origine des forages :

- RIX implanté au niveau d'une faille repérée en sismique, dans la zone d'anomalie radon et dans la zone peu résistive (figures I.21, I.22 et I.23) ;
- RVIII implanté dans le prolongement d'une faille repérée en sismique et proche d'une anomalie radon (figures I.21 et I.22)

Le forage RVIII, atteignant à 63m le substratum constitué de dolomies, gypse et anhydrite triasique, n'a rencontré que des eaux triasiques superficielles (11 à 19°C). Quant au forage RIX, il a atteint le substratum constitué de micaschistes à 84m (la bande triasique n'a pas été traversée) et n'a permis d'accéder qu'à un mélange entre eau thermique et eau superficielle.

Grâce à ces forages, on n'a donc pu voir de manière directe que :

- la limite entre le socle et les formations triasiques se situe entre RVI et RIX contrairement à l'interprétation de la sismique qui situait cette limite au niveau de la faille NE-SW située la plus à l'W (figure I.21) ;
- les méthodes d'investigation indirecte utilisées ne permettent pas de différencier la présence d'eau thermique ou d'eau triasique superficielle dans le sous-sol ; ce qui explique l'échec de l'implantation de RVIII.

3.3.4) Les diagraphies thermiques et chimiques

Corrignan (1996a) réalise des diagraphies thermiques et chimiques (analyses de Na et Li) sur les forages présents. Elles ont été réalisées après deux semaines d'arrêt de tout pompage et en considérant que (i) l'eau d'un forage est en équilibre thermique avec le champ thermal quelle que soit la partie de l'ouvrage (casing ou crépine) et (ii) le prélèvement réalisé lors de la diagraphie fixe l'état général du

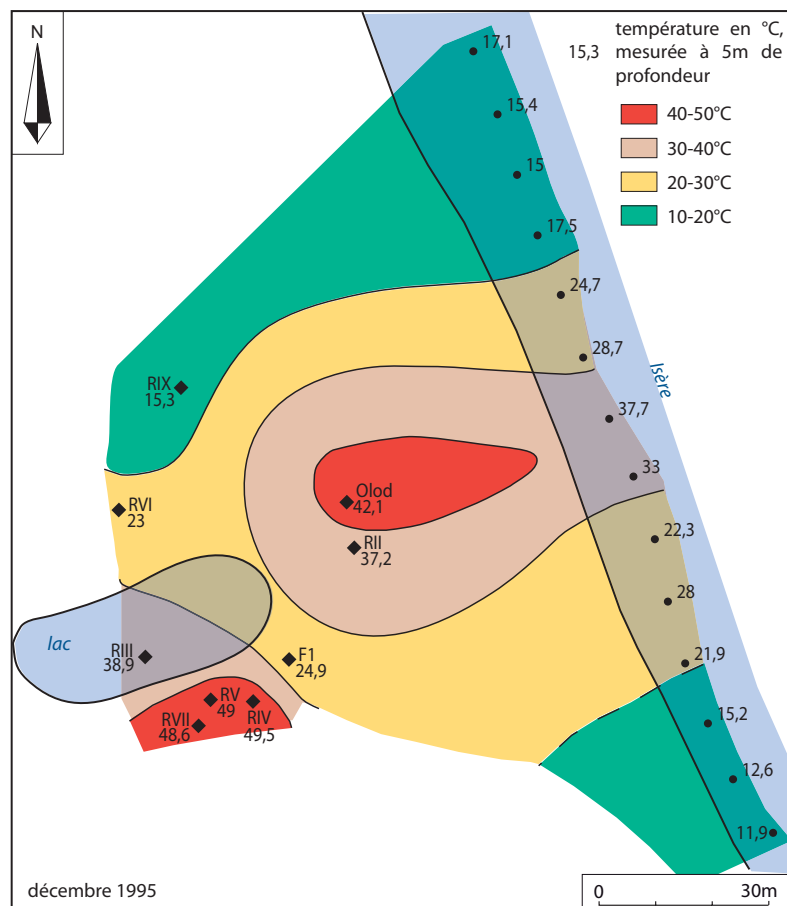


Figure I.24 : Carte thermique à 5m de profondeur établie à partir des diagraphies réalisées sur les forages F1, Olod, RII, RIII, RIV, RV, RVI, RVII et RIX (Corrignan, 1996a modifié)

gisement thermal à l'endroit considéré. La carte de la figure I.24 a permis d'établir que RIV, RV et RVII se trouvent au niveau du flux ascendant tandis que RVI et RIX se situent sur le panache développé par le dôme thermal. A l'issue de cette investigation, le forage RX, de 100m de profondeur, est implanté à proximité des forages RIV, RV et RVII. Ne permettant de capter encore une fois qu'un mélange, ce forage ne peut être exploité pour cause de contamination bactériologique.

3.3.5) Conclusion

Après avoir tenté de réhabiliter puis abandonné les forages RVII et RX, la SOGREAH (1998c) réalise le dernier forage RXI (futur Natacha). Celui-ci est implanté au niveau du croisement entre une structure NE-SW et une autre N-S, repérées en sismique réflexion (voir figure I.21). Il va permettre de capter l'eau directement au niveau du griffon et de s'affranchir des problèmes de mélange avec les eaux superficielles. A partir du moment où l'exploitation de la ressource est sécurisée, les études récentes se sont focalisées sur une compréhension plus globale du système et un maintien de la qualité de la ressource.

3.4. Les dernières études

3.4.1) Définition des 3 aquifères présents

Confirmant ce qui avait déjà été avancé par Lemahieu (1986), il est établi de manière claire par la SOGREAH (1999) que trois aquifères sont présents sur le site de la Léchère : la nappe alluviale de l'Isère, l'aquifère triasique superficiel des versants et l'aquifère thermal.

Les forages précédant Natacha résultent tous d'un mélange, en proportion variable, entre ces trois aquifères comme le synthétise la figure I.25 à partir des informations tirées des études précédentes.

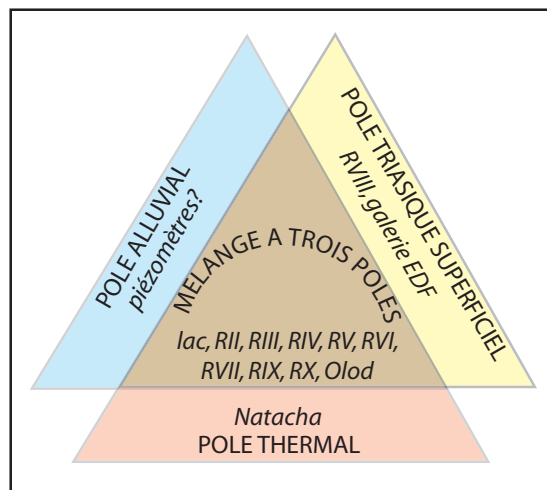


Figure I.25 : Schéma systématique décrivant la nature des eaux rencontrées dans la zone d'émergence de la Léchère

3.4.2) Les apports des données isotopiques

Dray (2000, 2001, 2003) a réalisé des analyses isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$, ^3H , ^{14}C) qui seront exposées plus en détail dans le chapitre IV. Ces dernières ont permis d'affirmer que :

- les eaux thermales sont bien d'origine météorique ;
- les forages RII et RVII seraient constitués d'environ 70% d'eau récente et le forage Natacha de 10% au maximum ;
- les eaux du forage Natacha auraient un âge compris entre 4000 et 13000 ans BP ;
- l'aire d'alimentation du système thermal se situerait à une altitude comprise entre 1700 et 2000m si l'on estime que les conditions climatiques régnant au moment de la recharge sont identiques aux conditions actuelles ;
- les eaux de la galerie sont alimentées à plus basse altitude que les eaux thermales.

3.4.3) Etude géologique à grande échelle

Afin d'avoir une vision plus globale, SOGREAH (2000, 2001) a réalisé une étude géologique des deux versants, tous deux susceptibles d'alimenter le système. Les terrains triasiques seraient les seuls terrains perméables de l'impluvium car les autres roches présentes (gneiss, micaschistes, calcaires et schistes) ne présentent qu'une perméabilité de fracture, jugée trop superficielle pour alimenter le système. Les affleurements de Trias, situés à une altitude comprise entre 1700 et 2000m, sont considérés comme les zones potentielles d'alimentation du système. Sur le versant de Naves (rive droite de l'Isère), le Col de la Lune, marqué par la présence de gypse et dolines, semble être une zone d'infiltration privilégiée (cf. chapitre II, §III.5.3 et figure II.26). Sur le versant de Celliers (rive gauche de l'Isère), constitué de nombreuses écailles triasiques, les secteurs potentiels sont plus nombreux et représentés par :

- le col de la Madeleine et l'Homme de Beurre (cf. chapitre II, §III.6.1 et figure II.27) ;
- les entonnoirs de dissolution sur la crête des Charmettes ;
- la zone de Combelouvière (cf. chapitre II, §III.5.2).

De plus, Debombourg (2003) et Dray (2001) suggèrent l'éventuelle présence de pertes sur le réseau hydrographique, lorsque celui s'écoule sur les affleurements de Trias.

Toujours d'après la SOGREAH (2001), il semblerait que l'eau triasique superficielle présente dans la zone d'émergence ne puisse provenir que de la rive gauche car les affleurements triasiques de la rive droite sont trop éloignés des thermes.

3.4.4) Les deux coupes récentes de la zone d'émergence

Deux coupes (figures I.26 et I.27) de la zone d'émergence ont été proposées par la SOGREAH (1998a et 2003).

La première coupe proposée (figure I.26) est schématique, son but est d'illustrer le principe de la remontée des eaux dans la zone d'émergence. Tout d'abord, les eaux thermales remontent en surface au sein des cargneules puis en empruntant les fractures qui affectent les anhydrites. Ceci serait d'ailleurs à l'origine de la dissolution des anhydrites puis des effondrements ayant formé le lac. Dans un second temps, les eaux thermales ainsi que les eaux froides triasiques se diffusent dans les dépôts quaternaires et se mélangent entre elles ainsi qu'avec les eaux de la nappe alluviale.

Cette première esquisse de coupe soulève quelques réserves. En effet, la circulation dans les cargneules semble peu vraisemblable car, dans la galerie EDF, la zone qui traverse les cargneules est celle où les venues d'eau sont les plus faibles. De plus, le remplissage quaternaire est représenté ici par 100m "d'alluvions récentes de l'Isère" bien qu'une telle épaisseur d'alluvions n'ait jamais été observée ailleurs. La structure de l'ombilic est nécessairement beaucoup plus complexe et constituée d'une imbrication entre les dépôts de fond d'ombilic et les dépôts de versant. Pour finir, une zone fermée de dépôts fins est figurée au fond du remplissage dans le forage Natacha. Une telle représentation est fautive d'un point de vue géologique. La dynamique de dépôt des alluvions ne peut former que des lentilles de granulométrie différente mais jamais une zone "flottante" de dépôts fins incluse dans des dépôts plus grossiers.

La seconde coupe (figure I.27) se veut plus proche de la réalité puisqu'elle représente les failles repérées en sismique et des courbes isothermes. L'orientation de cette coupe n'est pas précisée mais elle est vraisemblablement SW-NE, donc parallèle à l'accident principal. Pour cette deuxième coupe, l'hypothèse est faite que les eaux thermales remontent en surface par les failles N-S perpendiculaires à l'accident principal. Puis, elles se diffusent et se mélangent avec les eaux triasiques froides au sein de 3 aquifères définis comme "calcaires supérieurs du Trias", "calcaires inférieurs du Trias" et "alluvions". Enfin, les eaux mélangées remontent à la surface au niveau du lac et de Natacha par l'intermédiaire de failles.

Là-aussi, on peut souligner des faiblesses. Tout d'abord, le choix d'orienter la coupe parallèlement à l'accident principal et l'absence de légende rend la représentation de la structure peu lisible. Ensuite, "les calcaires supérieurs du Trias" n'ont pas été décrits lors de la réalisation du forage Natacha ni par les géologues ayant travaillé dans la région (Barféty, 1985, Eltchaninoff, 1980, Eltchaninoff et Triboulet, 1980,

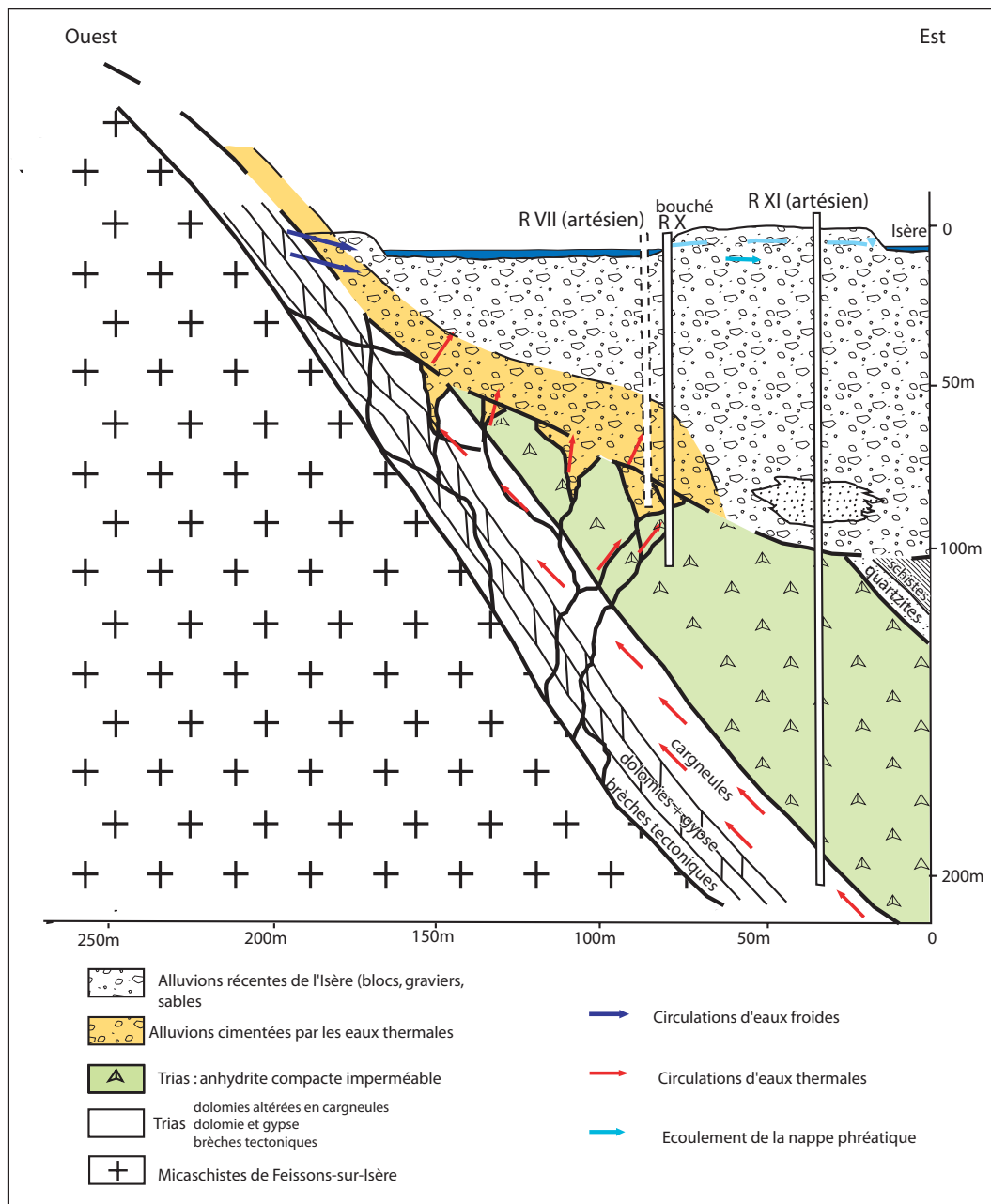


Figure I.26 : Coupe de la zone d'émergence proposée par SOGREAH (1998a, modifié)

Gély, 1989, Serre, 1983, Triboulet, 1980). De plus, les arguments qui ont permis de tracer les isothermes ne sont pas précisés et l'eau de la nappe alluviale n'est pas prise en compte. Pour finir, la remontée des eaux mélangées jusqu'à la surface par l'intermédiaire de failles ne semble pas justifiée puisque la circulation des eaux dans un milieu poreux, tel que le remplissage quaternaire, ne nécessite pas la présence de discontinuités structurales.

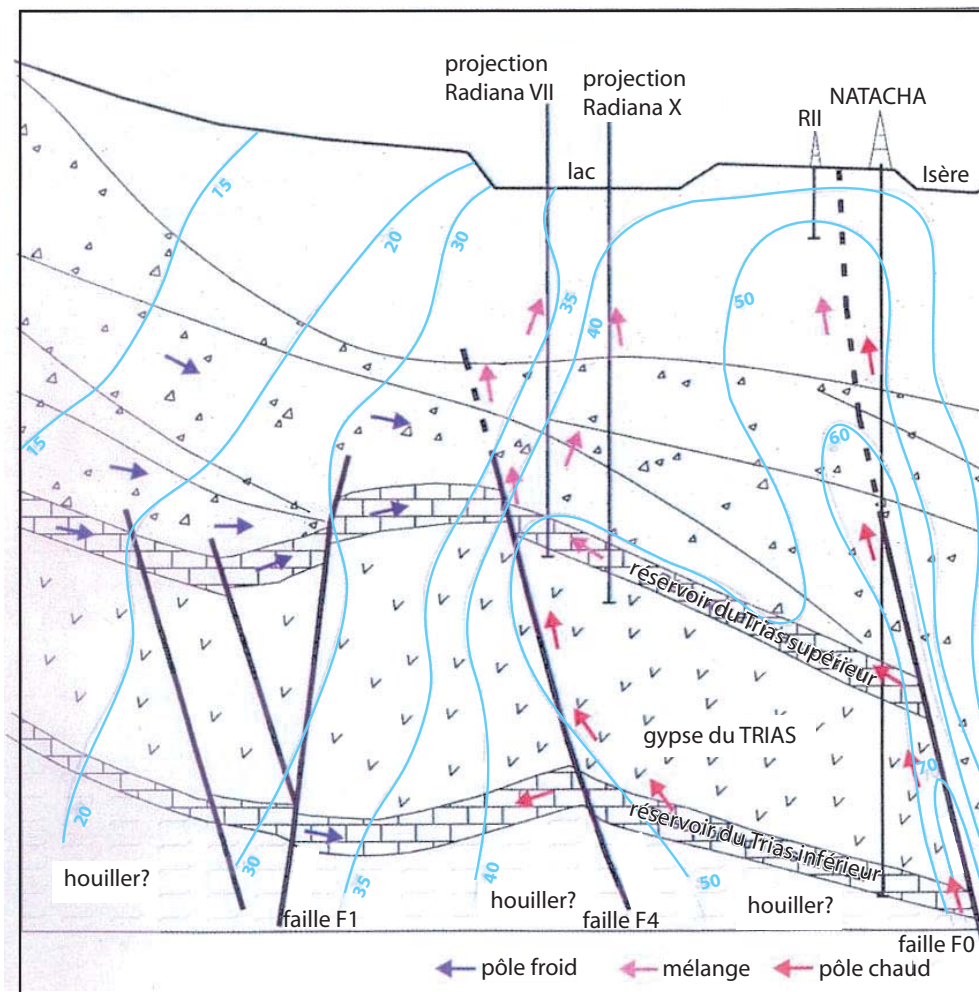


Figure I.27 : Coupe de la zone d'émergence proposée par SOGREAH (2003, modifié)

3.4.5) Conclusion

Ces dernières avancées ont tenté de mieux saisir le système dans sa globalité, depuis l'aire d'alimentation jusqu'à la zone d'émergence. Cependant, les deux coupes proposées présentent encore des inconnues et doivent être améliorées.

De manière générale, l'ensemble des études réalisées sur le site ne permettent pas d'avoir une vision claire et globale du fonctionnement du système thermal de la Léchère. Les investigations indirectes (sismique, électrique ou radon), sur lesquelles se sont basées l'implantation des derniers forages RVIII, RIX, RX et Natacha, n'ont pas mené à la compréhension de la zone d'émergence. Dans ce travail de thèse, il est donc nécessaire de repartir sur des bases solides afin de redéfinir les trois constituantes du système : l'aire d'alimentation, le parcours souterrain et la zone d'émergence.

4. Les aspects environnementaux du site de la Léchère

4.1. Définitions

Comme l'illustre la figure I.28, en ce qui concerne le risque de détérioration de la ressource en eau, on peut distinguer d'une part l'aspect qualitatif de la ressource (caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques) et l'aspect quantitatif (tarissement des sources superficielles et quantité d'eau thermique exploitable). Le risque de détérioration n'existe qu'à deux conditions : (i) des aléas doivent être présents et (ii) le système doit être vulnérable (ou sensible) face à ces aléas.

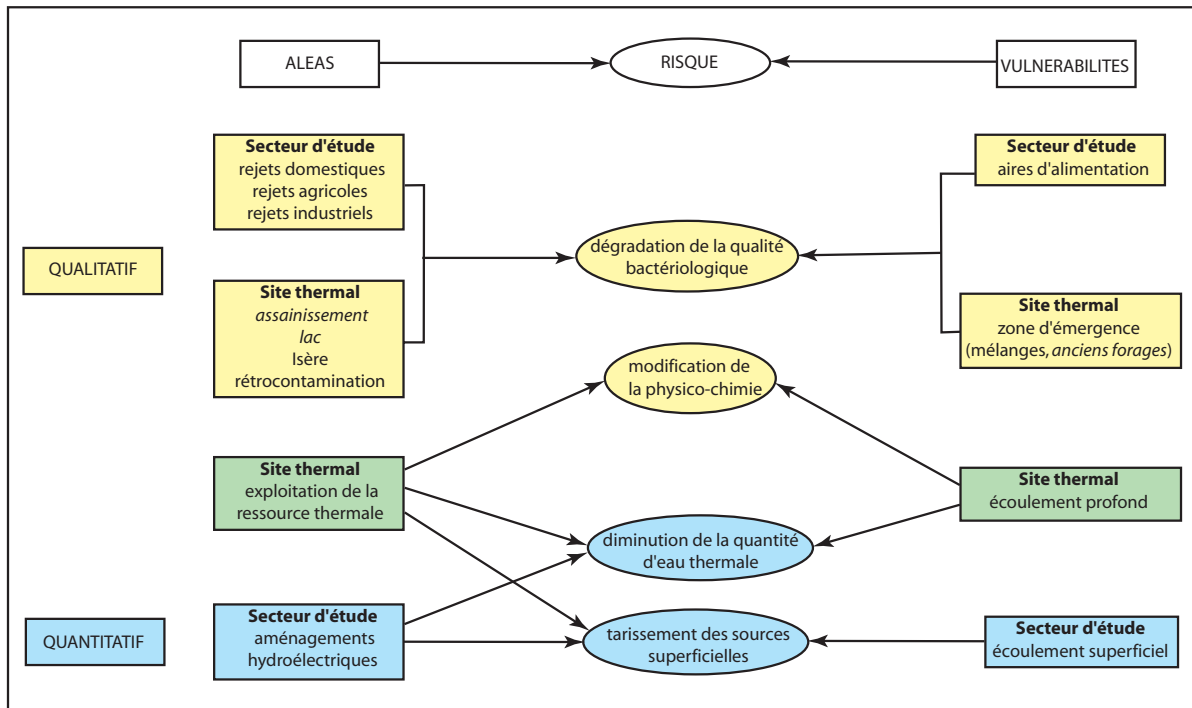


Figure 1.28 : Schéma systémique représentant la notion de risque pour la ressource en eau sur le secteur étudié

4.2. Les risques de détérioration qualitative de la ressource thermique

4.2.1) Les aléas

D'après Luczyszyn et Chemery (2003), on peut distinguer trois types de rejets sur le secteur étudié : les rejets domestiques, les rejets agricoles et les rejets industriels.

Les rejets domestiques du secteur sont en majorité issus de deux stations d'épuration : celle de la Léchère-Pussy, présentant des problèmes de fonctionnement non précisés, et celle d'Aigueblanche. De plus, les eaux de Grand-Cœur et Villargerel sont collectées mais non traitées. Enfin, en Savoie, 20% des boues d'épuration sont éliminées par recyclage agronomique et les pratiques d'épandage ne sont pas précisées dans le secteur de la Léchère.

En ce qui concerne les rejets agricoles, bien que la CCVA regroupe un nombre important de bovins (76 à 104 Unités Grand Bovins /km² de Surface Agricole Utile), Luczyszyn et Chemery (2003) ne précisent pas si les rejets d'élevages préjudiciables pour le milieu sont traités ou non.

Situées à l'aval du site thermal, deux entreprises de La Léchère sont amenées à effectuer des rejets liquides industriels autorisés : il s'agit du groupe Péchiney Electro Métallurgie Château-Feuillet, UCAR SNC dont l'activité est la production de graphite (1 site sur chaque rive de l'Isère). En outre, une décharge de déchets ménagers (volume de 8 000 à 50 000 m³) est présente à Doucy. Pour finir, sans disposer de données spécifiques et précises sur les rejets urbains et routiers, on peut penser qu'ils sont non négligeables sur l'ensemble de la Tarentaise : la vallée très étroite est fortement urbanisée et regroupe une voie rapide, une route départementale et une voie de chemin de fer;

Dans la zone immédiatement proche des forages thermaux, de nombreux aléas, inventoriés par le bureau d'étude SOGREAH (1999) sont ou ont été présents :

- 1) Localisé à l'amont hydrodynamique des captages, le réseau d'assainissement était considéré comme la source la plus probable de contamination bactérienne. Il a été entièrement réhabilité en 1999.
- 2) Les eaux stagnantes du lac regroupent toutes les eaux non exploitées par la station thermique après leur transport par le réseau d'exploitation. En favorisant le développement bactérien, elles peuvent donc constituer une source potentielle de contamination. Des travaux de réhabilitation du lac ont été réalisés en 1999 : le lac a d'abord été vidé puis curé et enfin, un système de pompage a été mis en place afin de renouveler régulièrement les eaux.

3) Le gisement thermal se trouve à quelques mètres de l'Isère qui, avec sa nappe alluviale, concentrent toutes les pollutions de son bassin versant. L'Isère est donc susceptible d'être un vecteur de contamination du gisement thermal par les eaux de surface.

4) Les dépôts superficiels qui protégeaient le gisement ont été forés en de nombreux points aux alentours du griffon thermal. Tous ces forages constituaient autant de points d'infiltration directe vers la nappe thermale et étaient donc responsables d'un accroissement de la vulnérabilité de la ressource. Des travaux de réhabilitation, finalisés par la SOGREAH (1998c), ont consisté en une cimentation en pression de l'ensemble des ouvrages, mis à part le forage d'exploitation actuelle et le forage RVII.

5) Des possibilités d'échanges par rétro-contamination entre le réseau d'exploitation et les forages pourraient également être responsables de la contamination bactérienne.

A l'heure actuelle, seules subsistent la présence de l'Isère et sa nappe alluviale ainsi que la possibilité de rétro-contamination.

4.2.2) La vulnérabilité du système

D'après Zwahlen *et al.* (2001), la vulnérabilité des eaux souterraines face aux contaminations résulte des caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques d'un secteur.

Le temps de transit des eaux est un facteur déterminant de l'évaluation de la vulnérabilité. En effet, un long temps de séjour constitue une protection naturelle face à une éventuelle contamination car les polluants auront le temps d'être dégradés par les différents processus chimiques qui ont lieu durant le parcours souterrain. En estimant que les eaux thermales de la Léchère ont un temps de séjour de plusieurs milliers d'années (Dray, 2003), la vulnérabilité du système ne réside donc pas au niveau des zones d'alimentation comme le montraient les cartes de vulnérabilité de la ressource thermale élaborées sur les deux versants (SOGREAH, 2000, 2001). Seule la zone d'émergence est soumise à une forte vulnérabilité due aux phénomènes de mélange entre eau thermale et eau superficielle.

A l'heure actuelle, la présence de l'Isère et de sa nappe alluviale semble être le seul aléa subsistant. Le forage Natacha, qui capte des eaux non mélangées, peut être considéré comme non vulnérable : le risque de détérioration semble donc avoir été totalement écarté. Avant la réalisation du forage Natacha, les aléas étaient encore présents et la vulnérabilité de la ressource importante puisque les anciens forages captaient tous des eaux mélangées. Le risque de détérioration qualitative s'est alors exprimé par la contamination bactériologique des forages RII et RVII qui a mené à la fermeture de l'établissement en 1998.

4.2.3) Les données bactériologiques

Lors de la réalisation des pompages d'essai sur le forage RX en 1997, les *Legionella Pneumophilla* (LP) apparaissent de façon massive. Cette bactérie, fréquemment présente dans les hôpitaux, les bâtiments climatisés et les établissements thermaux, est responsable du développement de deux formes de maladie chez l'homme : la fièvre de Pontiac et la maladie du légionnaire (Becq-Giraudon, 1997). Celle-ci se transmet par (i) inhalation de gouttelettes, (ii) aspiration d'eau par sonde naso-gastrique ou (iii) nettoyage d'une plaie. D'après Etienne (1997), la température optimale de prolifération des LP est comprise entre 35 et 40°C ; en dessous de 20°C, il n'y a plus de multiplication et au dessus de 60°C, elles ne survivent pas.

Les LP étaient déjà présentes (<1000 UFC/l) dans le forage RVI en 1992 et dans le forage RVII en façon ponctuelle en 1995 ainsi qu'à la suite des pompages d'essais sur RX en 1997 (figure I.29a). Après le pompage d'essai réalisé sur Natacha en 1999, la contamination passe à 100000 UFC/l dans le forage RVII. A l'issue de la réhabilitation du site fin 1999, la concentration se stabilise autour de 1000 UFC/l avec quelques pics ponctuels. Le forage RII est marqué par la même explosion de contamination en 1999 mais de manière beaucoup moins importante (<1000 UFC/l). Les analyses bactériologiques du forage Natacha se sont toutes révélées exemptes de LP.

Cette contamination provient vraisemblablement des aléas potentiels définis précédemment : le réseau d'assainissement, les eaux stagnantes du lac, l'Isère et sa nappe alluviale et/ou une rétro-contamination. La présence de toutes ces sources potentielles semblent être responsables de la présence de LP en

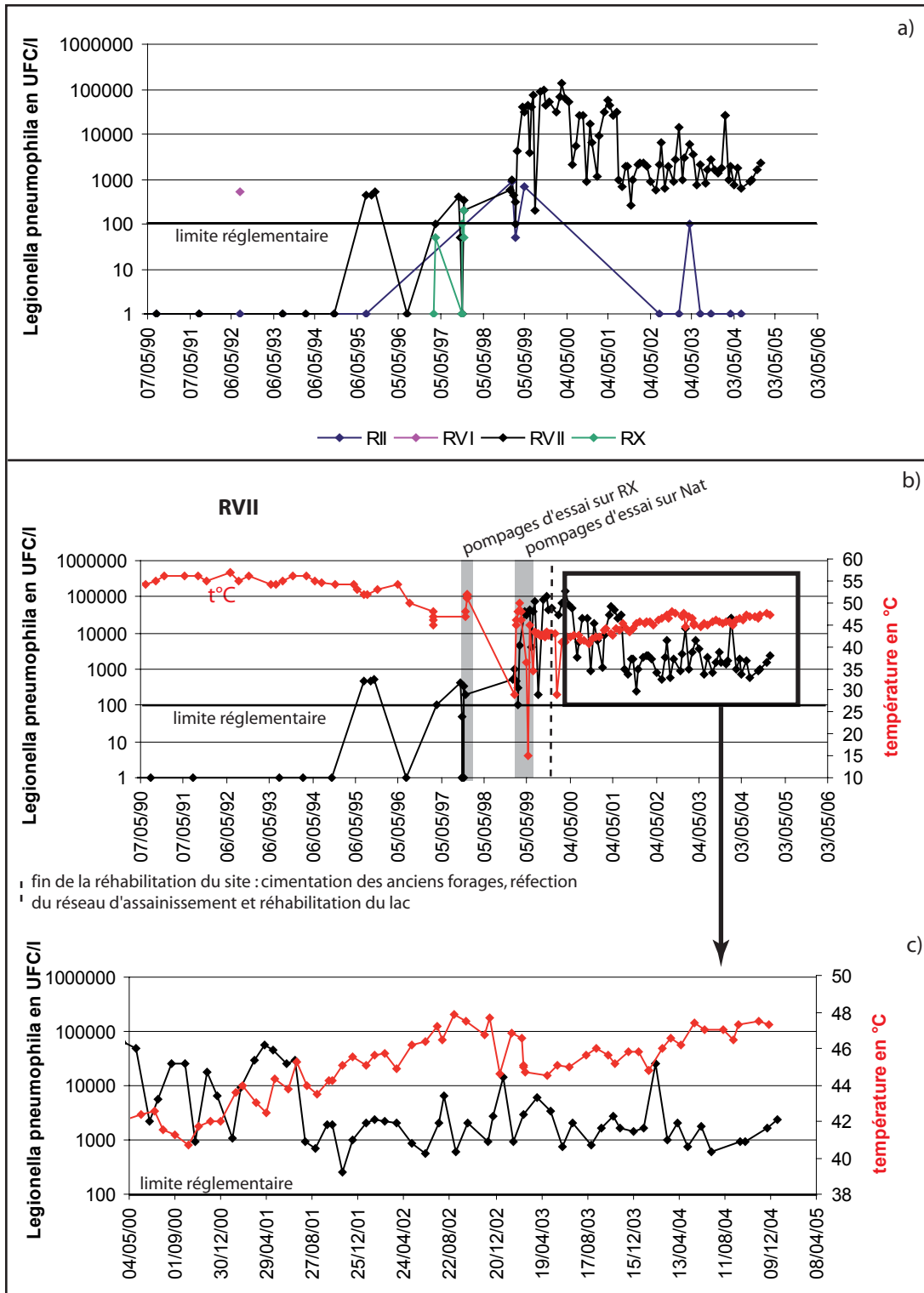


Figure I.29 : Evolution des concentrations en *Legionella Pneumophilla* sur les forages thermaux de la Léchère (RII, RVI, RVII, RX) et mise en évidence de la corrélation entre concentration en LP et température de l'eau dans le forage RVII

concentration faible dans les forages RVI et RVII en 1992, 1995 et 1997. Mais on peut se demander quel est le moteur de l'explosion de la contamination dans le forage RVII en 1999. Il existe une nette corrélation entre la prolifération des LP et les diminutions de température des eaux du forage (figure I.29b et c). Ainsi, la prolifération est entamée lorsque la température passe en dessous de 50°C en 1995 et accélérée par des baisses brutales de température (30°C est la température idéale de prolifération) liées aux pompages d'essais réalisés sur le forage Natacha. La contamination est maintenant installée aux alentours du forage RVII. Malgré la réhabilitation du site en 1999, la concentration se stabilise à environ 1000 UFC/l mais reste marquée par des pics, tous liés à des diminutions de la température.

Le forage Natacha ne présente aucun problème de contamination ; ceci semble être du au fait que : (i) seul l'aquifère quaternaire est affecté par la contamination et (ii) la température de 60°C des eaux du forage Natacha ne permettent pas aux LP de survivre.

4.3. Les risques de détérioration quantitative de la ressource en eau

4.3.1) Les aléas

Sur le secteur, les deux aléas quantitatifs sont représentés par les aménagements hydroélectriques (galerie Isère-Arc et galerie entre Naves et Glaize) ainsi que par l'exploitation de la ressource thermique.

4.3.2) La vulnérabilité du système

Face à l'aléa représenté par les galeries EDF, la vulnérabilité ne concerne que les sources superficielles et pas l'émergence thermique. En effet, les eaux thermales proviennent de circulations profondes (plusieurs milliers de mètres de profondeur) qui ne peuvent pas être affectées par des phénomènes aussi superficiels que les galeries (quelques centaines de mètres de couverture au niveau de l'accident de la Léchère). Par contre, la réalisation de la galerie Isère-Arc et de la galerie de reconnaissance a provoqué le tarissement de plusieurs sources en rive gauche : "sources froides des thermes", "sources alimentant Bonneval" et "sources alimentant Cudray" (Anonyme, 1953). En effet, les galeries jouent le rôle de drain sur l'ensemble des massifs qui les entourent et plus particulièrement sur les circulations qui ont lieu dans la couverture qui les surmonte. Les tarissements observés précédemment nous permettent d'établir un lien hydrogéologique entre :

- la galerie de reconnaissance et les "sources froides des thermes" qui correspondent vraisemblablement aux écoulements qui ont déposé les travertins, actuellement inactifs, situés en bas de versant contre l'établissement thermal ;
- la galerie Isère-Arc et les sources de Bonneval et Cudray.

L'exploitation thermique constitue également un aléa qualitatif car elle peut modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau thermique (figure I.28). D'ailleurs, le forage Natacha est exploité en continu avec un débit bridé de 45m³/h afin de ne pas modifier ses caractéristiques physico-chimiques par des variations du débit d'exploitation.

La compréhension globale du système va permettre de proposer une évaluation de la vulnérabilité qualitative et quantitative de la ressource thermique (chapitre VI).

4.4. Les impacts de la ressource thermique sur son environnement

Sur la figure I.20, on a pu voir que l'Isère est alimentée par la nappe quaternaire gorgée d'un mélange entre eau thermique et eaux froides superficielles. Ceci est confirmé par les relevés de température et conductivité effectués par Malatrait *et al.* en 1994, à une profondeur de 50cm dans les alluvions de l'Isère. Ceux-ci révèlent que, dans l'alignement du lac, l'Isère reçoit une quantité inconnue d'eau à 40°C. De plus, les eaux thermales non exploitées pendant la période de fermeture des thermes sont rejetées dans l'Isère après refroidissement (45m³/h). L'impact de ces arrivées d'eau chaude dans l'Isère existe mais reste difficilement quantifiable.

5. Bilan de la situation en 2004

5.1. Etat du système d'exploitation

Au moment où cette thèse a commencé, seuls subsistaient le forage Natacha, exploité avec un débit bridé à 45m³/h, et deux forages de contrôle RII et RVII maintenus respectivement à des débits de 1 et 0,5 m³/h. Le forage RII a été obturé courant 2006.

Les eaux du forage Natacha sont captées à 200m de profondeur, à une température de 60°C. Le forage est artésien avec un débit bridé à 45m³/h, le niveau piézométrique fluctue entre 438 et 440m (surface topographique à 437,35m). Les eaux de Natacha sont d'abord dégazées dans une cuve intermédiaire (figure I.30) puis acheminées vers un bac de refroidissement situé au dessus des thermes pour enfin être distribuées sur tous les points d'eau de l'établissement. Tous les excédents d'eaux thermales sont rejetés vers l'Isère après refroidissement.

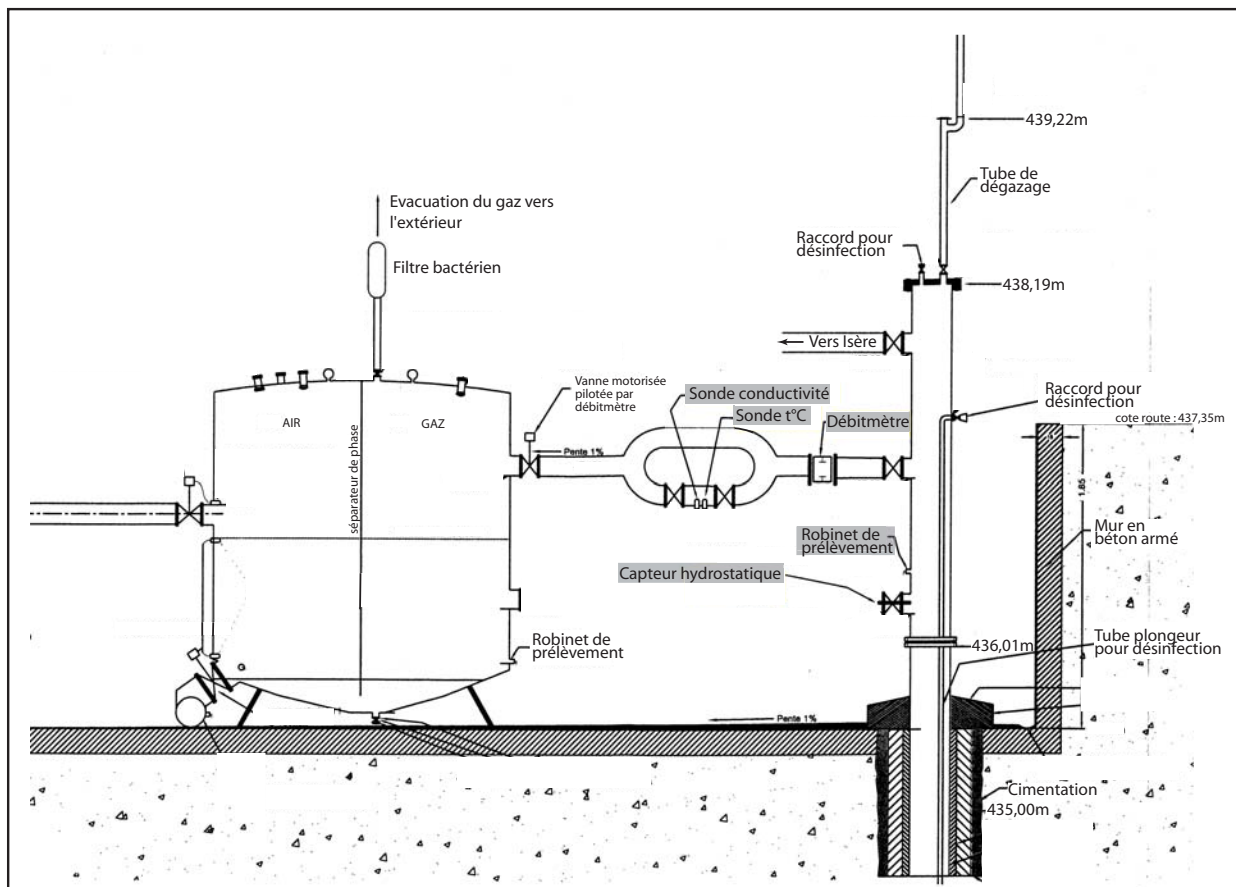


Figure I.30 : Schéma de l'équipement de la tête du forage Natacha

5.2. Etat des connaissances du système et objectifs de la thèse

A l'issue de la phase de synthèse bibliographique effectuée au début de cette thèse (environ 6 mois), on peut affirmer que (i) le mode de réchauffement des eaux est du uniquement au gradient géothermique et que (ii) la pression hydrostatique est le moteur de la remontée vers la surface. En effet, l'aire d'alimentation se situe à une altitude de 1700 à 2000m et la zone d'émergence se situe à 440m ; soit une différence d'altitude de 1300 à 1600 m.

Pour ce type de système, on considère trois composantes : l'aire d'alimentation, le parcours souterrain et l'émergence. Le tableau I.4 définit les objectifs de la thèse au vu de l'état de connaissance du système sur ces trois composantes.

	Données acquises en 2004	Hypothèses retenues en 2004	Objectifs de la thèse
Alimentation		infiltration au niveau des affleurements de Trias (cargneules, dolomies, gypse)	évaluation de toutes les possibilités d'alimentation du système (fracturation, pertes sur le réseau hydrographique...)
		alimentation en rive droite et/ou rive gauche de l'Isère	argumentation pour discriminer rive droite / rive gauche
	altitude d'infiltration : entre 1700 et 2000m		évaluation quantitative de la recharge
Parcours	interaction des eaux thermales avec le Trias (SO ₄) et avec les micaschistes du socle (Na, SiO ₂)		caractérisation précise des interactions fluides/roches
	temps de séjour des eaux thermales ≥ 1000 ans		évaluation du comportement hydrodynamique du système thermal
	température maximale atteinte : 67 à 160°C		évaluation du comportement thermique du système thermal
Emergence	structure du remplissage quaternaire	remontée par les failles présentes dans la vallée de l'Isère (failles repérées en sismique)	identification de ces failles en surface
	<ul style="list-style-type: none"> . toit du substratum localisé par sismique réflexion . interstratification de dépôts fins et grossiers . présence de zones cimentées 		définition de la structure 3D du remplissage quaternaire compréhension de la dynamique de remplissage
	<ul style="list-style-type: none"> mélange à 3 pôles dans le remplissage quaternaire . pôle thermal . pôle triasique superficiel . pôle alluvial identification d'un "dôme thermal" au niveau du lac		définition des conditions de mélange
			détermination des relations hydrodynamiques entre les 3 aquifères

Tableau I.4 : Bilan sur l'état des connaissances du système thermal de la Léchère à l'issue de la synthèse bibliographique et objectifs de la thèse

5.3. Les moyens mis en œuvre

Afin de répondre à ces objectifs, le travail d'investigation s'est articulé autour de quatre grandes thématiques : la définition de la structure géologique, l'analyse des aspects hydrodynamiques, la caractérisation des échanges fluides / roches et enfin la modélisation numérique couplée hydrodynamique et thermique du système.

5.3.1) Définition de la structure géologique (Chapitre II)

Un travail de cartographie au 1/10 000 a été réalisé sur le secteur d'étude afin d'apporter des précisions aux cartes géologiques 1/50 000 du BRGM. Des levés de fracturation ont été effectués afin d'évaluer le potentiel de circulation par la porosité de fractures. Ces travaux de terrain ont duré environ 5 mois. De plus, des analyses pétrographiques et minéralogiques ont été réalisées sur l'ensemble des roches du socle afin de caractériser les matériaux de l'encaissant. Et pour finir, toutes les données de forage ont été réinterprétées afin de comprendre la structure de la zone d'émergence. L'objectif de ce travail est de proposer un modèle conceptuel des écoulements.

5.3.2) Les aspects hydrodynamiques (Chapitre III)

Pendant environ 2 mois de terrain, des mesures de débits sériés ont été réalisées sur les bassins versants de l'Eau Rousse et du Grand Nant de Naves afin d'identifier les relations entre réseau hydrographique et circulation souterraine. L'analyse des chroniques de pluie et des niveaux piézométriques enregistrées sur le site a permis de caractériser le comportement hydrodynamique de l'aquifère thermal et d'évaluer les relations hydrodynamiques entre les 3 aquifères présents dans la zone d'émergence. L'objectif du traitement de ces données est de proposer un modèle de comportement hydrodynamique du système.

5.3.3) Etude des échanges fluides-roches (Chapitre IV)

Un plan de prélèvement a été défini afin d'avoir une image de la chimie non seulement des eaux présentes sur le site d'émergence (eau thermale, eau triasique superficielle et eau alluviale) mais également des eaux superficielles typiques des faciès constituant le massif (carbonates, bandes triasiques et socle). Pendant une année hydrologique (de septembre 2005 à septembre 2006), les paramètres physico-chimiques, les teneurs en éléments majeurs et les compositions isotopiques de l'ensemble des points prélevés ont été suivis (environ 3 mois de formation et d'analyse en laboratoire). Parallèlement à cela, les différents faciès de roches du secteur ont été analysés (éléments majeurs et traces, composition isotopiques). L'attention a ensuite été portée sur la composition de la phase gazeuse des eaux thermales. L'objectif de ces investigations, est de proposer un schéma conceptuel de l'acquisition des caractéristiques géochimiques des fluides.

5.3.4) Modélisation couplée hydrodynamique / thermique (Chapitre V)

Pour finir, une modélisation numérique couplée hydrodynamique et thermique des circulations profondes et superficielles a été réalisée afin de valider les observations faites précédemment (environ 3 mois de formation et de modélisation sous le logiciel Feflow).

Dans la dernière partie, le bilan réalisé à partir des informations apportés par ces 4 volets m'ont permis de proposer un schéma global permettant d'intégrer à la fois les propriétés géologiques, hydrodynamiques, géochimiques et thermiques du système thermal de la Léchère.

Chapitre II : Le contexte géologique du secteur étudié

Le chapitre II définit la structure géologique. Dans ce but, les formations géologiques sont décrites, une cartographie de la zone de contact tectonique est réalisée, la fracturation du massif est analysée et la structure du remplissage quaternaire dans la zone d'émergence est précisée.

Chapitre II : Le contexte géologique du secteur étudié

À l'issue du premier chapitre introductif, ce deuxième chapitre va se centrer sur la géologie du secteur d'étude et des environs. Pour ce volet, les travaux d'investigation se sont articulés autour d'un travail de cartographie au 1/10 000, d'analyses pétrographiques et minéralogiques sur l'ensemble des roches du socle, de levés de fracturation et enfin, de la réinterprétation de toutes les données de forage. Ces nouvelles données vont permettre de préciser le contexte géologique, c'est à dire de caractériser les matériaux de l'encaissant, d'évaluer leur potentiel aquifère, de comprendre la structure de la zone d'émergence et, pour finir, de proposer un modèle conceptuel des écoulements.

I. Le contexte géologique général

1. Localisation du site de la Léchère dans l'Arc Alpin

Le site de la Léchère appartient à la bordure orientale des Alpes externes et plus précisément aux nappes delphino-helvétiques (figure II.1). A quelques kilomètres plus au SE, affleure, en effet, le front pennique (FP) qui sépare les Alpes externes et les Alpes internes. Les nappes delphino-helvétiques orientales ou ultra delphino-helvétiques sont issues de l'ancienne plateforme, présente entre le Massif

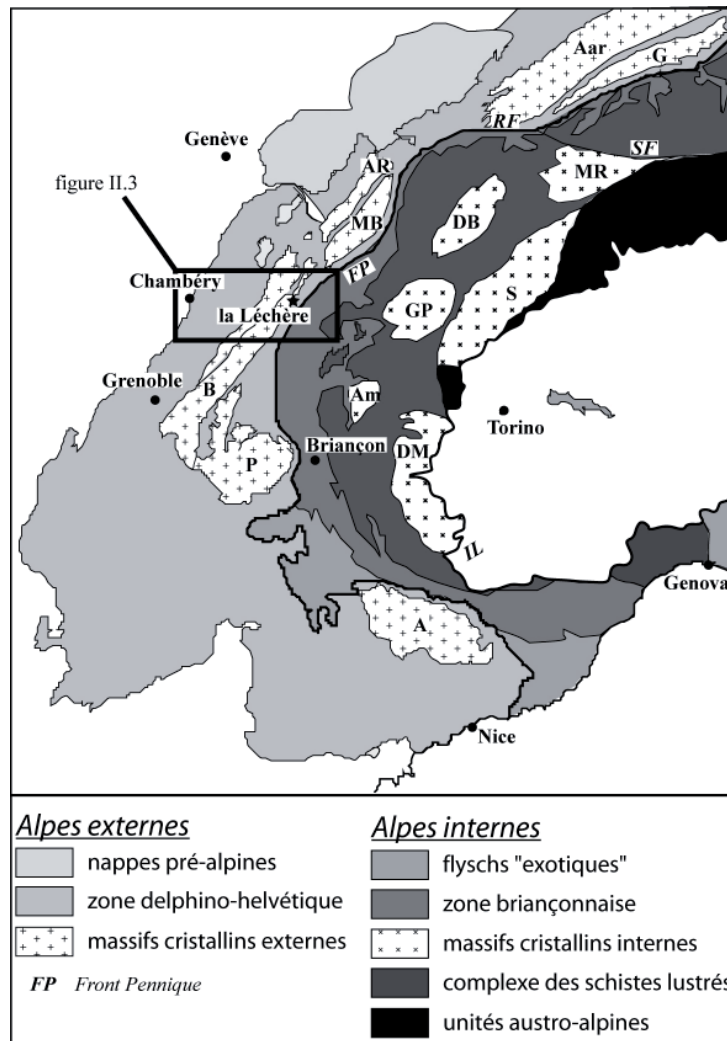


Figure II.1 : Carte simplifiée des Alpes Françaises (Rossi et al., 2005, modifié)

Central et l’océan alpin (ou liguro-piémontais) à partir du Dogger (-175 à -161 Ma). Il s’agit d’un domaine à croûte continentale qui comportait donc, à l’origine, un socle cristallin anté-alpin, granito-gneissique supportant une couverture sédimentaire, carbonatée ou marneuse pour l’essentiel, développée du Trias au Tertiaire (figure II.2a). L’épaisseur de cette couverture est variable selon que l’on se trouve sur les demi-horsts ou sur les demi-grabens. A partir de la fin de l’Eocène (environ -30 Ma), la phase de collision a mené au charriage et à la superposition des différents domaines paléogéographiques pour former la structure actuelle des Alpes Occidentales (figure II.2b). Le site de la Léchère se trouve sur la bordure orientale du massif cristallin externe de Belledonne (B), au contact entre le socle et la couverture sédimentaire delphino-helvétique (figures II.1 et II.2b).

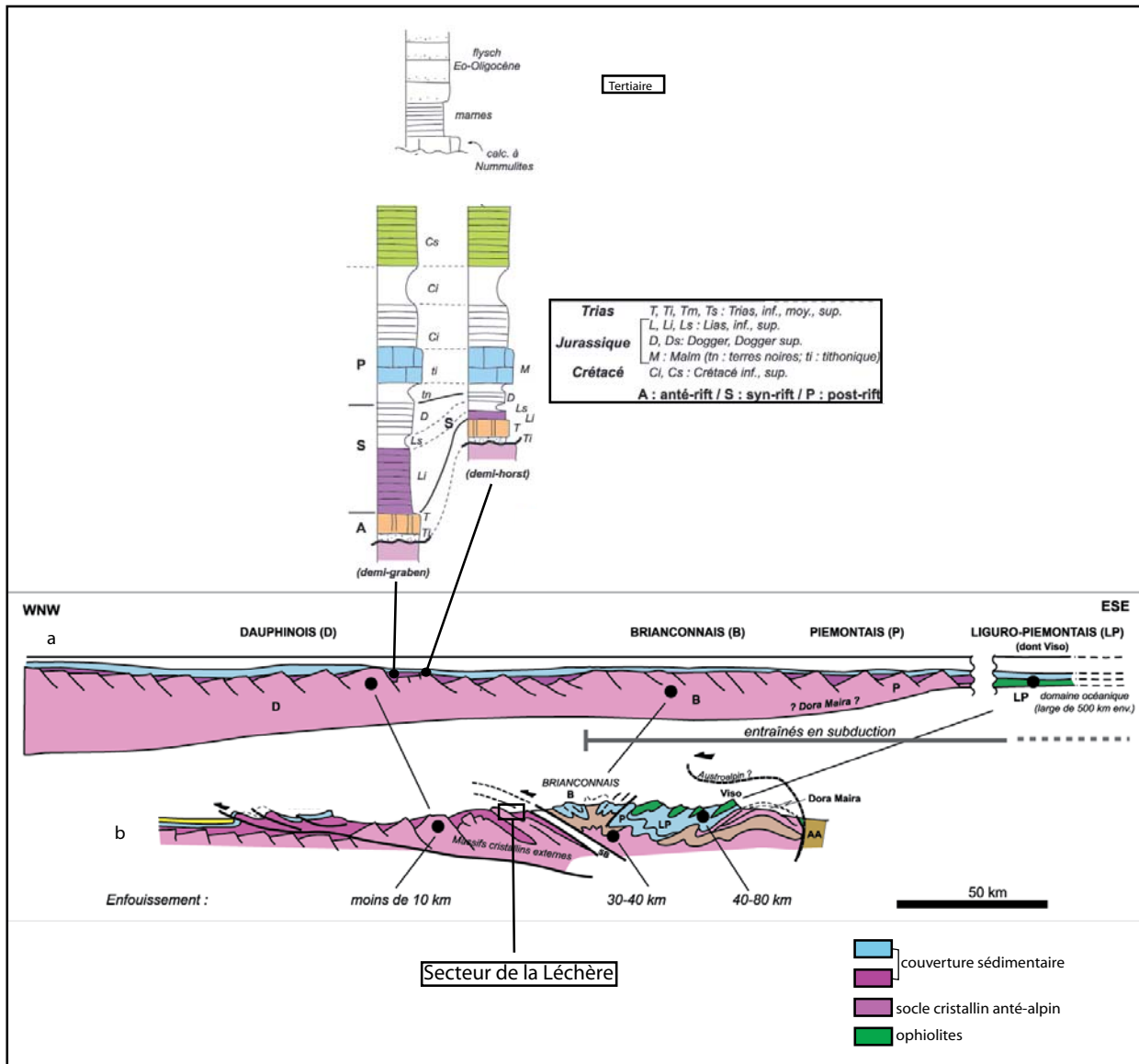


Figure II.2 : Positions des différentes unités dans leur contexte post-rift (a) et dans leur contexte actuel post-collision (b). Log lithostratigraphiques du domaine dauphinois, d’après Agard et Lemoine (2003).

2. La structure géologique de part et d’autre du front pennique (FP)

Au NW du front pennique, pointe le massif cristallin externe de Belledonne encadré par la couverture delphino-helvétique (figure II.3). Le massif de Belledonne, lui-même, est divisé par l’accident médian (AM) en un rameau externe et un rameau interne. A l’Est du front pennique, se succèdent les différentes nappes de la zone briançonnaise s.l. puis le complexe des schistes lustrés.

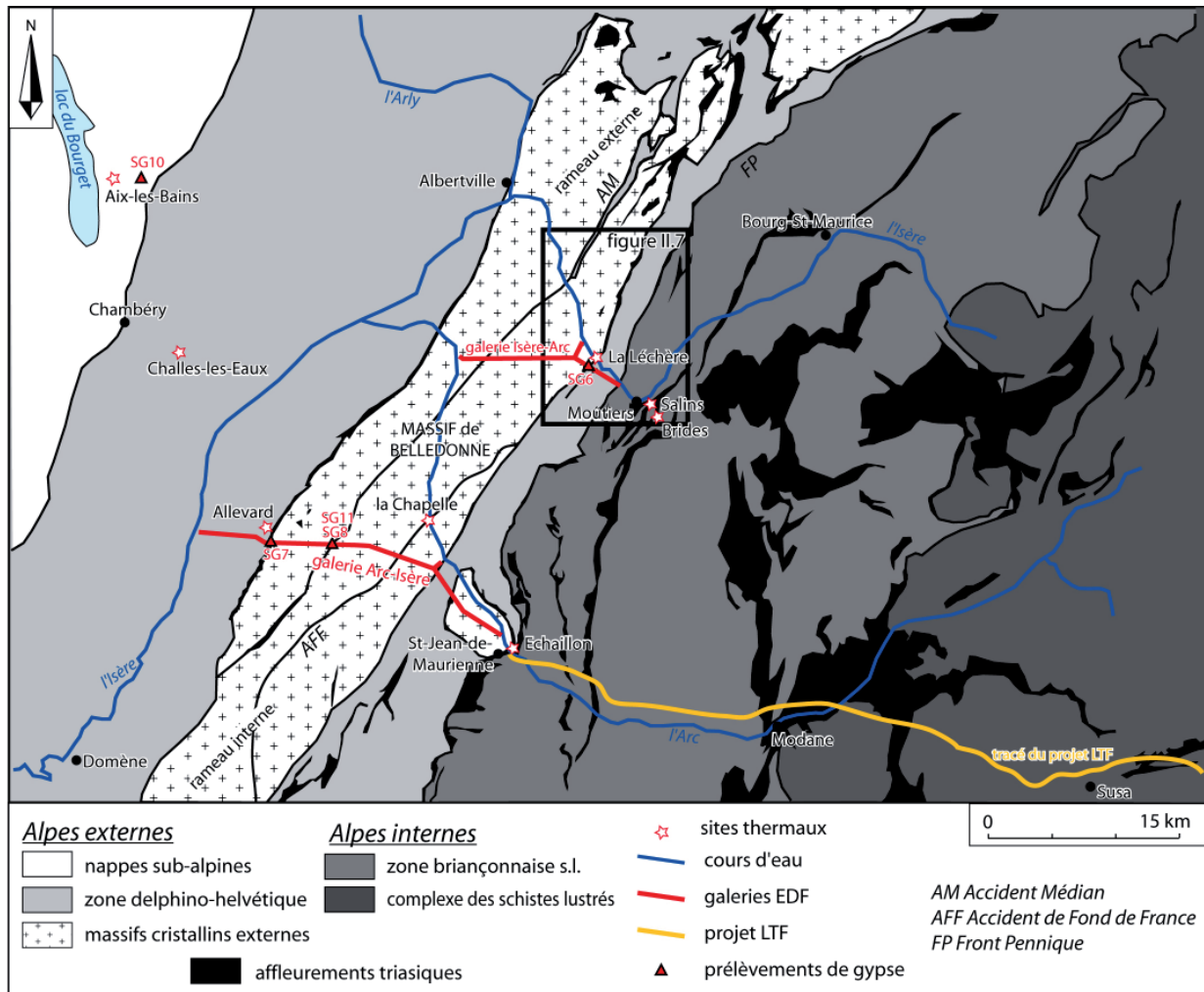


Figure II.3 : Schéma structural de part et d'autre du front pennique (FP), implantation des galeries EDF Isère-Arc et Arc-Isère, du futur tunnel LTF et localisation des échantillons de gypse prélevés pour les analyses isotopiques du soufre

2.1. Les galeries EDF de grande échelle

Deux galeries EDF ont été réalisées sur ce secteur. La galerie Arc-Isère relie St-Jean-de-Maurienne/la Chambre à Pontcharra (dans la vallée du Grésivaudan) et la galerie Isère-Arc relie Notre-Dame-de-Briançon/Aigueblanche à Randens (dans la vallée de la Maurienne). Les deux galeries recoupent d'Est en Ouest la couverture delphino-helvétique, le rameau interne de Belledonne, l'accident médian, le rameau externe (figure II.3). La galerie Arc-Isère traverse en plus le contact entre le rameau externe de Belledonne et la partie occidentale de la couverture delphino-helvétique.

Nous nous baserons uniquement sur la description des faciès décrits dans la galerie Isère-Arc (figure II.4). En effet, la dénomination de "série satinée" pour le rameau interne sera rejetée par les études géologiques réalisées par la suite sur le secteur. Cette galerie est surmontée jusqu'à 1600m de recouvrement au niveau du pas de la Mule où la température du rocher, mesurée à l'avancement, atteint 34,2°C.

La galerie Arc-Isère (figure II.5), située plus au Sud, présente un rameau interne constitué de granite, gneiss, schiste vert et amphibolite. Le recouvrement atteint ici 2000m au niveau du Grand Miceau.

2.2. La future liaison Lyon-Turin

Le futur tunnel Lyon-Turin Ferroviaire (LTF) (figure II.3) traversera la zone briançonnaise s.l., le complexe des schistes lustrés et les massifs cristallins internes d'Ambin et de Dora Maira. La coupe prévisionnelle (figure II.6) reste très générale mais elle montre que le tunnel recoupera de nombreux contacts.

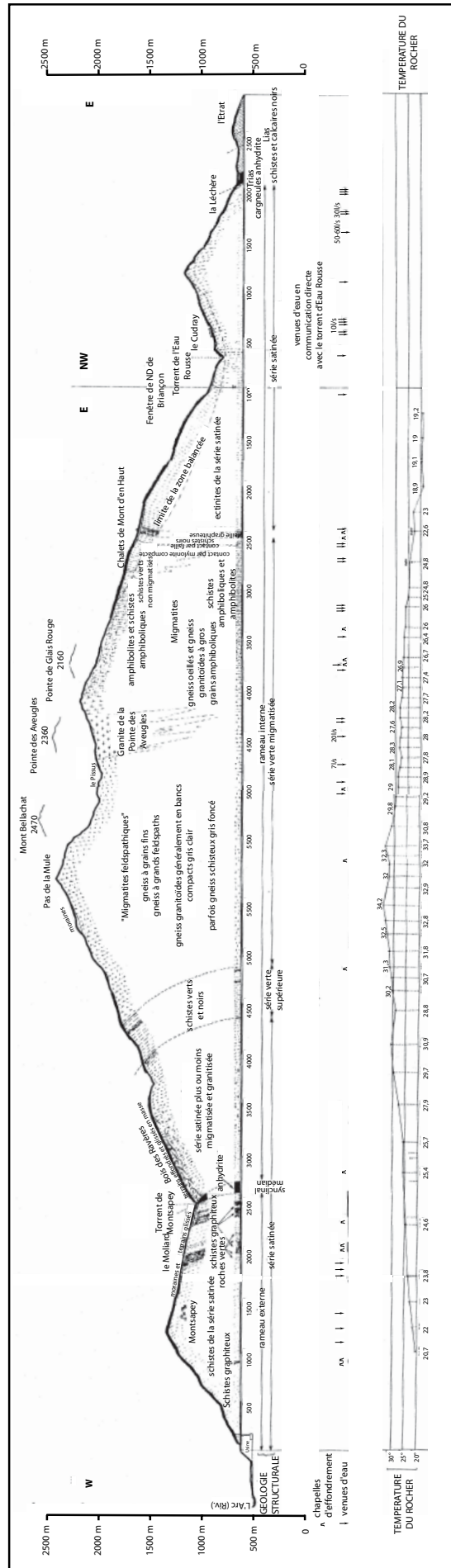


Figure II.4 : Coupe géologique de la galerie Isère-Arc, venues d'eau et température du rocher mesurée à l'avancement (Bordet, 1961)
 NB : la nomenclature pétrographique des roches de Bordet ne correspond pas à celle adoptée dans ce texte, seules les descriptions peuvent être prises en compte

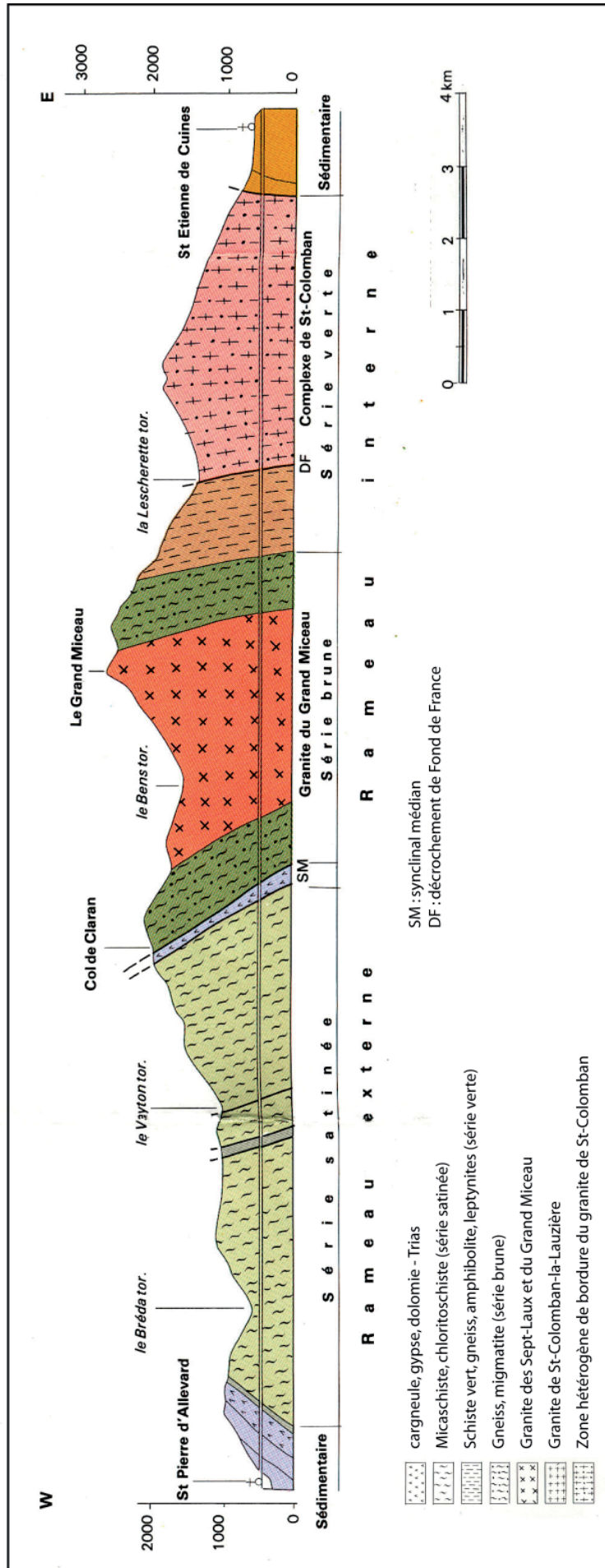


Figure II.5 : Coupe géologique de la galerie Arc-Isère (Barfétty et al., 1984, d'après Gasquet, 1979)

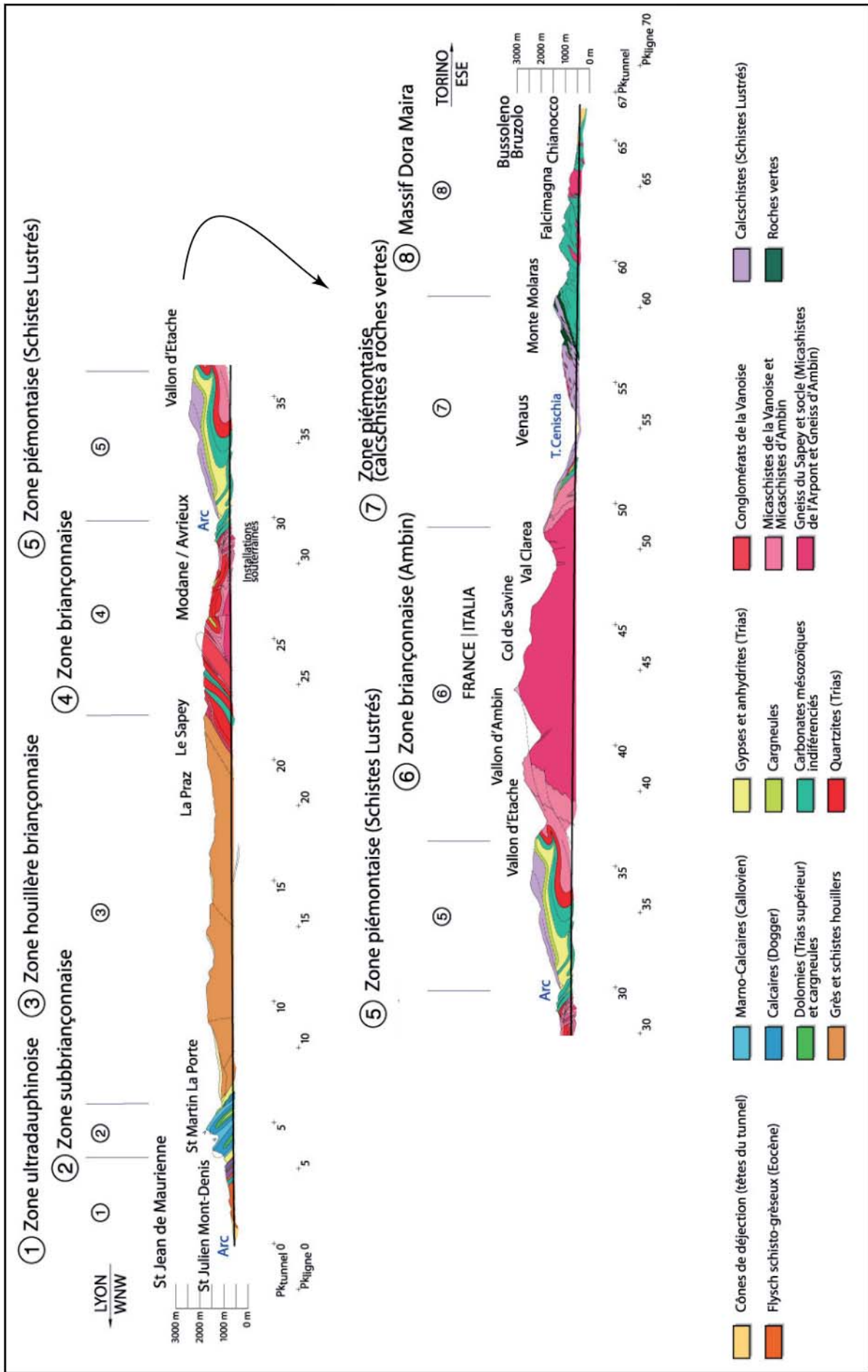


Figure II.6 : Coupe géologique prévisionnelle du projet de tunnel ferroviaire Lyon-Turin (d'après Ménard et Sacchi, 1996)

3. Le secteur étudié

3.1. Le contexte géologique du site de la Léchère

La description du contexte géologique de la Léchère s'appuie sur les quatre cartes géologiques au 1/50 000 du BRGM (Barféty *et al.*, 1984, Debelmas *et al.*, 1989, Antoine *et al.*, 1992, Doudoux *et al.*, 1999) mais aussi sur les travaux de Collart (1973), Eltchaninoff et Triboulet (1980), Poncerry (1981), Rosaz et Curioz (1984), Barféty (1985) et Gély (1989). Le schéma structural synthétique du secteur (figure II.7) peut être résumé ainsi :

- A l'Ouest, affleure largement le massif cristallin externe de Belledonne dont seul le rameau interne intéresse notre étude. Ce dernier est formé, pour l'essentiel, par d'anciennes séries ortho et para-métamorphiques recoupées par des granites dont les âges sont réputés carbonifères (-341 Ma, Debon *et al.*, 1998). Dans cet ensemble, de nombreux contacts sont tectonisés et parfois marqués par des mylonites dont l'âge reste encore discuté (anté-alpin et/ou alpin). De ce fait, les relations de détail entre les diverses entités demeurent encore sujettes à discussion.
- La bordure orientale de ce socle granito-gneissique, fortement redressée par la tectonique alpine, supporte des séries sédimentaires. Le contact entre ces deux ensembles est jalonné par des brèches tectoniques souvent riches en cargneules et évaporites. Ce contact, nommé accident de la Léchère, est un contact tectonique important et polyphasé.
- Les ensembles sédimentaires de la couverture delphino-helvétique sont eux-mêmes fortement redressés, au moins jusqu'aux abords du front pennique.
- A l'Est du front pennique, on trouve les différentes nappes constituant la zone briançonnaise s.l. (ultra-dauphinoise, valaisane, sub-briançonnaise et briançonnaise s.s.). Toutes ces nappes sont séparées par des accidents, comparables à celui de la Léchère.

3.2. Le thermalisme en Tarentaise et Maurienne

La vallée de la Tarentaise est marquée par la présence de deux autres sites thermaux : Salins-les-Thermes et Brides-les-Bains (figure II.3 et II.7) (Siméon, 1980). Le site de Salins-les-Thermes se trouve au sein de la zone valaisane, au niveau d'un contact entre le Trias, gypseux et dolomitique, et les quartzites du Crétacé supérieur. Quant au site de Brides-les-Bains, il se situe dans la zone des gypses qui jalonnent le contact entre zone sub-briançonnaise carbonatée et zone briançonnaise s.s. houillère.

La vallée de la Maurienne comprend deux sites où des sources thermales sont présentes mais non exploitées actuellement : la Chapelle près de St-Rémy-de-Maurienne et l'Echaillon près de St-Jean-de-Maurienne (Cruchet, 1983) (figure II.3). Le site de la Chapelle se trouve au niveau du décrochement de Fond de France (AFF sur la figure II.3) qui affecte le rameau interne de Belledonne. Le site de l'Echaillon se trouve au niveau du front pennique.

Les sources thermales de Savoie (figure II.3) sont toutes localisées aux intersections entre les vallées et les grands accidents tectoniques, comme le synthétise le tableau II.1.

Toutes ces eaux sont marquées par les évaporites triasiques qui jalonnent ces accidents tectoniques et présentent un faciès chloruré sodique et sulfaté (Na-Cl-SO_4) (figure II.8). Les eaux de Challes, Allevard et Aix sont sulfurées. Les eaux de Salins, Brides et Echaillon sont les plus minéralisées et les moins minéralisées sont celles d'Aix et Allevard. Les eaux de la Léchère se distinguent des autres eaux thermales de la Tarentaise et de la Maurienne par des teneurs plus faibles en chlorures.

site thermal	contact tectonique
Aix-les-Bains	zone delphino-helvétique / nappes sub-alpines
Challes-les-Eaux	au sein de la couverture delphino-helvétique
Allevard	rameau externe de Belledonne / zone delphino-helvétique
La Chapelle	accident de Fond de France (AFF)
La Léchère	rameau interne de Belledonne / zone delphino-helvétique
Echaillon	Front Pennique
Salins-les-Thermes	au sein de la zone valaisane
Brides-les-Bains	zone sub-briançonnaise / zone briançonnaise s.s.

Tableau II.1 : Sites thermaux associés aux contacts tectoniques

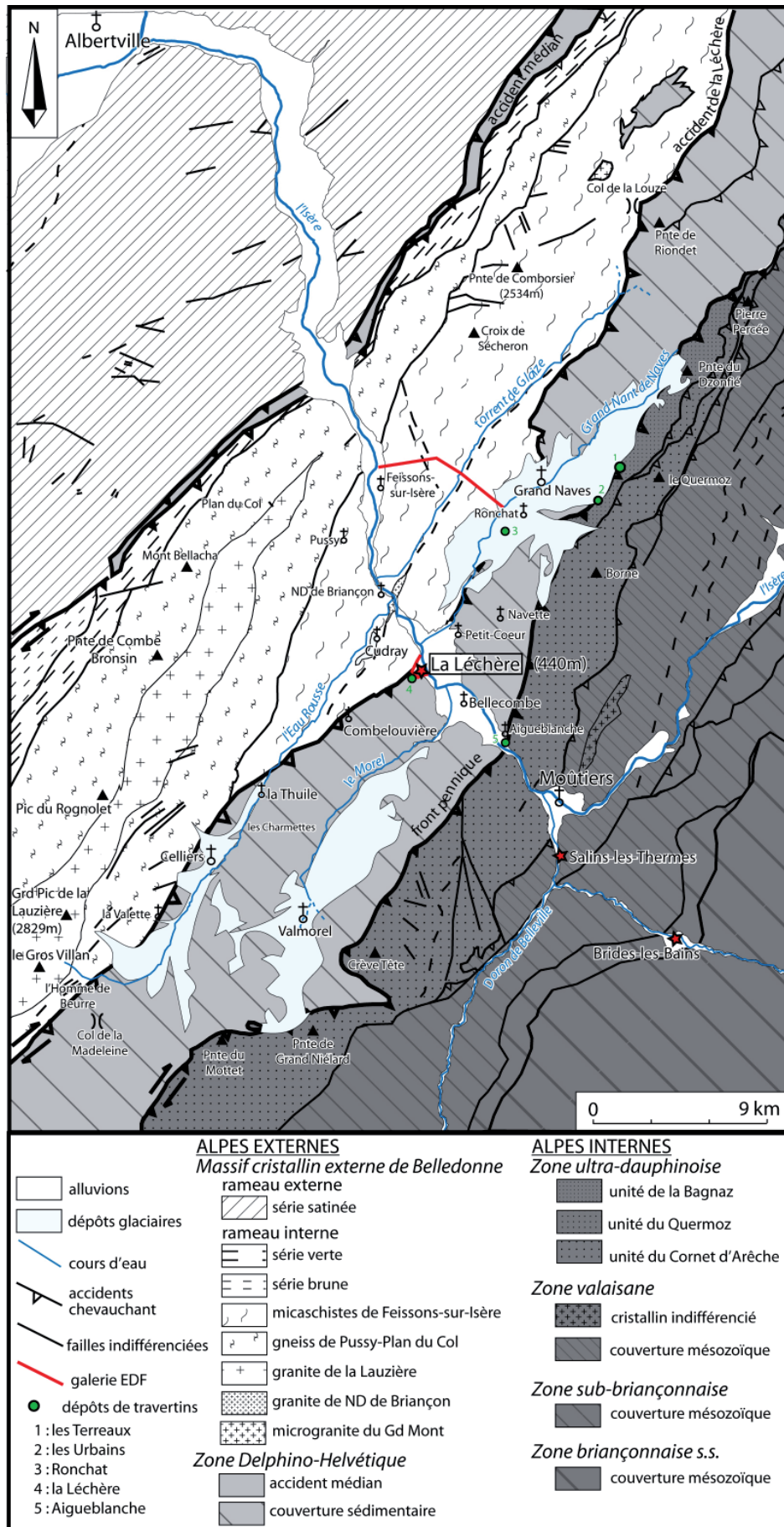


Figure II.7 : Schéma structural du secteur étudié réalisé à partir des cartes géologiques au 1/50 000 du BRGM (Barfèty et al., 1984, Debelmas et al., 1989, Antoine et al., 1992, Doudoux et al., 1999)

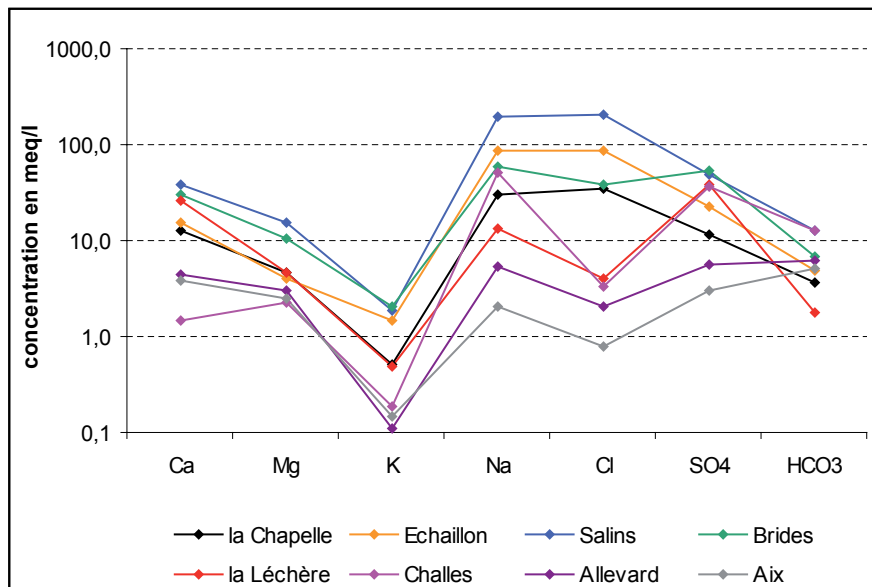


Figure II.8 : Diagramme de Schoeller-Berkalov représentant les faciès des différentes sources thermales de la région (sources : Cruchet, 1983, Blaise et Vigouroux, 2003, Courtois et Vigouroux, 2005a et Curt et Lamotte, 2004)

3.3. Les informations géologiques amenées par les ouvrages de petite échelle

Outre les galeries Arc-Isère et Isère-Arc, d'autres galeries de moins grande importance ont été réalisées sur le secteur de la Léchère. Il s'agit de la galerie de reconnaissance EDF à l'arrière des thermes et de la conduite forcée entre le torrent de Naves, le torrent de Glaize et l'Isère (figure II.7).

3.3.1) La galerie de reconnaissance EDF

Avant la réalisation de la galerie Isère-Arc, une galerie de reconnaissance a été creusée au niveau du contact entre le rameau interne de Belledonne et la couverture delphino-helvétique ; zone jugée délicate du fait de la présence de dépôts triasiques.

Une coupe a alors pu être levée (figure II.9) et les contours géologiques esquissés (figure I.17). La succession suivante a été identifiée du bas vers le haut pour le Trias : cargneules, anhydrite et gypse puis quartzites. De nombreuses venues d'eau sont présentes dans cette galerie, au toit et au mur du contact tectonique de la Léchère, essentiellement dans les micaschistes du socle (60l/s). La zone de contact tectonique elle-même ne présente que des venues d'eau très faibles.

Un conduit karstique, présent dans les gypses (figure I.17), s'enfonce d'environ 5m vers la profondeur puis bifurque horizontalement sur quelques mètres vers le SE. Au moment du creusement, ce conduit était sec (Moret, 1950b). Il s'agit d'un ancien conduit naturel, réactivé artificiellement par les écoulements issus des micaschistes et amenés jusqu'à ce gouffre par la galerie sus-jacente.

3.3.2) La conduite forcée Naves-Glaize-Isère

Lors du creusement de la conduite forcée entre Naves et Glaize, une bande de cargneules a été observée au niveau du torrent de Glaize (figure II.10). Cette observation est le seul indice de la présence d'une faille au sein des Micaschistes de Feissons-sur-Isère (MFI). Aucun autre indice n'a été observé en surface.

4. Conclusion

Le site de la Léchère est marqué par la présence de plusieurs galeries, de grande échelle et de petite échelle, qui permettent d'accéder à des données géologiques profondes. Comme tous les sites thermaux de Savoie, l'eau thermique de la Léchère émerge à l'intersection entre un grand accident tectonique et une vallée. Ce contexte géologique particulier explique la grande hétérogénéité des roches présentes sur le secteur : les roches cristallines du socle, les roches sédimentaires formées du Permien au Jurassique supérieur et les formations quaternaires.

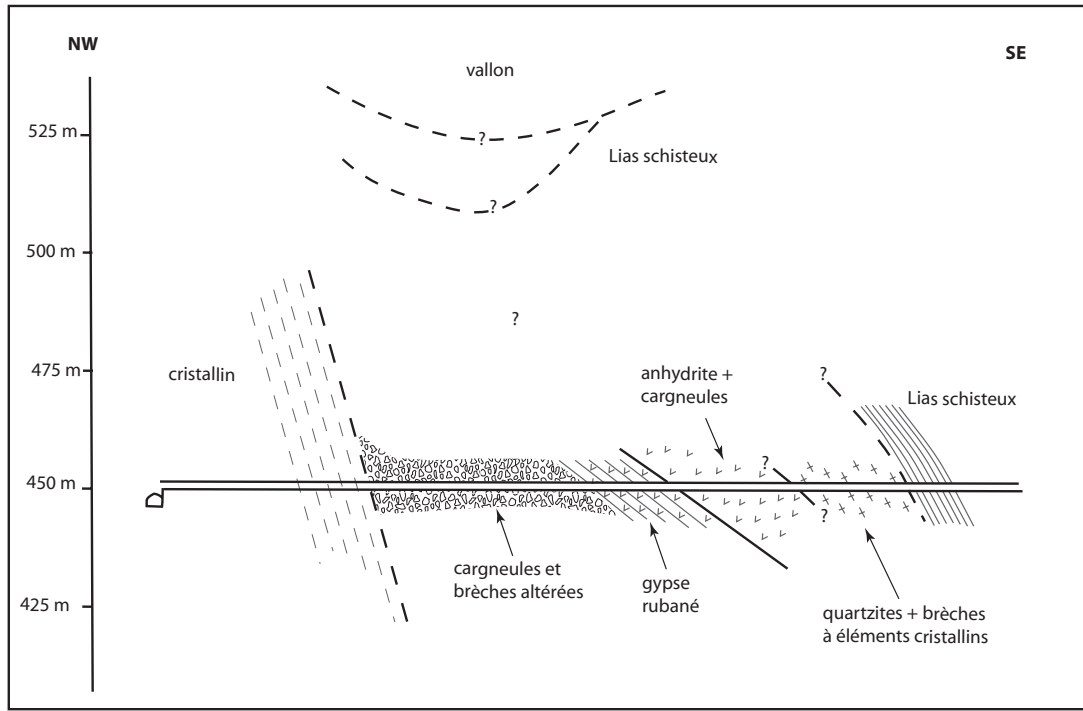


Figure II.9 : Coupe observée dans la galerie de reconnaissance EDF (rapport inédit EDF)

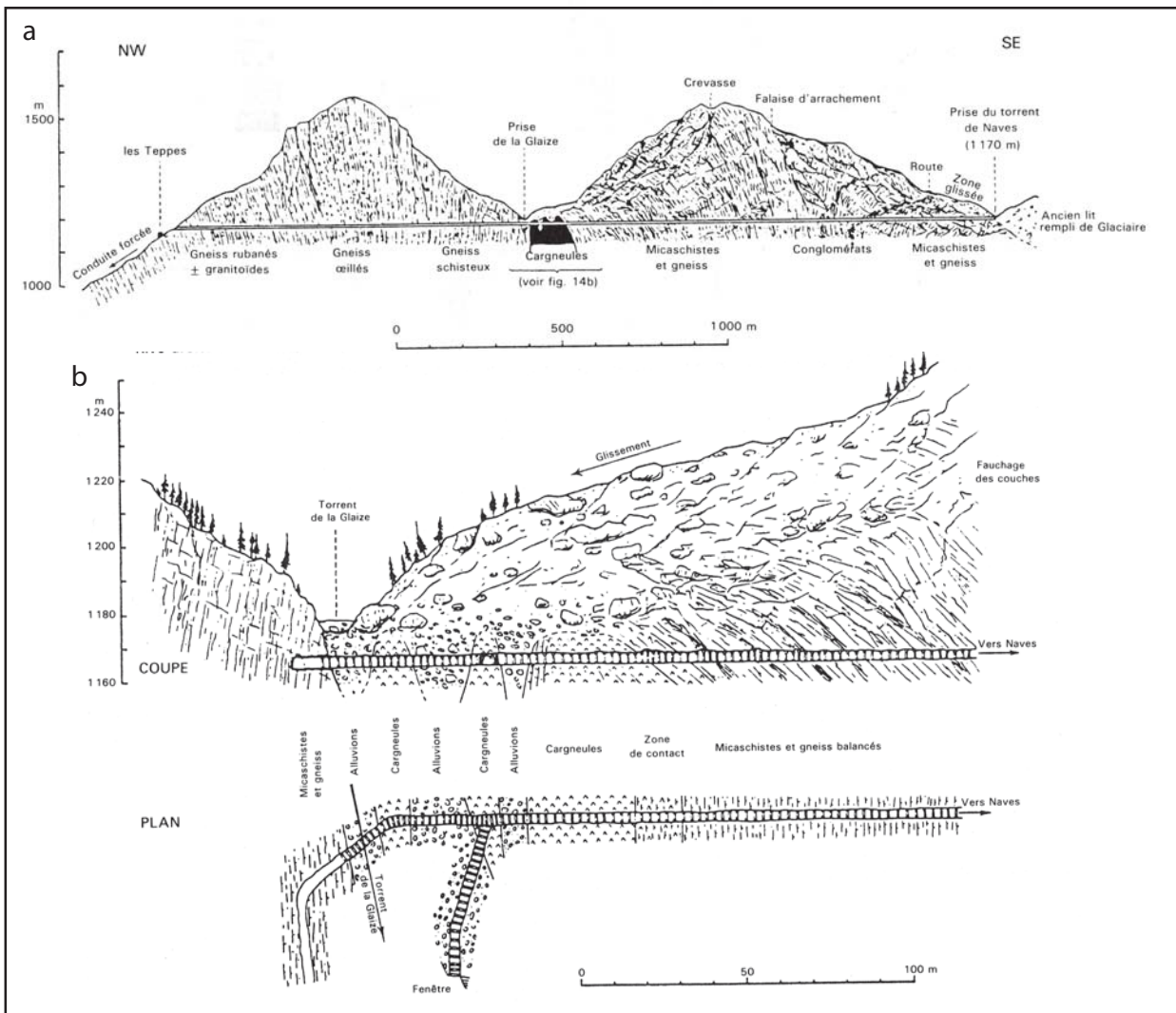


Figure II.10 : a) Coupe géologique de la galerie de Feissons-sur-Isère (Bordet, 1961), b) Détail du fond de la vallée de Glaize (Bordet, 1961)

II. Description des formations géologiques

Les formations géologiques du secteur sont de trois types : les roches cristallines constituant le socle, les roches de la couverture sédimentaire autochtone et allochtone puis les formations quaternaires.

Les roches cristallines ainsi que les formations permo-carbonifères ont été étudiées en lame mince (cf. localisation des échantillons, figure II.11).

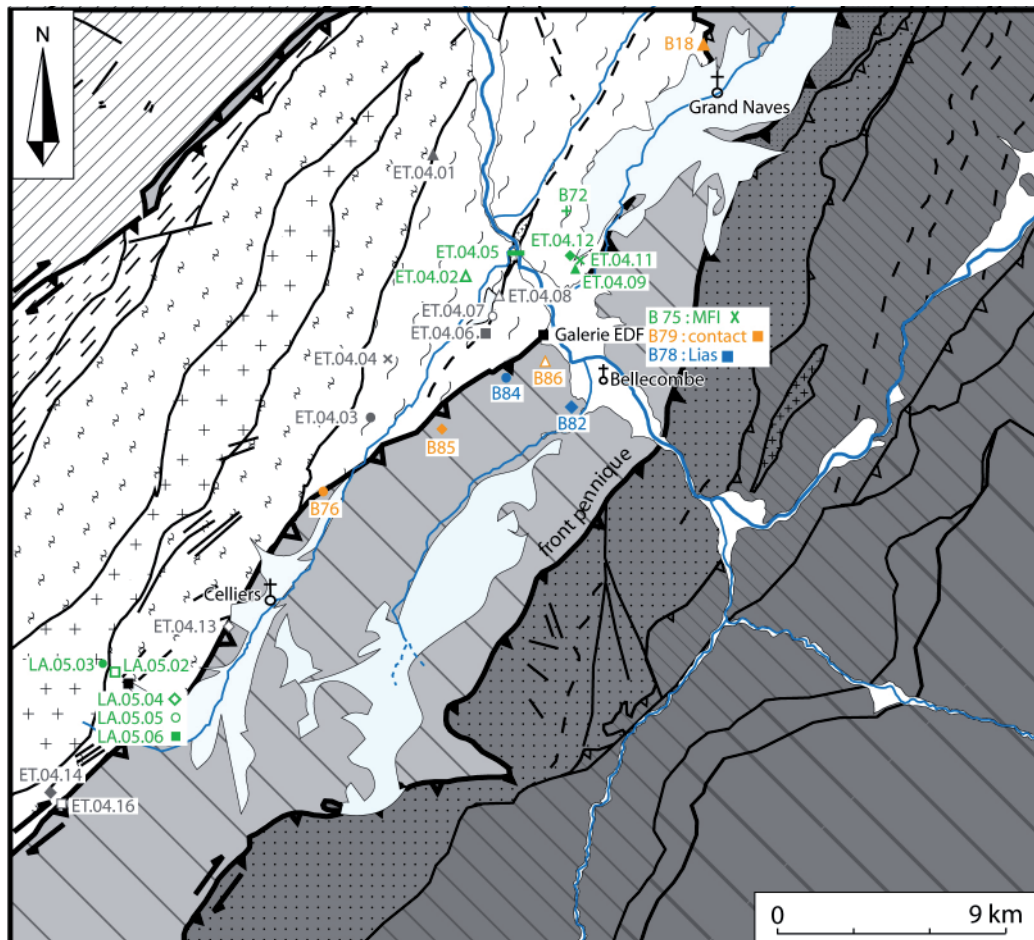


Figure II.11 : Carte de localisation des échantillons de roches prélevées
en vert : les roches cristallines, en gris : les roches permo-carbonifères, en orange : les roches sédimentaires du Trias, en bleu : les roches sédimentaires du Jurassique. (cf. légende en figure II.7)

ET.04.02 : métagranite	ET.04.06 : schiste bitumineux
ET.04.05 : leucogranite de ND de Briançon	ET.04.07 : schiste compact permien
ET.04.09 : granite migmatitique	ET.04.08 : schiste violet permien
ET.04.11 : gneiss granitique	ET.04.13 : schiste à galets
ET.04.12 : amphibolite	ET.04.14 : gneiss perlé
B72 : gneiss granitique	ET.04.16 : conglomérat houiller
B75 : micaschiste de la galerie EDF	B18 : t9Q (Trias terminal) quartzites
LA.05.02 : orthogneiss	B76 : cargneule
LA.05.03 : granite de la Lauzière	B79 : gypse de la galerie EDF
LA.05.04 : chloritoschiste	B85 : dolomie
LA.05.05 : micaschiste	B84 : l1-5 (Hettangien-Carixien) calcaire gris en dalles
LA.05.06 : gneiss	B78 : l6-8 (Domérien-Toarcien) schiste calcaires à pyrites
ET.04.01 : métarhyolite	B82 : l9 (Aalénien) schiste silico-alumineux
ET.04.03 : conglomérat houiller	B86 : travertin de la route de la Forêt
ET.04.04 : niveau psammitique houiller	

1. Les roches cristallines

1.1. Les micaschistes de Feissons-sur-Isère (MFI)

Les MFI sont situés à proximité immédiate des thermes, de part et d'autre de la vallée de l'Isère (figure II.7). Cette formation a été considérée par Bordet (1961) comme l'équivalent interne de la série satinée mais de nombreuses dissimilitudes d'ordre structural, pétrographique et géochimique permettent à Siméon (1979) de rejeter tout lien de parenté entre ces deux formations. Ce dernier décrit alors les MFI comme des micaschistes à muscovite avec ou sans biotite présentant 3 faciès : les micaschistes de couleur grise, les micaschistes quartzeux verdâtres et les micaschistes verdâtres. Sur les cartes géologiques, ils sont d'abord décrits comme des séricitoschistes feldspathiques (la Rochette, 1984 et Moûtiers, 1989) puis comme des gneiss mylonitiques (Bourg-Saint-Maurice, 1992) et enfin sous le terme de micaschistes de Feissons-sur-Isère (Albertville, 1999). Ils sont en contact à l'Ouest avec les gneiss de Pussy-Plan du Col, par l'intermédiaire d'un accident, jalonné de mylonites, qui pince le houiller. De Asençao Guedes (1997) considère les MFI comme des mylonites correspondant à une écaille de socle hercynien avec son tégument mésozoïque et son matériel permo-carbonifère. Ceci permettrait d'expliquer la grande hétérogénéité de cet ensemble. D'autres faciès que les micaschistes à biotite et muscovite ont depuis été reconnus par Ratzov (2004) et Lehmann (2004) : il s'agit d'orthogneiss, d'amphibolite, de leptynite, de mylonite et d'aplite en filon.

La formation des MFI est recoupée par deux types de veines (appelées régionalement fentes alpines), aussi bien à proximité de l'accident de la Léchère qu'au sein même du massif. Les veines subhorizontales présentent des fibres verticales. Les veines subverticales, avec des fibres horizontales, sont disposées en échelons et sont un peu plus tardives que les premières. Les cristallisations de ces veines sont composées essentiellement de quartz et chlorite, mais également d'autres minéraux secondaires dont la proportion et la nature varient en fonction de l'encaissant (tableau II.2). Ces minéralisations ont été formées par des paléo-circulations hydrothermales datées entre -10 et -14 Ma pour les veines horizontales et entre -5 et -6 Ma pour les veines verticales (Bertrand *et al.*, 2006).

De plus, cette formation est marquée par 3 schistosités (Lehmann, 2004 et Ratzov, 2004). Une première schistosité hercynienne est accompagnée par la cristallisation de biotite. Une deuxième schistosité affecte aussi le houiller et elle est accompagnée par la cristallisation de chlorite. Son âge est donc post-carbonifère et par conséquent alpine. Une dernière schistosité alpine de dissolution (schistosité en couloirs) ne présente pas de cristallisation de minéraux (parfois magnétite). La mise en place de celle-ci est contemporaine de la formation des veines horizontales et d'un hydrothermalisme miocène.

Trois faciès ont été observés en lame mince (figure II.12). Le métagranite (ET.04.02), dans lequel on ne distingue aucune foliation, contient de nombreux zircons. Le gneiss granitique (B72) présente un faciès de granite très déformé, marqué par deux schistosités et par la présence de recristallisations de quartz. L'amphibolite (ET.04.12) est constituée majoritairement par des amphiboles altérées en minéraux phylliteux.

1.2. Les granitoïdes, métagranites et gneiss orthodérivés

Au NW, les MFI sont en contact avec les gneiss de Pussy-Plan du Col par l'intermédiaire d'une zone constituée de dépôts carbonifères et de mylonites (figure II.7). Les granites de la Lauzière sont intrusifs dans les gneiss de Pussy. De même, on trouve, barrant la vallée de l'Isère, le petit massif intrusif de Notre Dame de Briançon.

roche encaissante	minéraux	formules
amphibolites	adulaire épidote/clinoizite quartz actinolite-tremolite chlorite calcite pyrrhotite pyrite chalcopryrite	$K[Si_3AlO_8]$ $Fe^{3+}(Fe,Al)_2(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$ SiO_2 $Ca_2(Mg,Fe)_5[Si_8O_{22}](OH,F)_2$ $(Mg, Fe, Al)_3Mg_3[(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2](OH)_6$ $CaCO_3$ $Fe_{1-x}S$ FeS_2 $CuFeS_2$
leucogneiss	adulaire albite calcite allanite anatase rutile brookite illménite quartz chlorite apatite monazite	$K[Si_3AlO_8]$ $Na[Si_3AlO_8]$ $CaCO_3$ $Ca_2Fe^{3+}Al_2(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH) + Ce, Th, Y, etc...$ TiO_2 TiO_2 TiO_2 $FeTiO_3$ SiO_2 $(Mg, Fe, Al)_3Mg_3[(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2](OH)_6$ $Ca_5(PO_4)_3(OH, F, Cl)$ $(Ce, La, Th)PO_4$
granites	anatase rutile brookite illménite titanite épidote quartz chlorite beryl bleu bazzite phenacite meneghinite pyrrhotite pyrite chalcopryrite calcite	TiO_2 TiO_3 TiO_4 $FeTiO_3$ $CaTi[SiO_4](O,OH, F) + Na, Fe$ et Terres Rares $Ca_2Fe^{3+}Al_2(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$ SiO_2 $(Mg, Fe, Al)_3Mg_3[(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2](OH)_6$ $Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$ $Be_3(Sc,Al)_2Si_6O_{18}$ Be_2SiO_4 $Pb_{13}CuSb_7S_{24}$ $Fe_{1-x}S$ FeS_2 $CuFeS_2$ $CaCO_3$
schistes noirs houillers	or	Au
	magnetite	$Fe^{2+}Fe^{3+}_2O_4$
conglomérats houillers	adulaire albite anatase rutile brookite illménite quartz chlorite fluoro-apatite monazite xénotime épidote/clinoizite ferro-axinite pyrrhotite galène pyrite chalcopryrite	$K[Si_3AlO_8]$ $Na[Si_3AlO_8]$ TiO_2 TiO_2 TiO_2 $FeTiO_3$ SiO_2 $(Mg, Fe, Al)_3Mg_3[(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2](OH)_6$ $Ca_5(PO_4)_3(OH, F)$ $(Ce, La, Th)PO_4$ $YPO_4 (Er,Ce,La)$ $Fe^{3+}(Fe,Al)_2(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$ $(Ca, Mn, Fe_2+3Al_2BO_3)[SiO_{12}](OH)$ $Fe_{1-x}S$ PbS FeS_2 $CuFeS_2$

Tableau II.2 : Liste non exhaustive des minéraux secondaires observés dans les fentes alpines en fonction de la nature de l'encaissant (Bertrand et al., 2006)

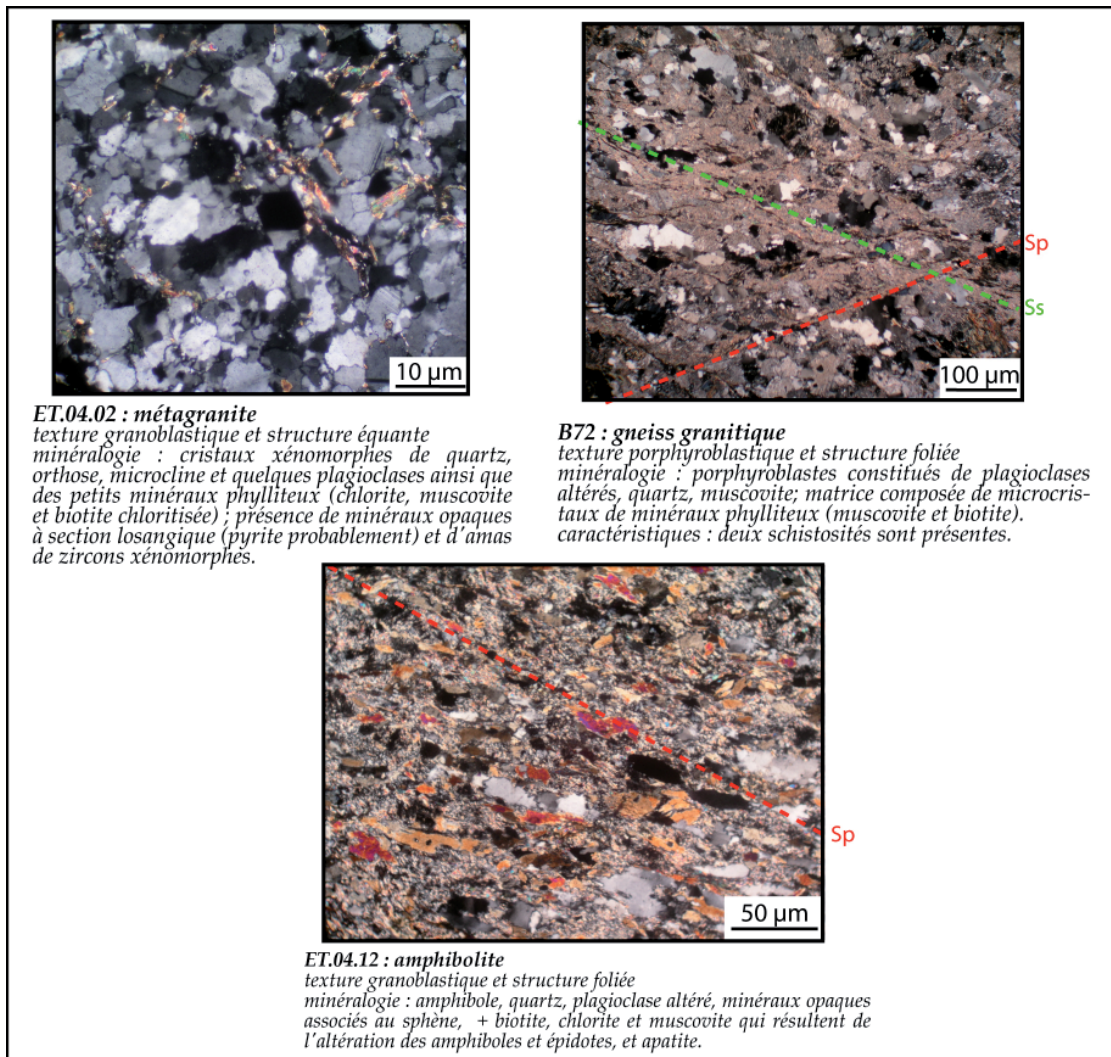


Figure II.12 : Description pétrographique des trois faciès identifiés dans la formation des MFI
 Sp : schistosité principale, Ss : schistosité secondaire

1.2.1) Les métagranites et gneiss de Pussy-Plan du Col

Les métagranites et gneiss de Pussy-Plan du Col encadrent le massif granitique de la Lauzière et ils sont séparés de la série verte et des micaschistes de Feissons-sur-Isère par deux contacts marqués par des mylonites. A l'Ouest du granite de la Lauzière, affleurent des gneiss à mégacristaux de feldspaths (Siméon, 1980), tandis qu'à l'Est, des gneiss amphiboliques sont décrits.

D'un point de vue pétrographique (figure II.13), l'échantillon LA.05.02 est constitué de gneiss plus ou moins altéré présentant deux plans de foliation.

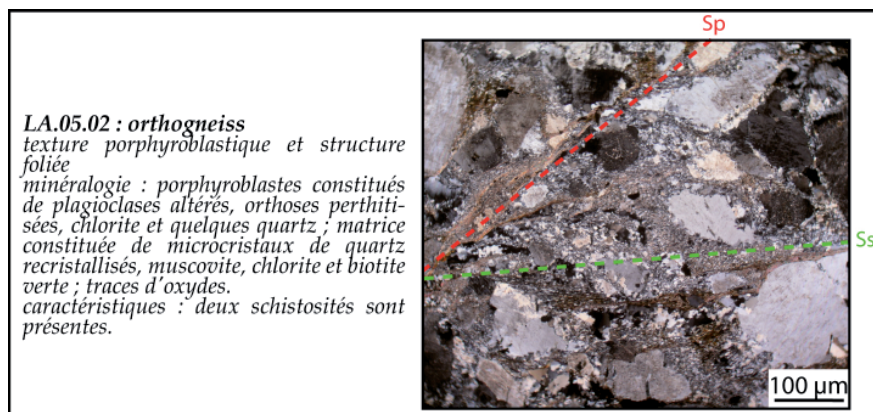


Figure II.13 : Description pétrographique des gneiss de Pussy
 Sp : schistosité principale, Ss : schistosité secondaire

1.2.2) Le granite de la Lauzière

Agé de 341 ± 13 Ma (Debon *et al.*, 1998 et Doudoux *et al.*, 1999), le granite de la Lauzière est intrusif dans les gneiss de Pussy. Il s'agit de monzosyérites dont le faciès varie du Sud au Nord. On observe d'abord des monzogranites à biotite, leucocrates, équants à grain grossier puis des monzosyérites à biotite et amphibole à grain grossier (0,5-1 cm), parfois porphyroïdes et enfin des monzosyérites mésocrates de couleur vert foncé.

1.2.3) Le granite de Notre-Dame de Briançon

Ce petit massif forme un verrou dans la vallée de l'Isère, qui a favorisé le développement de l'ombilic glaciaire d'Aigueblanche. Il s'agit d'un leucogranite à muscovite, intrusif dans les MFI et dont on retrouve des pointements plus au SE le long du torrent de l'Eau Rousse.

D'un point de vue pétrographique (figure II.14), le granite de la Lauzière (LA.05.03) et celui de Notre Dame de Briançon (ET.04.05) présentent les traces d'une légère recristallisation métamorphique. Ils ont donc subi les déformations tardives qui affectent les métagranites et gneiss de Pussy-Plan du Col ainsi que les micaschistes de Feissons.

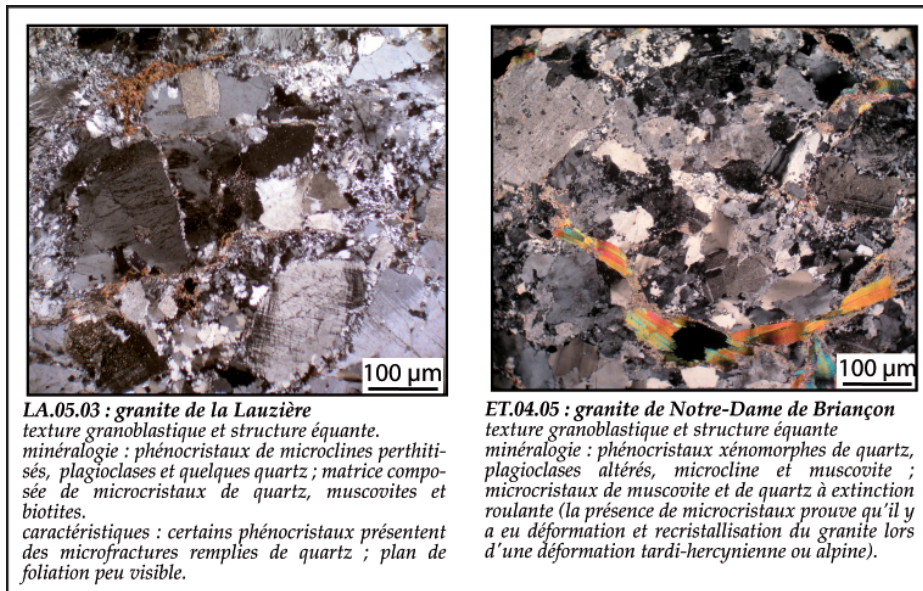


Figure II.14 : Description pétrographique des granites de la Lauzière et de Notre-Dame de Briançon
 Sp : schistosité principale, Ss : schistosité secondaire

2. Les roches sédimentaires du Permo-Carbonifère au Jurassique supérieur

Contrairement à ce que pourrait laisser penser les cartes géologiques du BRGM au 1/50000, les assises sédimentaires adossées au rameau interne de Belledonne ne représentent pas la couverture sédimentaire normale de ce socle cristallin. La cartographie de détail, réalisée tant au Nord du secteur (Eltchaninoff et Triboulet 1980) qu'au Sud dans la région de Saint-Jean-de-Maurienne (Serre, 1983) ainsi que les travaux plus récents de Gély (1989) ont en effet confirmé que la quasi-totalité de cette couverture appartient à un domaine delphino-helvétique interne.

Dans le détail, cette couverture est très mal observable sur le site de La Léchère. On peut toutefois l'analyser en détail soit au col de la Louze (Gély, 1989), soit au col de la Madeleine (Barféty, 1985). Des données complémentaires peuvent aussi être tirées des travaux de cartographie de Rosaz et Curioz (1984).

Les dépôts conglomératiques du Permo-Carbonifère et les quartzites du Trias moyen correspondent à la couverture autochtone déposée, en discordance stratigraphique sur le socle. Les dolomies et évaporites

du Trias supérieur constituent le niveau de décollement de la nappe delphino-helvétique. Les formations jurassiques de celle-ci sont composées d'une succession de calcaires et de schistes (figure II.15).

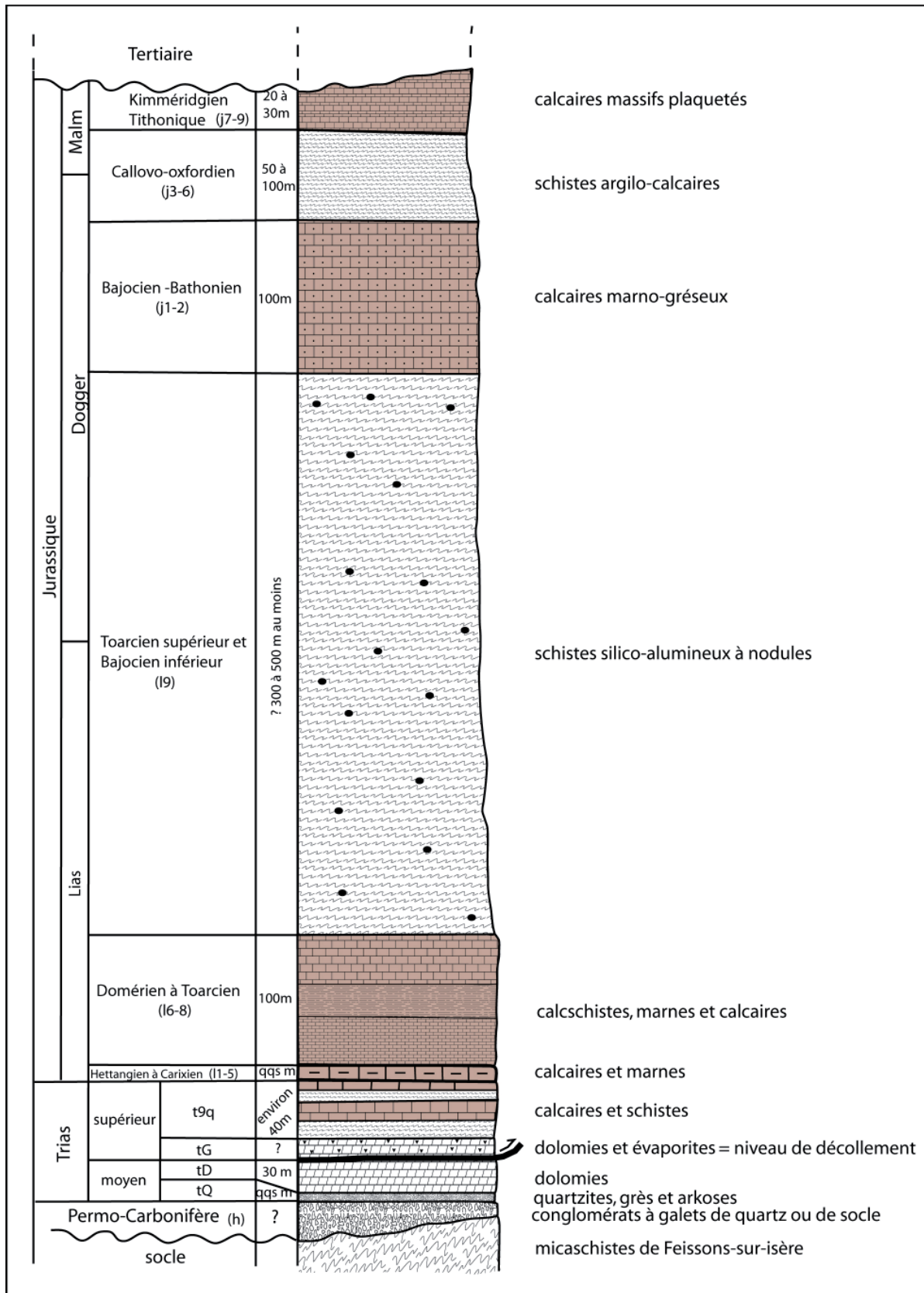


Figure II.15 : Colonne lithostratigraphique de la couverture delphino-helvétique

D'après les notices des cartes géologiques au 1/50 000 du BRGM (Antoine et al., 1992, Barféty et al., 1984, Debelmas et al., 1989 et Doudoux et al., 1999). Les couches compétentes sont soulignées en marron

2.1. La couverture du rameau interne de Belledonne

2.1.1) Le Permo-Carbonifère (de 359 à -251 Ma)

Il est constitué de conglomérats à galets de quartz ou de socle (granite, gneiss), de schistes psammitiques, de grès et de quelques niveaux charbonneux. Ce Permo-Carbonifère peut présenter des faciès plus schisteux (schistosité alpine), portant des figures d'étirement et des traces de léger métamorphisme. Il affleure à trois endroits sur le secteur étudié. Au contact entre les MFI et les gneiss de Pussy, nous les appellerons "les conglomérats du Biollay". On les retrouve également sous forme de "bandes" au sein des MFI de part et d'autre de l'Isère. Enfin, ils sont présents au contact entre les MFI et la couverture delphino-helvétique au niveau de Petit-Cœur.

Du point de vue pétrographique (figure II.16), les échantillons prélevés dans la formation du Biollay sont conglomératiques. L'échantillon ET.04.13 est un conglomérat déformé mais non recristallisé, contenant de la matière organique tandis que l'échantillon ET.04.16 présente des recristallisation (présence de quartz à extinction roulante).

Les "bandes" permo-carbonifères présentent un faciès de schistes à matière organique (ET.04.06) beaucoup plus fins (grains <10 µm) et déformés que les conglomérats décrits précédemment.

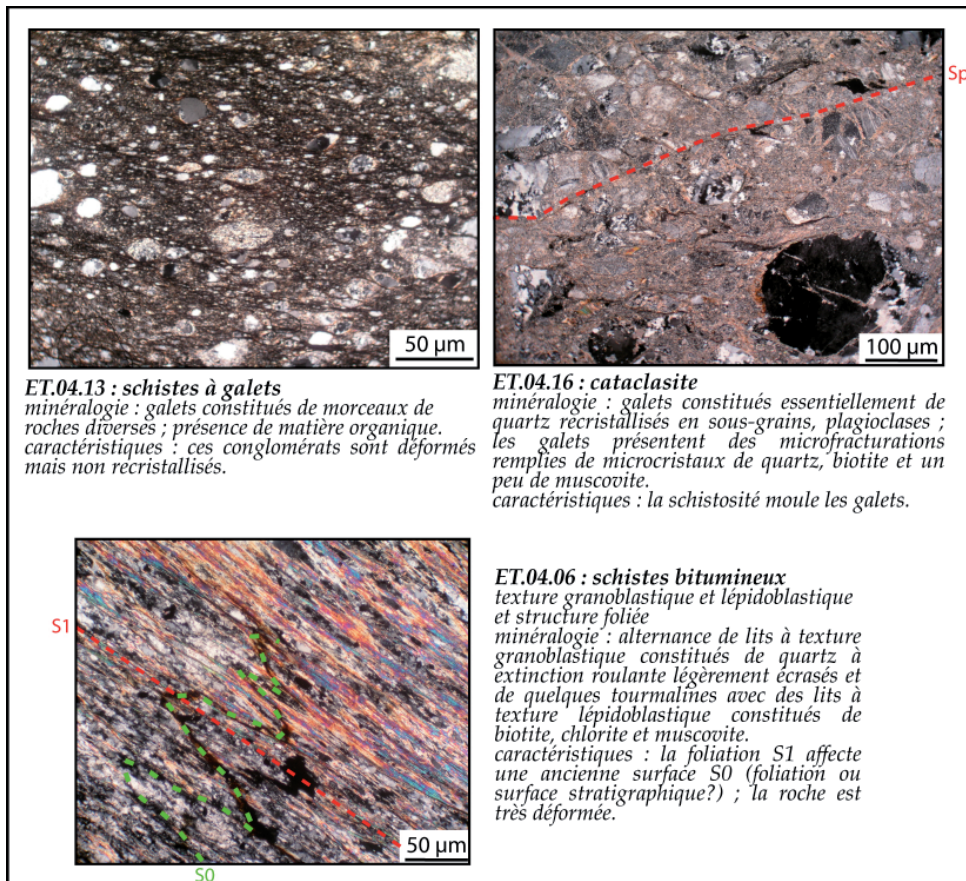


Figure II.16 : Description pétrographique des roches permo-carbonifères

Sp : schistosité principale, Ss : schistosité secondaire

2.1.2) Le Trias moyen (de -245 à -228 Ma)

Le Trias moyen est discordant sur le socle cristallin. Le Trias de la zone dauphinoise est de type germanique et décrit par Gély (1989) de la façon suivante (du bas vers le haut) :

- tQ : quartzites, grès et arkoses de quelques cm à quelques m d'épaisseur.

Cette formation repose en discordance sur le socle cristallin ou sur le Permo-Carbonifère. Les dépôts comportent des chenaux granoclassés avec du bas vers le haut un conglomérat à galets de socle cristallin, puis des grès grossiers ou fins à grains de quartz rose.

- tD : dolomies de 30 m de puissance maximum.

Il s'agit de dolomies beiges, massives, silteuses, en bancs décimétriques avec des passées schisteuses vertes entre les bancs. La partie supérieure de la série est souvent bréchifiée transformée en cargneules au niveau des contacts tectoniques et en surface.

2.2. Les matériaux constituant la nappe delphino-helvétique (figure II.15)

2.2.1) Le Trias supérieur (de -228 à -199 Ma)

- tG : dolomies et évaporites, épaisseur variable.

Les évaporites (gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, anhydrite CaSO_4 et halite NaCl), souvent associées à des argilites dolomitiques, servent de niveau de décollement et se trouvent très souvent au niveau des contacts tectoniques. L'épaisseur des évaporites, participant au décollement, est variable d'un point à un autre.

- t9q : calcaires et schistes d'environ 40m d'épaisseur.

Gély (1989) distingue la succession suivante de bas en haut : d'abord des calcschistes et calcaires spathiques noirs, puis des dolomies micritiques beiges et des schistes dolomitiques noirs et pélites et enfin des calcschistes et calcaires gris noir. Cependant, Antoine *et al.* (1992) indiquent, dans la notice de la carte géologique de Bourg-Saint-Maurice, que l'on trouve, uniquement en quelques points, un banc de quartzite brun ou brun vert de 2-3m d'épaisseur surmontant les dolomies. On peut l'observer au Nord de Naves et sur la route de Combelouvière-la Thuile.

2.2.2) Le Jurassique (de -199 à -145 Ma)

Le Jurassique est constitué essentiellement de calcaires, marnes et schistes. La notice de la carte géologique de Bourg-Saint-Maurice le découpe en 6 sous-étages :

- Hettangien à Carixien (l1-5) : calcaires et marnes de quelques m à plusieurs dizaines de m d'épaisseur.

Ce sont des calcaires fins micritiques gris-bleu, en bancs décimétriques alternant avec de minces passées de calcschistes sombres. Ils semblent affleurer en totalité dans les environs de Celliers et Combelouvière (Gély 1989).

- Domérien-Toarcien (l6-8) : calcschistes, marnes et calcaires dont l'épaisseur totale pourrait être de 100m (épaisseur difficile à estimer en raison des plissements).

Sur la carte de Bourg-Saint-Maurice, le Domérien-Toarcien n'est visible qu'en quelques affleurements de marnes calcaires noires (Naves, col du Pré). Sur la carte de la Rochette, il est constitué par des calcschistes bruns légèrement détritiques puis d'une alternance de bancs calcaires et de schistes.

- Toarcien supérieur-Bajocien inférieur (l9) : schistes silico-alumineux à nodules, d'épaisseur inconnue (300 à 500 m au moins).

Il s'agit de schistes argileux et siliceux noirs ou brunâtres se débitant en plaques mordorées caractéristiques. C'est une formation imperméable, très compacte, recoupée par des filonnets de quartz. Elle est affectée par de nombreux redoublements isoclinaux dont les charnières de plis ne sont pas visibles à l'affleurement.

- Bajocien-Bathonien (j1-2) : calcaires marno-gréseux d'environ 100m d'épaisseur.

Cette formation est constituée d'une alternance de bancs décimétriques de calcaires gréseux gris ou bruns, à l'aspect finement zoné, contenant des quartzs, feldspaths et entroques.

- Callovo-Oxfordien (j3-6) : schistes argilo-calcaires noirs de 50 à 100m d'épaisseur.

Ils peuvent être facilement confondus avec les schistes du Toarcien supérieur-Bajocien inférieur. Ce sont des calcschistes gris à nodules calcaires.

- Kimméridgien-Tithonique (j7-9) : calcaires massifs plaquetés de 20 à 30m d'épaisseur.

Ce sont des calcaires massifs, finement lités et à patine bleutée. Ils constituent des barres calcaires, redoublées dans les charnières de plis synclinaux, pouvant atteindre 100m d'épaisseur.

3. Les formations quaternaires

Le secteur étudié est caractérisé par un recouvrement important du substratum par les dépôts quaternaires (figure II.7). Tout d'abord, on trouve les dépôts liés à la présence de glaciers durant la dernière glaciation du Würm (de -80 000 à -10 000 ans BP). Mais on observe également des alluvions récentes, des dépôts de versant (écroulement, glissement, éboulis, colluvions et cônes de déjection) et enfin des travertins.

3.1. Les dépôts liés aux glaciers

Au niveau du site thermal de la Léchère, la vallée de l'Isère présente une morphologie typique d'ancienne vallée glaciaire avec une vallée en auge et une succession d'ombilic et de verrou (figure II.17, 1). Parmi les dépôts liés aux glaciers, on distingue classiquement : les dépôts glaciaires, pro-glaciaires et périglaciaires (Nicoud et Parriaux, 1993 et Campy et Macaire, 2003).

Les dépôts glaciaires correspondent aux accumulations de blocs arrachés et transportés par le glacier ou éboulés sur lui. On observe principalement (i) les moraines de fond en dessous du glacier, (ii) les moraines frontales marquant une phase de retrait du glacier et (iii) les moraines latérales déposées en bord de vallée glaciaire (figure II.17, 1 et 2).

Les dépôts pro-glaciaires se forment à l'aval des glaciers. On distingue parmi eux les dépôts glacio-lacustres et les dépôts fluvio-glaciaires. Pendant la phase de retrait du glacier, des lacs peuvent se développer entre le front du glacier et un obstacle situé en aval tel qu'un verrou ou une ancienne moraine frontale par exemple. Des dépôts glacio-lacustres se forment alors. Ils sont constitués de dépôts deltaïques (foreset beds) puis de dépôts de plus en plus fins (bottom set beds) au fur à mesure que l'on s'éloigne de la zone d'apport (figure II.17, 2). Lorsque le lac est comblé, des dépôts fluvio-glaciaires vont se mettre en place. Ils sont constitués de dépôts alluvionnaires déposés par les cours d'eau issus du glacier (figure II.17, 3).

Le retrait du glacier est accompagné de dépôts périglaciaires, synchrones ou postérieurs aux dépôts fluvio-glaciaires. La présence du glacier pendant une longue période va soumettre le substratum à des phénomènes de gélifraction. Lorsque le glacier n'est plus présent dans la vallée, les versants, ainsi déstabilisés, vont être affectés par des phénomènes gravitaires tels que les écroulements, les éboulis ou encore la formation de cônes de déjection. Ces dépôts s'imbriquent alors de manière complexe dans les dépôts de fond de vallée (figure II.17, 4).

Le site de la Léchère présente une morphologie de ce type. En effet, le granite de ND de Briançon constitue un verrou à l'amont duquel se développe l'ombilic d'Aigueblanche. Des cônes de déjection ont été formés par les différents affluents de l'Isère (le Morel, le Nant Noir, le Grand Nant de Naves et le ruisseau de Villargerel). En prenant cette fois en compte la dynamique de remplissage des ombilics glaciaires, les données de forages présents dans la zone d'émergence thermique seront réinterprétées.

De plus, les vallées de l'Eau Rousse et du Grand de Naves sont en partie recouvertes par des formations glaciaires déposées par des glaciers secondaires, affluents du glacier principal de la vallée de l'Isère. Les dépôts glaciaires de la vallée de l'Eau Rousse ne sont pas ou peu observables de manière directe, seule la géomorphologie permet d'attribuer les zones de Celliers ou des Charmettes à des dépôts glaciaires. De plus la présence de blocs erratiques constitués de brèches au Nord du Cudray et à Combelouvière (planche hors-texte n°1) confirme cette observation. L'analyse des photographies aériennes ne permettant pas de tracer les contours de ces dépôts, il a été choisi de ne pas les représenter sur la carte géologique (planche hors-texte n°1). En rive droite de l'Isère, les secteurs de Grand Naves et du Sud du Roc Marchand laissent affleurer des dépôts morainiques déstructurés ((planche hors-texte n°1). Sur ce versant, les contours de ces dépôts ont pu être esquissés grâce aux photographies aériennes. D'après Antoine *et al.* (1992) la vallée du Grand Nant de Naves est recouverte de dépôts glacio-lacustres au niveau de Ronchat et Grand Naves mais ces dépôts n'ont pas été observés sur le terrain.

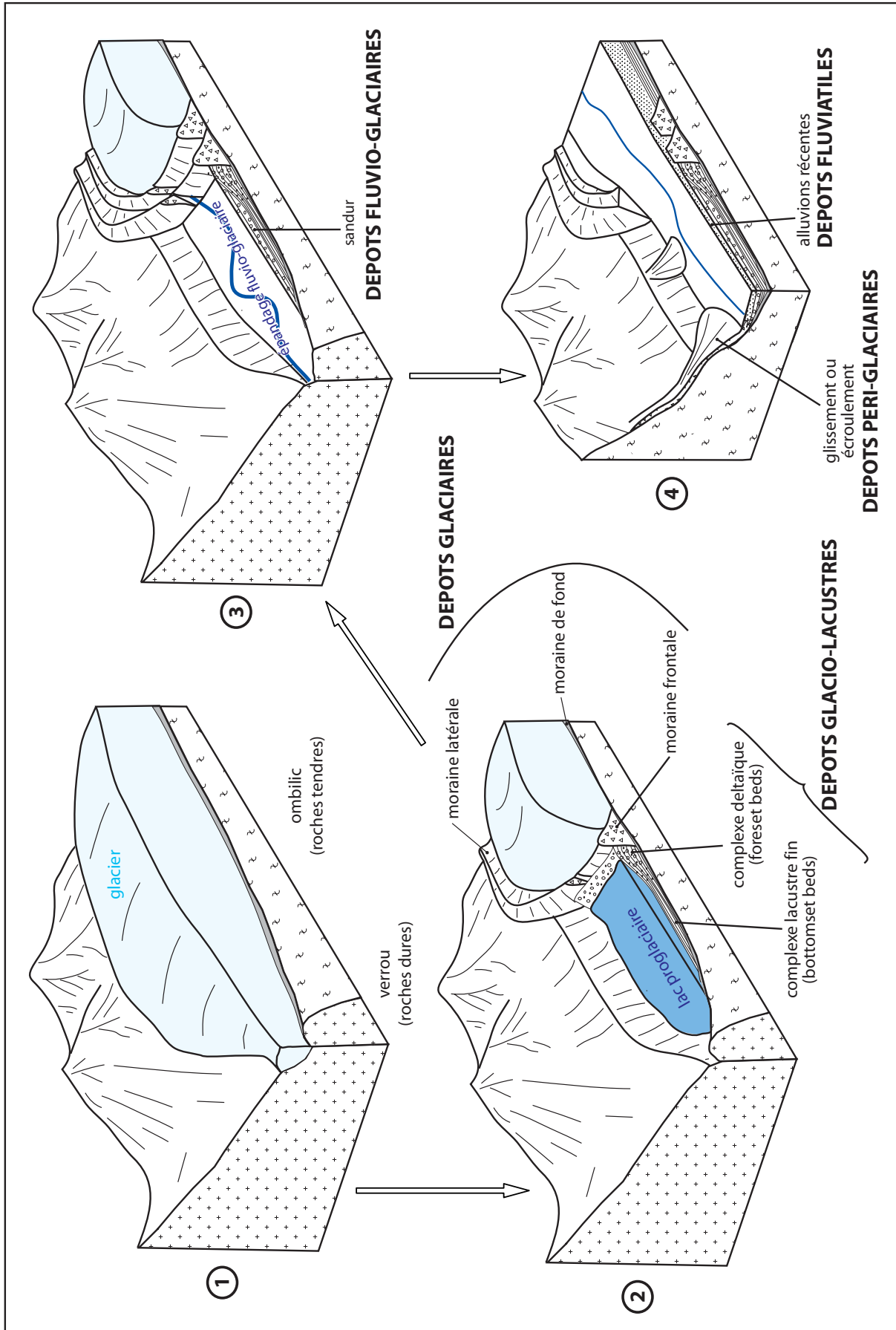


Figure II.17 : Mise en place des dépôts glaciaires, proglaciaires et périglaciaires (d'après Nicoud, inédit et Campy et Macaire, 2003)

3.2. Les autres dépôts superficiels

Les glaciers ne sont pas les seuls responsables de la mise en place de dépôts superficiels. En effet, les circulations d'eau, superficielle ou profonde, mènent à la formation d'alluvions récentes, de dépôts gravitaires ou encore de dépôts encroûtant.

3.3.1) Les alluvions récentes

Pour tous les cours d'eau du secteur, les alluvions récentes sont constituées uniquement de blocs (de 50 cm à 2 m de diamètre environ) à l'amont et d'un mélange de blocs, graviers et sables au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'aval.

3.2.2) Les dépôts gravitaires

Les circulations d'eau associées à l'effet de la gravité sont responsables de la formation de glissements. Les plus importants sont ceux du versant de Doucy et de la route entre Combelouvière et la Thuile (figures II.18 et II.19). La déstabilisation du versant de Doucy a été formée par le glissement des calcaires bathoniens sur les schistes silico-alumineux toarciens érodés par le ruisseau du Morel (figure II.18). Le réaménagement du Morel par un système de seuils a permis de stopper l'affouillement du cours d'eau et l'instabilité du versant.

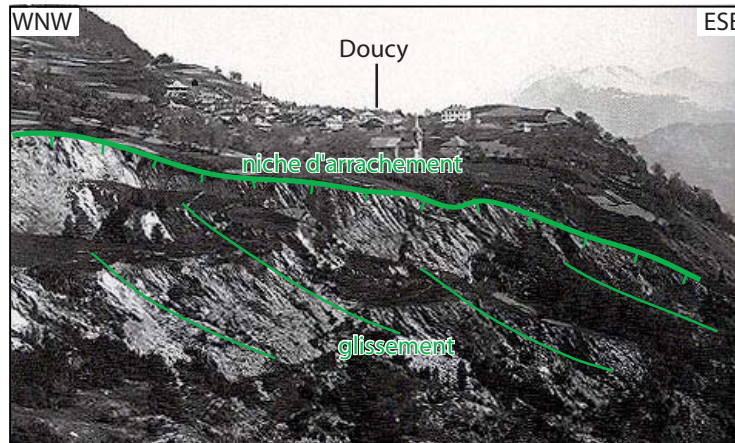


Figure II.18 : Photographie du versant de Doucy en 1901 (Jeudy, 2006, modifié)

Le versant de la route entre Combelouvière et la Thuile présente des instabilités (chutes de rochers) depuis 1985 (BRGM, 1985). En 1997, l'ensemble du versant glisse (environ 100 000 m³ au total) et emporte la route (figure II.19). D'après Barféty (2000), ce glissement aurait pu être déclenché par des circulations d'eau dans les contacts triasiques présents dans le secteur.



Figure II.19 : Glissement de la route de Combelouvière à la Thuile

Les cônes d'éboulis sont également très présents dans le secteur et seuls les plus importants ont été levés sur la carte géologique (planche hors-texte n°1). La rive gauche du torrent de Glaize ainsi que l'arrière des thermes de la Léchère présentent des dépôts importants de colluvions constituées de blocs anguleux de petite taille. Pour finir, des phénomènes importants de fauchage sont présents le long des vallées (Eau Rousse, Grand Nant de Naves et torrent de Glaize) et rendent difficile l'interprétation des structures observées dans ces secteurs.

3.3.3) Les dépôts encroûtant : les travertins

Des dépôts de travertins sont présents en plusieurs endroits sur le secteur étudié (figure II.7, points verts). Ils sont localisés le long des grands accidents ; l'accident de la Léchère pour les travertins de Ronchat et la Léchère et le front pennique pour les travertins des Terreaux, des Urbains et d'Aigueblanche. On les trouve aussi bien à l'intersection entre ces contacts tectoniques et la vallée de l'Isère qu'à une altitude plus haute (entre 1150 et 1700m). Les dépôts situés en altitude sont moins importants mais ils sont actifs. Les dépôts d'Aigueblanche, quant à eux, présentent des épaisseurs supérieures à 2m et les dépôts ne sont plus actifs. Pour cette thèse, nos observations se sont centrées sur les dépôts de la Léchère. On trouve des travertins actuellement inactifs juste à l'arrière des thermes et des dépôts actifs plus haut, sur la route de la Forêt (planche hors-texte n°1). Il s'agit de travertins déposés par une source perchée (figure II.20). Ils présentent des faciès de dépôts en cascade (annexe 3) (Pentecost, 1995 et Ford et Pedley, 1996). Les travertins sont présents indifféremment sur les schistes sédimentaires, les micaschistes et les colluvions.

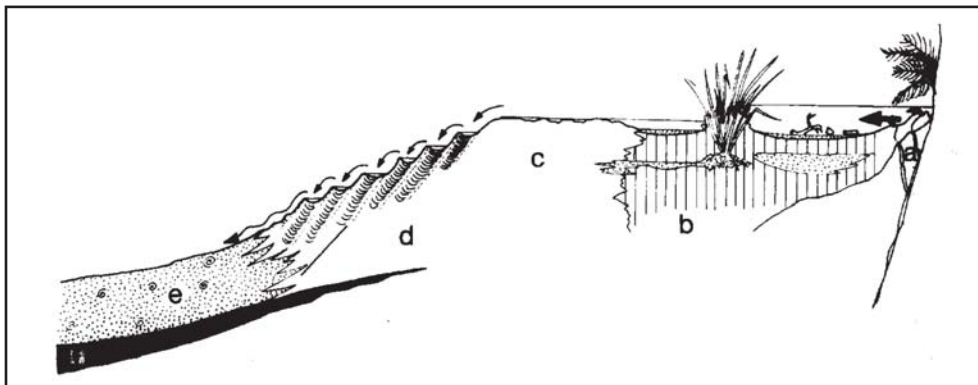


Figure II.20 : Modèle simplifié de tuff déposé par une source perchée et développant un environnement marécageux (b) à proximité du point de résurgence (a) (in Ford et Pedley, 1996, modifié de Pedley, 1990)

Un épais dépôt lobé (framestone), en partie construit par les terrassettes (c), forme la majorité du dépôt. Les dépôts distaux sont dominés par des tuffs microdétritiques (e) et des paléosols (f). Etabli à partir de l'exemple des dépôts situés près de Cozo Marotta, SE de la Sicile

Des circulations d'eau ont pu être observées au sein des travertins : soit dans des cavités de 1 m de diamètre (figure II.21, c), soit de manière diffuse à la surface et au sein des travertins. L'épaisseur des travertins est difficile à estimer car il s'agit de dépôts en cascade sur un versant de 100 m de dénivelé ; cependant certaines coupes ont montré une épaisseur d'au moins 2 m (figure II.21, a).

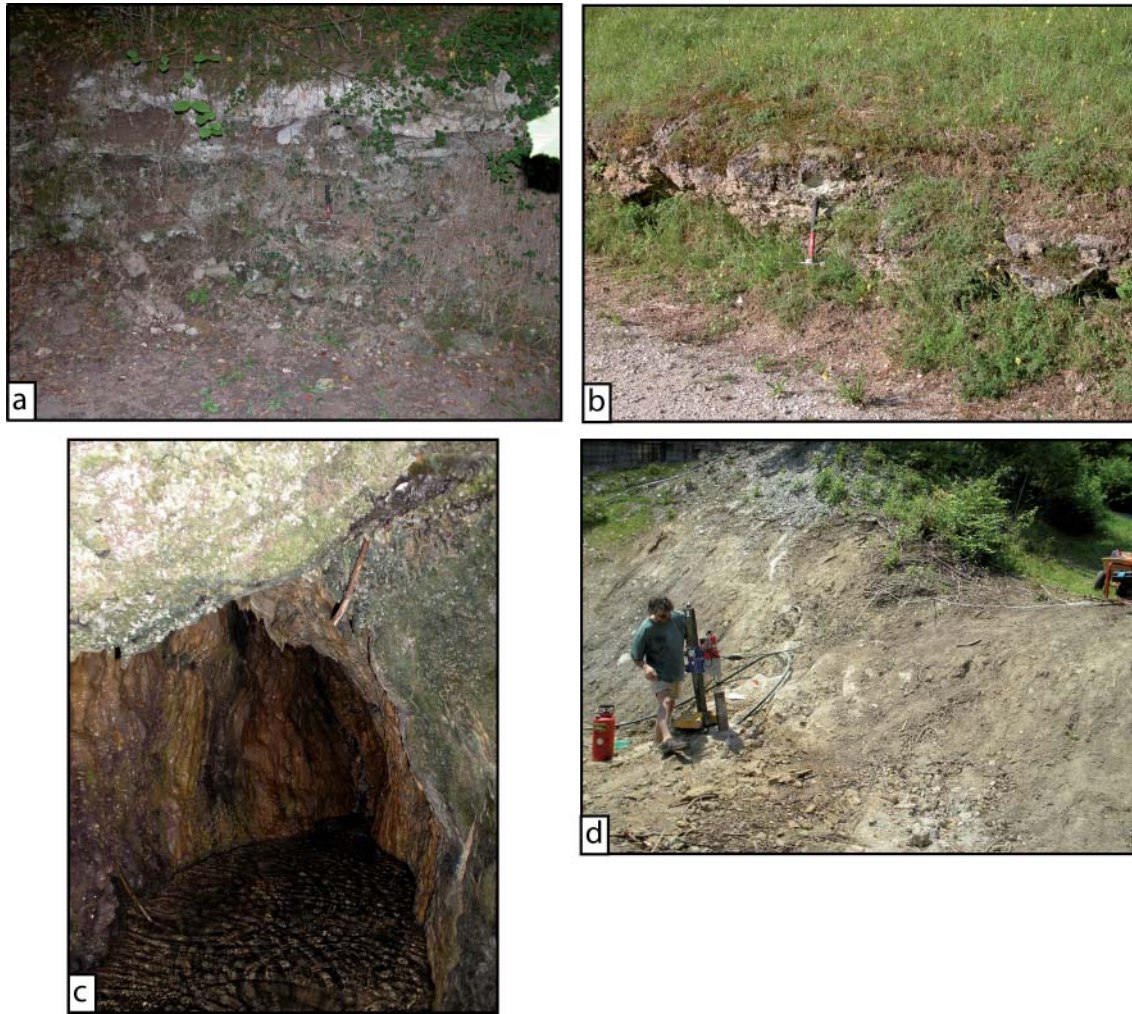


Figure II.21 : Les travertins situés à l'arrière des thermes de la Léchère et au niveau de la Route de la Forêt.

a) et b) affleurements en contre-haut des thermes, c) cavité d'environ 1m de large observée dans les travertins de la route de la Forêt, d) forage réalisé dans une zone de terrassement de la route de la Forêt

4. Conclusion

Le secteur de la Léchère est marqué par une forte diversité géologique. En effet, le socle cristallin et son tégument permo-carbonifère sont en contact tectonique, jalonné de dépôts triasiques évaporitiques, avec la couverture delphino-helvétique essentiellement carbonatée. Les dépôts quaternaires recouvrent l'ensemble. Le socle est constitué par des granites, gneiss et micaschistes, et son tégument permo-carbonifère par des conglomérats et grès contenant par endroits de la matière organique. Les dépôts triasiques, ayant servi de niveau de décollement, sont constitués de dolomies, cargneules, gypses et anhydrites. La couverture delphino-helvétique présente une alternance de calcaires et de schistes. Les dépôts quaternaires regroupent, sur le secteur, des dépôts liés à la présence de glaciers (dépôts glaciaires, pro-glaciaires et périglaciaires), des dépôts gravitaires mais aussi des travertins.

III. Les apports de la carte géologique réalisée

Le travail de cartographie géologique va permettre d'évaluer la géométrie structurale du secteur. Nous nous intéresserons plus particulièrement à la zone de contact tectonique entre le socle métamorphique et la couverture sédimentaire dauphinoise, formant le substratum des bassins versants de l'Eau Rousse et du Grand Nant de Naves. Les levés de terrain ont été complétés par l'étude des photographies aériennes qui a permis essentiellement de tracer les contours des formations superficielles (cônes de déjection, éboulis, dépôts glaciaires). Une carte géologique interprétative (planche hors-texte n°1) a été construite à partir des données de surface disponibles.

Dans un premier temps, les observations réalisées sur le socle puis sur les formations permocarbonifères seront présentées. Puis, l'ensemble de la couverture sédimentaire sera décrit sur tout le secteur étudié. Enfin, nous nous intéresserons aux contacts entre le socle et la couverture sédimentaire, depuis les zones encadrant le site d'émergence en s'éloignant progressivement jusqu'à l'Homme de Beurre au SW et jusqu'au lac de Roselend au NE (planche hors-texte n°1).

1. Le socle

Dans la partie aval de la vallée de l'Eau Rousse, les MFI affleurent sous la forme d'une alternance de micaschistes et de leptynites. On observe des suintements ainsi qu'une cristallisation de gypse en choux-fleurs (CaSO_4) et des dépôts d'oxydes de fer (Fe_2O_3) et d'hydroxydes de fer (FeOH_2) au niveau des bandes de micaschistes (figure II.22). Ces minéralisations proviennent probablement de l'oxydation de la pyrite (FeS_2) présente dans les veines alpines ou de la sidérite (FeCO_3) et de l'ankérite [$\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg},\text{Mn})(\text{CO}_3)_2$] qui restent tout de même plus rares (Negga, 1984). Il semble donc que des circulations ont lieu préférentiellement dans le faciès des micaschistes et que les veines alpines jouent un rôle dans le transfert des éléments chimiques.

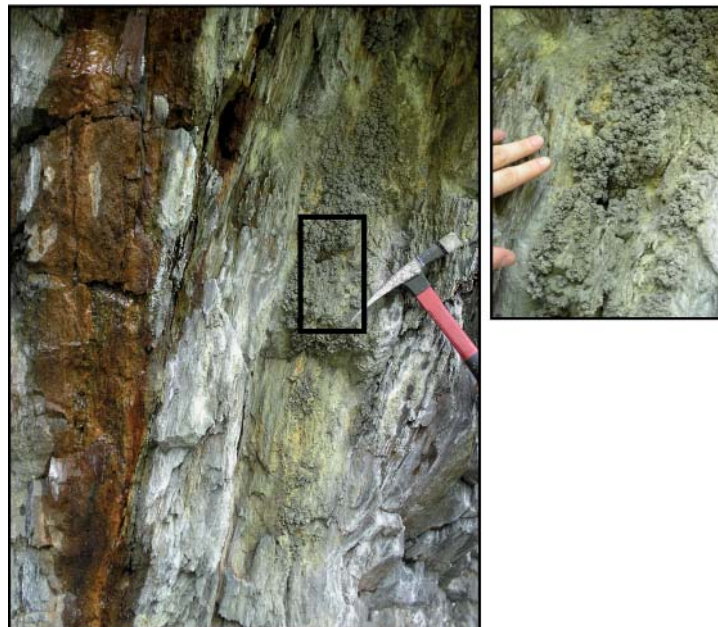


Figure II.22 : Cristallisation de gypse en choux-fleurs et d'oxydes de fer dans le faciès des micaschistes de la formation des MFI

L'intrusion du granite de ND de Briançon dans le protolithe mylonitisé des MFI est accompagnée de nombreuses injections de pegmatites. Les nombreux plans striés observés dans ce granite peuvent s'expliquer par le fait que ce matériel a été plus affecté par la déformation cassante que les MFI en raison de sa texture à gros grains et de ses propriétés mécaniques particulières.

2. Le Permo-Carbonifère

2.1. Les conglomérats du Biollay

Sur la carte géologique de la Rochette (Barféty, *et al.*, 1984), au NW de la vallée de l'Eau Rousse, est dessinée une fine bande de houiller et la présence de conglomérats dans les MFI. Sur la carte levée au cours de ce travail, le tout a été regroupé en une formation permo-carbonifère formée essentiellement de conglomérats et dont les contacts avec les MFI et les gneiss de Pussy ont seulement été observés en quelques points.

2.2. Les “bandes” permo-carbonifères (forêt de Barlet, route du Cudray)

Le Permo-Carbonifère est constitué de conglomérats à galets de quartz, de grès et de quelques niveaux de schistes riches en matière organique fossile. Sur le terrain, la reconnaissance de ce faciès est facilitée lorsque les niveaux conglomératiques ou bitumineux sont présents ou lorsqu'un rubanement est observé. Mais ce n'est évidemment pas toujours le cas et la plupart du temps, les grès se distinguent très mal des faciès gneissiques des MFI, en raison des déformations internes qui les affectent tous deux. Dans certains cas, la présence de pegmatites a servi d'argument pour attribuer les affleurements aux MFI. Dans les autres cas, la forme émoussée des grains et la structure équante de la matrice, observées en lame mince, constituent des preuves de l'appartenance des affleurements au Permo-Carbonifère.

Au sein de ce Permo-Carbonifère, ont été observés des microplis et plis :

1) Sur la rive droite de l'Eau Rousse, au SW du granite de ND de Briançon, les affleurements houillers présentent de nombreux microplis isoclinaux dont on ne peut malheureusement pas définir la géométrie du plan axial à cause du fauchage de ce versant.

2) Sur la route de Cudray, on peut observer une intersection entre S_0 (N140-60°NE) et S_1 (N30-60°E) mettant en évidence la présence d'un pli d'axe 50 au N90°.

Ces “bandes” observées au niveau du Cudray et de la forêt de Barlet correspondraient donc plus vraisemblablement à une structure plissée qui affecterait également le socle. Seule la présence de petites écailles de niveaux carbonatés près des côtes du Verney semble indiquer qu'il s'agit de plis pincés dans une écaille plutôt que de simples plis. La coupe 4 (planche hors-texte n°2) représente cette structure au niveau de la forêt du Cudray. Sur la carte géologique interprétative (planche hors-texte n°1), ces plis pincés apparaissent sous forme de bandes orientées NE-SW résultant de l'intersection entre les flancs des plis orientés E-W et la pente de la surface topographique.

3. La couverture sédimentaire dauphinoise

La couverture dauphinoise est constituée d'une alternance de calcaires (compétents) et de schistes (incompétents) comme on peut le voir sur la colonne lithostratigraphique de la figure II.15. Elle est marquée par une succession de plis d'axe NNE-SSW et à vergence NW. Les couches compétentes (Lias inférieur, Bajocien-Bathonien et Kimméridgien-Tithonique) servent d'ossature à cette structure et sont bien repérables dans le paysage (cf. coupes de la planche hors-texte n°2). Les plis sont observables à toutes les échelles : du microscope jusqu'à l'échelle du secteur étudié, en passant par l'échelle de l'affleurement (figure II.23). Tous les axes de ces plis sont horizontaux mais leurs plans axiaux présentent différentes inclinaisons en fonction de leur position sur les grandes structures plissées (figure II.24).

Les observations répertoriées sur la carte géologique de la Rochette (Barféty *et al.*, 1984) n'ont pas toutes été retrouvées lors de cette campagne de terrain. Par exemple, les calcschistes du Domérien-Toarcién n'ont pas été reconnus sur la montagne de Tête et la faille passant à l'Ouest du Villaret n'a pas été identifiée.

Sur la carte géologique (planche hors-texte n°1), on peut observer qu'en rive droite, le Roc Marchand (environ 2000m d'altitude) laisse affleurer les calcaires du Malm tandis qu'en rive gauche, au niveau du col de la Madeleine de même altitude, n'affleurent que les formations du Lias. Ceci implique nécessairement que les axes des plis affectant la couverture sédimentaire plongent vers le NNE.

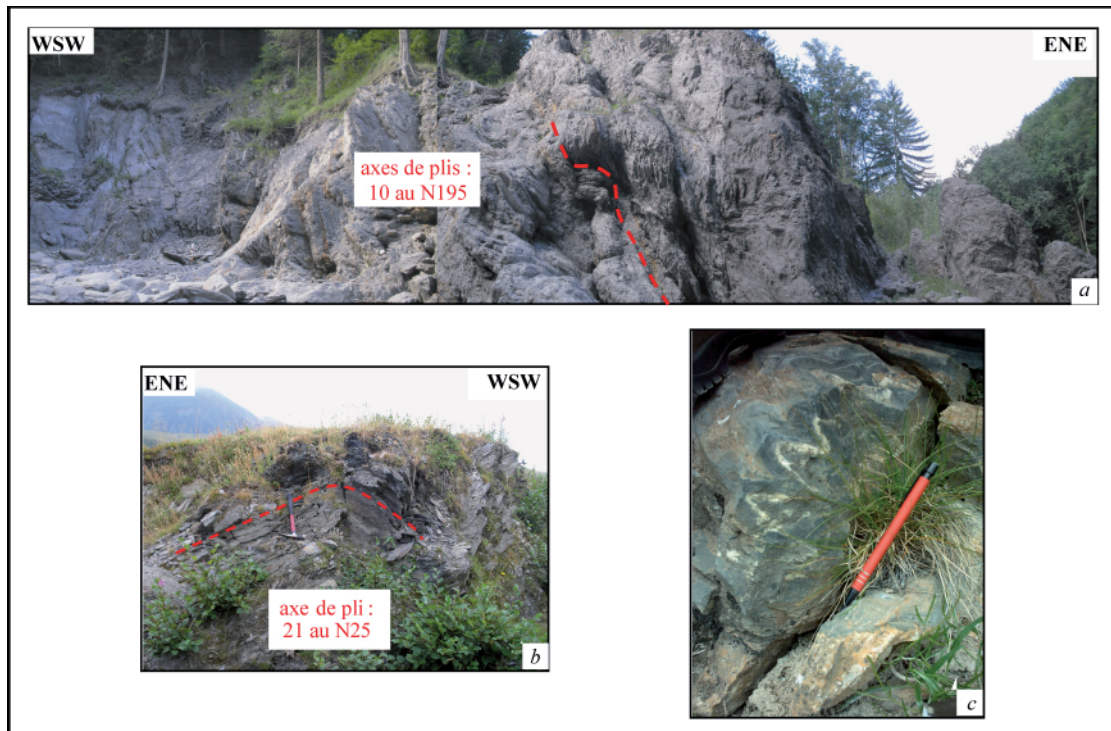


Figure II.23 : Exemples de plis observés dans la couverture delphino-helvétique
 a) cascade du Morel (Aalénien), b) montagne de Tête (Bajocien-Bathonien), c) bloc des Arcochons (Kimméridgien-Tihonien)

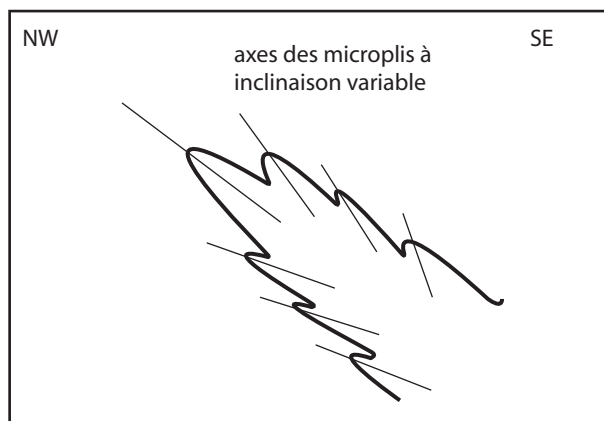


Figure II.24 : Inclinaison des plans axiaux des microplis en fonction de leur position sur les grandes structures plissées.

Peu de traces de circulation des eaux au sein de la couverture sédimentaire ont pu être observées. Cependant, la présence de pyrite dans les schistes de la couverture sédimentaire semble influencer de manière radicale la composition des eaux. En effet, le Roc Marchand (figure II.25) ainsi que la partie Sud de la galerie de reconnaissance EDF laissent apparaître des eaux chargées en oxydes et hydroxydes de fer (teinte rouille).

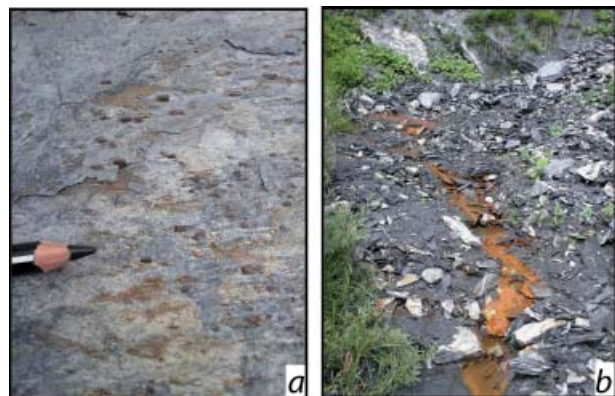


Figure II.25 : Influence de la pétrographie sur la nature des eaux au Roc Marchand
 a) pyrites alignées selon la schistosité dans le Callovo-Oxfordien
 b) ruisseau chargé en oxydes et hydroxydes de fer

4. Le contact à proximité de la zone d'émergence

Dans un premier temps, le contact a d'abord été étudié à proximité de la zone d'émergence, de part et d'autre de l'Isère : le secteur de Petit Cœur-la Coèche en rive droite puis la galerie EDF ainsi que le secteur de la Route de la Forêt en rive gauche.

4.1. Le secteur de Petit Cœur - la Coèche

Dans ce secteur, le contact est marqué par deux écailles ; l'une contenant des schistes du Domérien et l'autre des schistes conglomératiques du Permo-Carbonifère. Ces affleurements de Petit Cœur ont été sujets à controverse en 1860 et c'est le contenu paléontologique qui a permis d'attribuer cette bande au Permo-Carbonifère (Antoine *et al.*, 1992). Dans le lit du Grand Nant de Naves, il a pu être observé que les schistes domériens sont directement en contact avec les micaschistes du socle. Ce secteur est représenté sur la coupe 3 (planche hors-texte n°2).

4.2. La galerie EDF et le secteur de la Route de la Forêt

La galerie de reconnaissance EDF, située à l'Ouest des thermes, permet d'accéder au contact à environ 100m sous la surface du sol. Elle a permis d'établir la carte de la figure I.17. Les gypses et cargneules observées dans la galerie n'ont pas été observés en surface où ils sont recouverts par les formations superficielles (travertins et colluvions).

Au dessus des thermes, le contact tectonique est souligné par deux écailles discontinues de dolomies-cargneules et il est recouvert vers le bas par des travertins.

A proximité de la zone d'émergence, les failles repérées en sismique (Anonyme, 1994) n'ont pas été observées en surface : ni sur le terrain, ni sur les photographies aériennes. De plus, le remplissage de l'ombilic glaciaire masque les structures entre les deux rives. Ainsi, on ne retrouve pas en rive gauche l'écaille permo-carbonifère observée en rive droite.

5. Les écailles tectoniques

A proximité de la zone d'émergence, nous avons vu que le contact est constitué de petites écailles de 100 m de large. En s'éloignant sur chacun des versants, la largeur de ces écailles devient plus importante (jusqu'à 300 m).

5.1. Le système d'écailles de Celliers, la Thuile et le Crozat

La zone des villages de Celliers, la Thuile et le Crozat est constituée d'une succession d'écailles tectoniques déjà observées par Barféty en 1985 et 2000. Au NW, on observe une écaille au sein même du Permo-Carbonifère (mise en évidence par la présence d'une bande de cargneules le long de la nouvelle piste du Chesalet). Les MFI constituent une grande unité divisée, par une double-écaille sédimentaire. Cette dernière se poursuit au NE par des petites structures de roches carbonatées. Les coupes 5, 6 et 7 (planche hors-texte n°2) illustrent cette structure complexe. On peut voir ici que, de part et d'autre de la vallée de l'Eau Rousse, les structures présentent des pendages opposés. Ceci met en évidence que les différents accidents associés à l'accident de la Léchère ne sont pas des surfaces planes de chevauchement mais des surfaces plissées.

5.2. L'écaille de Combelouvière

La zone située au niveau de Combelouvière est constituée d'une écaille fortement tectonisée de Trias. Le long de la route fermée entre Combelouvière et la Thuile, on observe successivement le Trias terminal (calcaire gréseux gris noirs et quartzites à veines de quartz) puis des dolomies et cargneules. Le

gypse, identifié par Barféty (2000) lors de l'étude du glissement de la route de Combelouvière à Doucy, n'a pas été observé en surface lors de notre campagne de terrain. L'étude de Barféty (2000) montre que le gypse, présent en profondeur, est responsable du glissement. Dans ce secteur, les données de surface ne permettent d'avoir qu'une vision partielle de la structure profonde. Il semble que les plis, à cœur de Trias, soient très pincés et fortement déversés vers le NW (coupes 5 et 6 de la planche hors-texte n°2).

5.3. Les écailles des Arcochons

Dans le secteur des Arcochons, quatre contacts tectoniques ont été levés et les observations suivantes ont été faites d'Ouest en Est (cf. coupe 2 de la planche hors-texte n°2) :

- 1) Les MFI sont recouverts en discordance sédimentaire par les quartzites à quartz rose du Trias moyen.
- 2) Une écaille tectonique est constituée de dolomies et cargneules ainsi que de gypse présentant de nombreuses dolines (voir figure II.26).
- 3) Un accident jalonné de dolomie est observé dans le thalweg situé sous les Avignons, il est encadré de quartzite de couleur beige du Trias terminal puis de Lias. Les schistes liasiques sont ici marqués par des dolines qui se développent vraisemblablement dans le gypse sous-jacent.
- 4) Un dernier accident (non observé sur le terrain) forme la bordure ouest de l'unité constituée de terrains schisto-calcaires jurassiques, et affectée par de grands pli isoclinaux.



Figure II.26 : Doline dans les gypses (les Arcochons)

Il est à noter qu'il s'agit du seul endroit du secteur où l'on peut voir les gypses affleurer en surface.

6. L'accident de la Léchère en s'éloignant de la zone d'émergence

Comme les conditions d'observation ne sont pas toujours très bonnes sur le secteur (accès, dépôts quaternaires, glissement,...), il est apparu nécessaire d'étudier le contact tectonique de la Léchère en s'éloignant de part et d'autre des deux bassins versants encadrant la zone d'émergence thermique : l'Homme de Beurre en rive gauche ; le col de la Louze et le lac de Roselend en rive droite. Ceci a permis également d'avoir une idée de la variation latérale de la géométrie du contact.

6.1. L'Homme de Beurre

Au niveau de l'Homme de Beurre, on peut observer le contact entre le socle (constitué ici par les gneiss de Pussy-Plan du Col) et les terrains sédimentaires (figure II.27). Ce contact est en continuité avec l'accident de la Léchère. Il a pu être observé que les cataclasites affectant les gneiss sur la carte géologique de la Rochette au 1/50 000 du BRGM (Barféty *et al.*, 1984) correspondraient plutôt à des conglomérats légèrement déformés, résultant du démantèlement du socle gneissique. Le contact entre socle et dépôts houillers est donc une discordance sédimentaire. Seuls les contacts Houiller-Trias et Trias-Lias sont des contacts tectoniques.

Cette observation, illustrée par la figure II.27 et la coupe 8 (planche hors-texte n°2), nous a permis d'en déduire que, lorsque l'on se déplace vers le NE, seul le contact entre houiller et MFI est un contact faillé tandis que le contact entre gneiss de Pussy et houiller est une discordance sédimentaire.

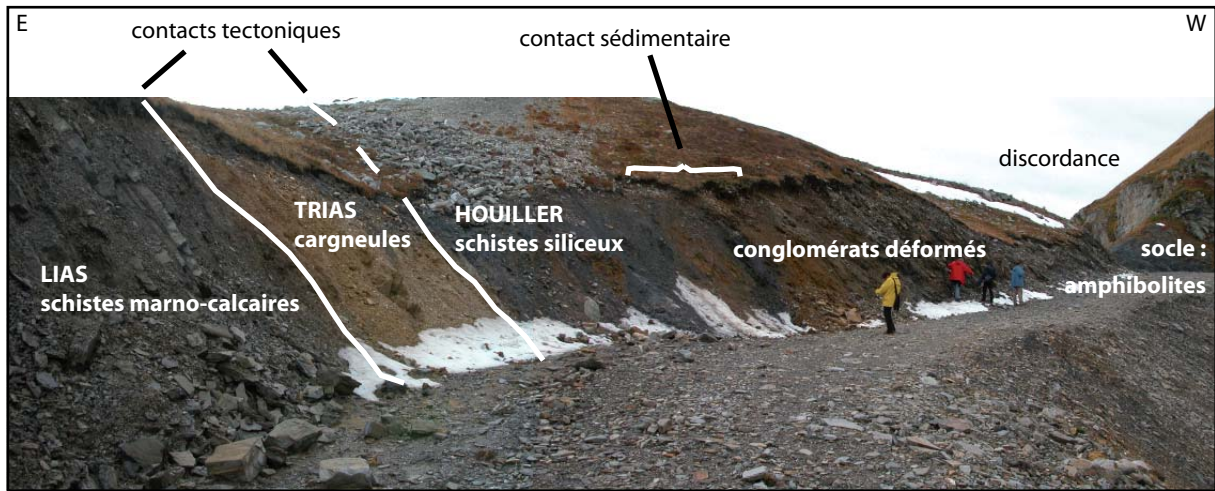


Figure II.27 : Contact entre le socle et la couverture delphino-helvétique observé à l'Homme de Beurre

6.2. Le col de la Louze

Le col de la Louze est marqué par le même contact que celui de la Léchère. Ce dernier, représenté sur la coupe 1 (planche hors-texte n°2), est très bien observable au NE du col de la Louze comme le montre la figure II.28. Les cargneules et dolomies affleurent sur une grande largeur et présentent un aspect très vacuolaire. Les vacuoles atteignent jusque 1 m de large et semblent constituer une très bonne formation aquifère. Au SW du col de la Louze, la présence de nombreuses dolines en surface laissent penser que le gypse est présent en profondeur sous les cargneules.

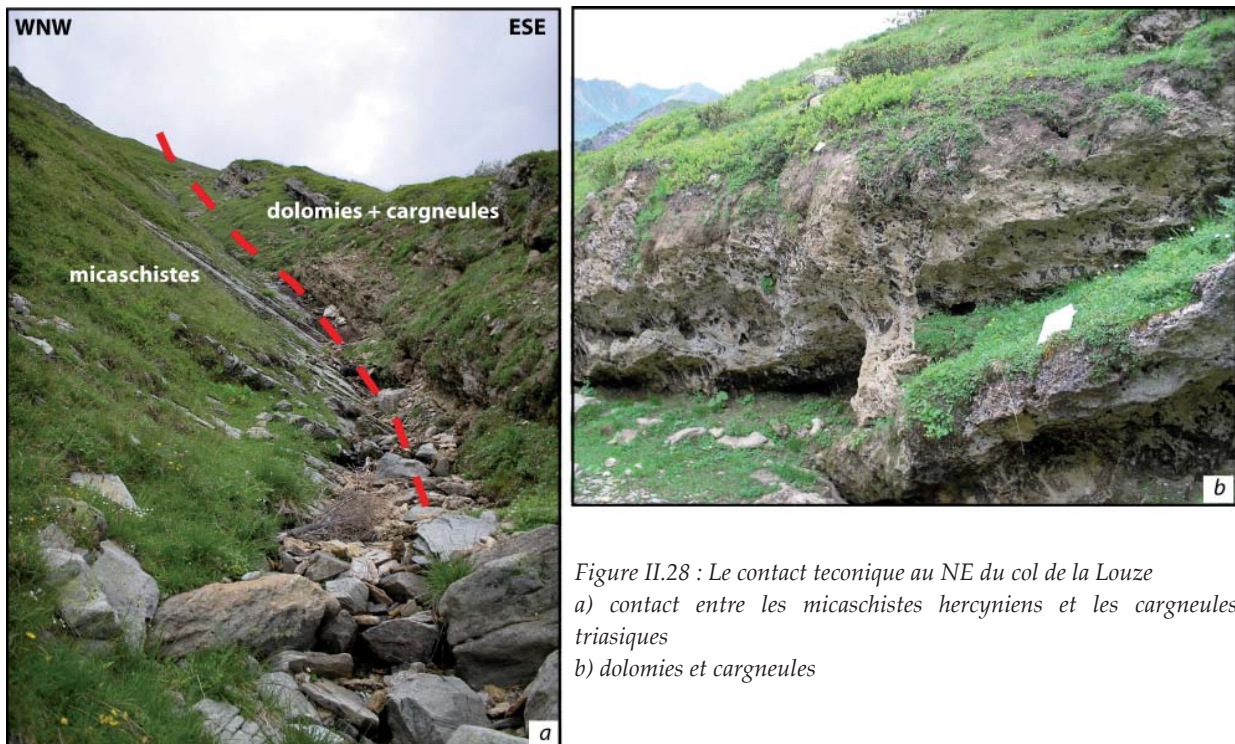


Figure II.28 : Le contact tectonique au NE du col de la Louze
 a) contact entre les micaschistes hercyniens et les cargneules triasiques
 b) dolomies et cargneules

6.3. Le lac de Roselend

La bordure ouest du lac de Roselend laisse affleurer le même contact que celui de la Léchère (cf. planche hors-texte n°1). Les affleurements observés ici laissent apparaître une grande masse de cargneules et dolomies affectées de nombreuses déformations décrites sur la figure II.29. Ces observations montrent que :

- la géométrie de l'accident de la Léchère est très variable latéralement et donc également en profondeur ;
- les cargneules et dolomies marquant l'accident de la Léchère sont affectées par de la déformation cassante (fractures, brèches) et de la déformation plicative, synchrone et/ou postérieure au chevauchement.

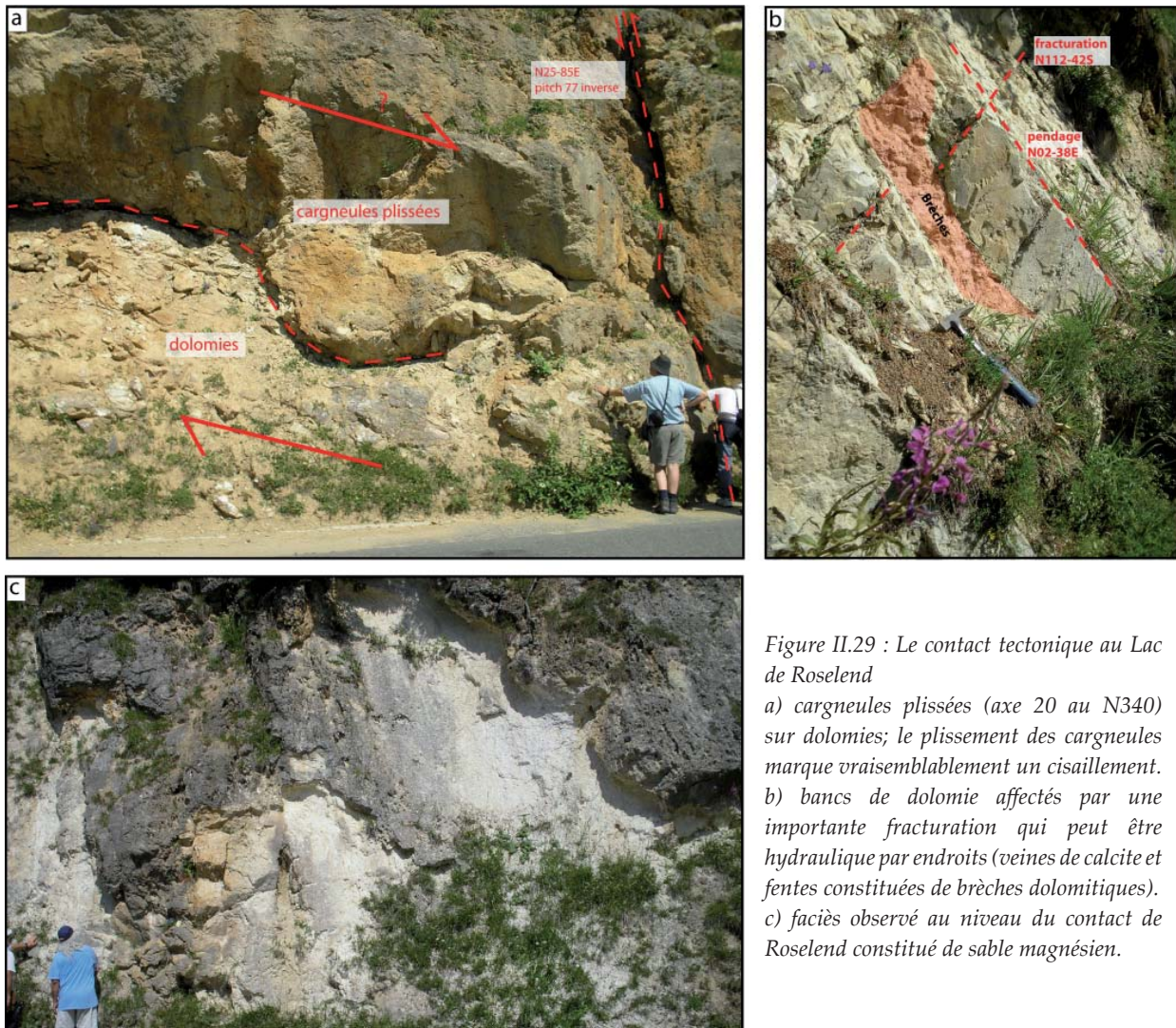


Figure II.29 : Le contact tectonique au Lac de Roselend

a) cargneules plissées (axe 20 au N340) sur dolomies; le plissement des cargneules marque vraisemblablement un cisaillement.
 b) bancs de dolomie affectés par une importante fracturation qui peut être hydraulique par endroits (veines de calcite et fentes constituées de brèches dolomitiques).
 c) faciès observé au niveau du contact de Roselend constitué de sable magnésien.

7. Conclusion

La cartographie au 1/10000 du secteur d'étude a permis d'apporter des améliorations aux observations des cartes BRGM au 1/50000. Tout d'abord, au sein des MFI, des plis pincés de Permo-Carbonifère ont été observés. De plus, le contact entre socle et couverture n'est pas un simple accident. Il se divise en plusieurs accidents associés, formant les différentes écailles du secteur (écaille de la Coèche, écaille de Combelouvière, écailles du secteur Crozat-la Thuile-Celliers et écaille des Arcochons). Pour finir, l'accident de la Léchère (comme tous les autres accidents associés) est affecté par des plis dont les axes, espacés d'environ 500 m, plongent très légèrement vers le NE. Ce phénomène correspond à une structure à pendages opposés de chaque côté de l'Eau Rousse (cf. coupes 5, 6 et 7 de la planche hors-texte n°2). Ce plan ondulé finit par s'enraciner dans le plan de décollement basal situé entre 4 et 5 km de profondeur (Ménard, 1988 et Tardy *et al.*, 1999). La géométrie des différents contacts est marquée par une forte variabilité latérale et en profondeur.

IV. Analyse de la fracturation du massif

L'objectif principal de l'analyse de la fracturation sur le secteur étudié est d'évaluer les possibilités de circulation dans les massifs rocheux. L'identification des différentes phases de déformation, à l'origine de cette fracturation, va permettre de mieux appréhender sa répartition.

1. Tectonique régionale

La formation des Alpes Occidentales résulte de la succession de plusieurs phases de déformation (Lemoine *et al.* 2000) (figure II.30). Dès la fin de l'Éocène (-30 Ma), la première phase de compression WNW-ESE résulte de la fermeture de l'océan liguro-piémontais et va conduire, notamment, à la structuration en nappes et en plis (figure II.30a). Lors d'une deuxième phase, toujours de compression WNW-ESE, le basculement de la contrainte σ_3 mène à la surrection des massifs cristallins externes (figure II.30b) et au rejeu en faille normale de certains accidents (Front Pennique par exemple) (Frisch *et al.*, 2000). Au cours du Néogène, une phase d'extension SSW-NNE, parallèle à la structure de l'Arc Alpin, va former des décrochements dextres (Mancktelow, 1992 et Fügenschuh *et al.*, 1999) (figure II.30c). Cette troisième phase est due à la rotation de l'Apulie et l'ouverture de la mer Ligure. Une dernière phase d'extension WNW-ESE, perpendiculaire à la chaîne alpine, a été observée (figure II.30d) et interprétée comme un rééquilibrage gravitaire post-orogénique par Champagnac *et al.* (2006). Le secteur de la Léchère, situé à la jonction entre les Alpes externes et internes, est un lieu privilégié pour l'étude des déformations alpines.

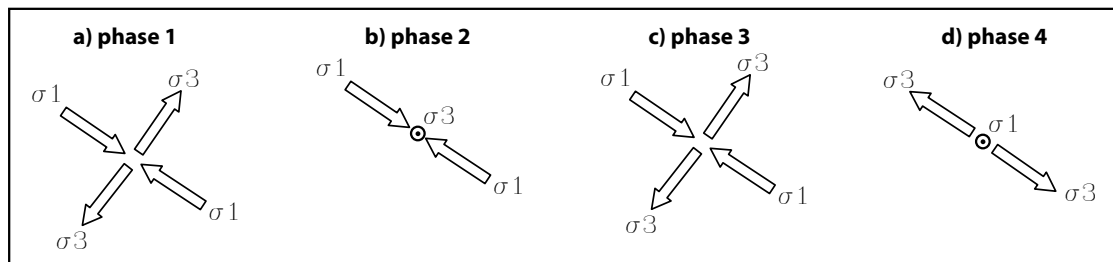


Figure II.30 : Résumé des états de contraintes régnant lors des différentes phases de déformation des Alpes Occidentales

2. Méthodologie

Trois types de mesures de fracturation ont été réalisés sur le terrain : des mesures de plans striés sur 4 stations, des mesures systématiques de tous les plans (failles, diaclases, fissures,...) sur 11 affleurements et des mesures de veines alpines sur l'ensemble du massif.

2.1. Les mesures réalisées sur le terrain

Le granite de ND de Briançon, plus compétent que les MFI, présente de nombreux plans striés (stations 13 et 14 de la planche hors-texte n°3). Deux autres stations (2 et 5) ont été levées dans les MFI sur la route de Naves ; les autres affleurements observés ne présentent pas de plans striés. Lors des mesures sur le terrain, l'attention a été portée sur l'identification des systèmes de failles conjuguées.

Les stations de mesures systématiques (planche hors-texte n°3) se situent essentiellement dans les MFI (stations 1, 2, 3, 4, 6, 9 et 12 dans la galerie EDF) mais aussi dans le houiller (stations 7 et 10). Un seul affleurement dans la couverture sédimentaire (j7-9 Kimméridgien-Tithonique, station 11) présente des conditions d'affleurement favorables à ce type de mesure (sans fauchage et avec une schistosité peu pénétrative). Les affleurements choisis présentent des directions différentes, ce qui permet de s'affranchir des biais amenés par le plan d'observation (Priest et Hudson, 1976 et Hudson et Priest, 1979, 1981 et 1983). La méthodologie consiste à mesurer toutes les discontinuités présentes sur un affleurement d'environ 30m de long. Les paramètres suivants ont été relevés (figure II.31) : la distance (d), la nature de la discontinuité (diaclyse, faille, fissure), l'étendue (e) en m, l'ouverture en mm, la nature du remplissage, l'azimut et le pendage.

La géométrie et la nature du remplissage des veines alpines ont été levées sur tout le secteur d'étude.

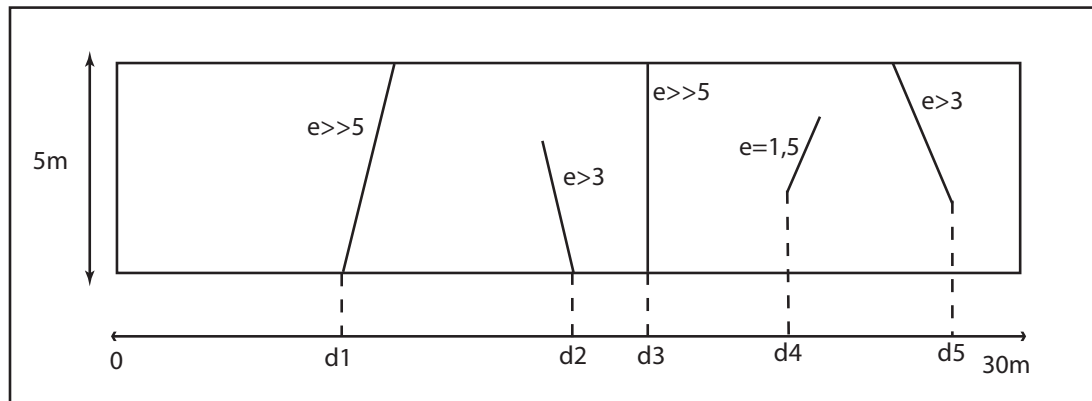


Figure II.31 : Schéma de la méthode des levés de fracturation systématique

2.2. Le traitement des données

En ce qui concerne l'analyse des plans striés, le traitement des données a consisté à faire un premier tri des failles par l'intermédiaire du logiciel d'Etchecopar *et al.* (1981 modifié en 1992). Les failles ainsi retenues sont ensuite traitées à l'aide du logiciel d'Angelier (1990 et 1991). Il est vérifié que les deux méthodes utilisées donnent bien les mêmes résultats. Pour plus de détails sur la méthodologie employée, on peut se référer à la synthèse méthodologique in Guyomard (2006). Les stéréogrammes ainsi obtenus sont présentés sur la planche hors-texte n°3.

Les mesures systématiques ont permis de réaliser des stéréogrammes de répartition des pôles des plans et des diagrammes en rosace de répartition des directions (planche hors-texte n°3). La fréquence et l'espacement moyen de chaque famille de fractures ont été calculés ainsi que l'ouverture médiane des fractures de chaque station.

3. Résultats

3.1. Analyse des plans striés

Toutes les stations microtectoniques sont cohérentes (planche hors-texte n°3) et présentent des mouvements à dominante décrochante. L'état des contraintes, observé sur toutes les stations, correspond à un σ_1 de plongement variable (horizontal à 45° vers le NW) et de direction WNW-ESE ; et à un σ_3 sub-horizontale de direction SSW-NNE. Ces données sont en accord avec la phase d'extension parallèle à la chaîne alpine (figure II.30c). La phase d'extension perpendiculaire à la chaîne (figure II.30d) n'est pas identifiée par l'analyse des données microstructurales. Les stations 2 et 5 sont caractérisées par un basculement de la contrainte principale (σ_1) de 45° vers le NW. Ceci peut s'expliquer soit par (i) une variation locale de l'état de contrainte, soit par (ii) un basculement, après la formation des plans striés, de l'écaïlle délimitée par l'accident de Grande Maison au NW et l'accident de la Léchère au SE. Ce basculement (ii) pourrait correspondre à la manifestation de la phase d'extension perpendiculaire à la chaîne.

3.2. Les rosaces directionnelles

Dans le socle et le Permo-Carbonifère, les mesures systématiques des fractures s.l. montrent trois groupes de stations. Le premier groupe (1, en rouge sur la planche hors-texte n°3) présente une famille principale de direction N90-N120°E et la fréquence de cette famille augmente lorsque l'on se rapproche de l'accident de la Léchère. On peut observer un deuxième groupe (2, en bleu), dont la famille dominante est de direction N20-N45°E, avec une fréquence homogène. Le troisième groupe (3, en vert) présente une direction principale de N130-N160°E. Il ne semble pas y avoir de biais du aux directions des plans d'observation (en pointillé sur les rosaces de la planche hors-texte n°3) puisque dans chacun des groupes définis, les mesures ont été levées sur des plans de direction différente. Au SE de l'accident de Grande Maison ainsi qu'au SE du système d'écaïlles de l'Eau Rousse (groupes 1 et 3), les fractures sont perpendiculaires

aux grands accidents. Tandis qu'au NW (groupe 2), les fractures sont parallèles à ceux-ci. Les fractures N100°E correspondraient à la première phase d'extension SSW-NNE, parallèle aux structures et les failles N30°E à la deuxième phase d'extension NW-SE, perpendiculaire à la chaîne. La station 11, levée dans la couverture delphino-helvétique, présente une première famille principale N100-N130°E comparable à celle identifiée pour le groupe 1 et une deuxième famille N50-N80°E mal définie.

L'ouverture des fractures, non colmatées, a également été mesurée et elle est reportée sur la planche hors-texte n°3. Pour chaque station, les fractures ouvertes appartiennent à la famille principale de fracturation. L'ouverture médiane de chaque station est globalement faible (0 à 2mm). Elle est plus importante lorsque l'on s'éloigne de l'accident de la Léchère (stations 1, 2, 6 et 9). Cependant, pour chaque station, au moins une fracture très ouverte (>20mm) est identifiée (planche hors-texte n°3). Grâce à l'observation qualitative réalisée au cours de cette étude, on peut estimer que ces fractures très ouvertes sont présentes de façon homogène sur l'ensemble de la formation des MFI, avec un espacement supérieur à 50m.

Ces observations restent des observations de surface. Elles permettent de visualiser les directions du réseau de fractures mais pas ou peu d'estimer son degré d'ouverture en profondeur. Malgré cela, l'analyse de la fracturation des MFI en surface (fréquence de 0,5 à 3 fractures par mètre) permet de retenir ces MFI comme formation aquifère, dont l'implication dans l'alimentation du système thermal doit être prise en compte.

3.3. Veines alpines

Les veines alpines, présentes dans les MFI mais aussi dans les gneiss de Pussy et le granite de la Lauzière, sont assimilées à des fentes de tension. Les mesures réalisées (figure II.32) nous ont permis d'observer les deux familles de veines, réparties de manière homogène sur l'ensemble du secteur. La famille de veines horizontales à fibres verticales semble formée par la deuxième phase de déformation (figure II.30b). Tandis que les veines sub-verticales à fibres horizontales, d'âge miocène (Bertrand *et al.*, 2006), seraient dues à troisième phase, d'extension SSW-NNE (Lehmann, 2004 et Ratzov, 2004) (figure II.30c). Les observations de notre étude sont globalement concordantes avec celles de Bertrand *et al.* (2006). Cependant, l'étude d'un secteur plus vaste a permis de mettre en évidence la dispersion des directions des veines verticales.

Les veines montrent des remplissages essentiellement constitués de quartz et chlorite mais également de minéraux accessoires en fonction de la nature de l'encaissant (tableau II.2). Certaines veines présentent une cristallisation en géodes (fours des cristalliers) et des ouvertures de plusieurs dizaines de centimètres ont pu être observées dans la galerie Arc-Isère (Gasquet, communication personnelle).

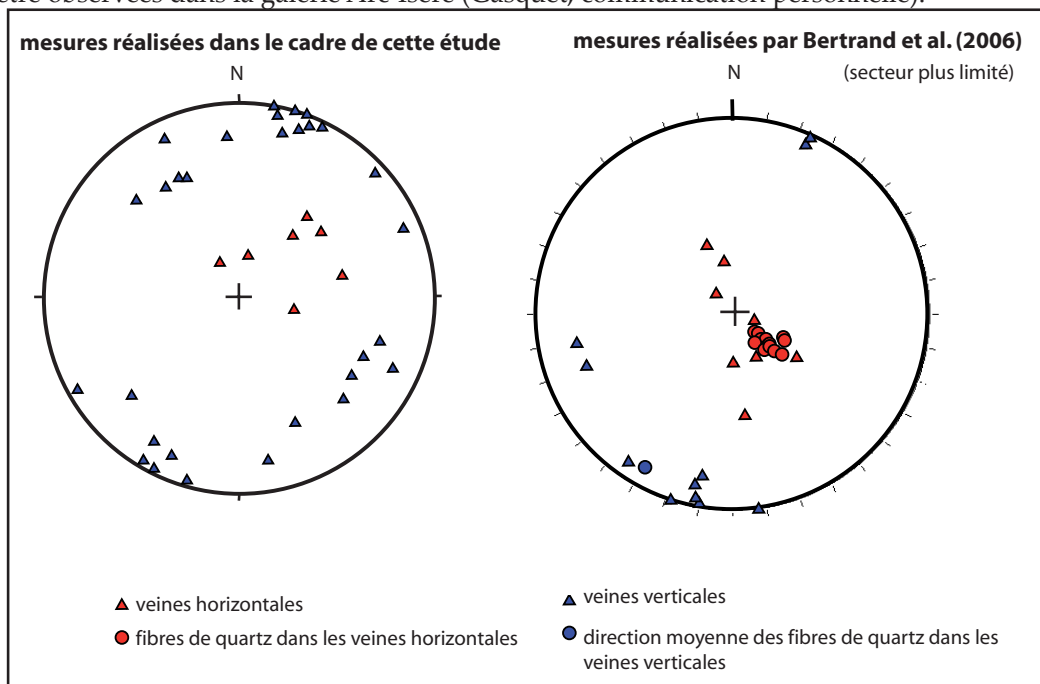


Figure II.32 : Stéréogrammes des pôles des veines alpines sur l'ensemble du secteur (projection sur l'hémisphère inférieur)

4. Conclusion

Pour résumer, les différentes structures observées sur le secteur de la Léchère ont été formées par la succession des quatre phases de déformation alpine, identifiées dans la littérature (figure II.33). La première phase (en rouge) est responsable de la mise en place des nappes de charriage et de la schistosité dominante accompagnée par la cristallisation de biotites. La deuxième phase (en orange) a formé la schistosité de dissolution accompagnée par la cristallisation de chlorite ainsi que les veines alpines horizontales à fibres verticales. La troisième phase (en violet) a formé les failles décrochantes, les veines alpines verticales à fibres horizontales et les fractures N100°E. La quatrième phase (en vert) ne s'exprime que par la présence des fractures N30°E. Au sein du socle cristallin, les possibilités de circulation semblent donc nombreuses (figure II.33). En effet, les deux familles de fractures permettent aux eaux de circuler aussi bien dans la direction SSW-NNE que dans la direction WNW-ESE. A ces dernières, sont associées les veines alpines. Le réseau est complexe et relativement dense mais la connectivité entre ces différentes structures est difficilement estimable. Néanmoins, ce réseau de fractures semble pouvoir guider les eaux infiltrées sur le socle en direction de l'accident de la Léchère et des écailles associées. Quant aux matériaux carbonatés de la couverture delphino-helvétique, ils ne présentent pas une fracturation suffisamment importante pour participer de manière conséquente aux circulations souterraines du secteur.

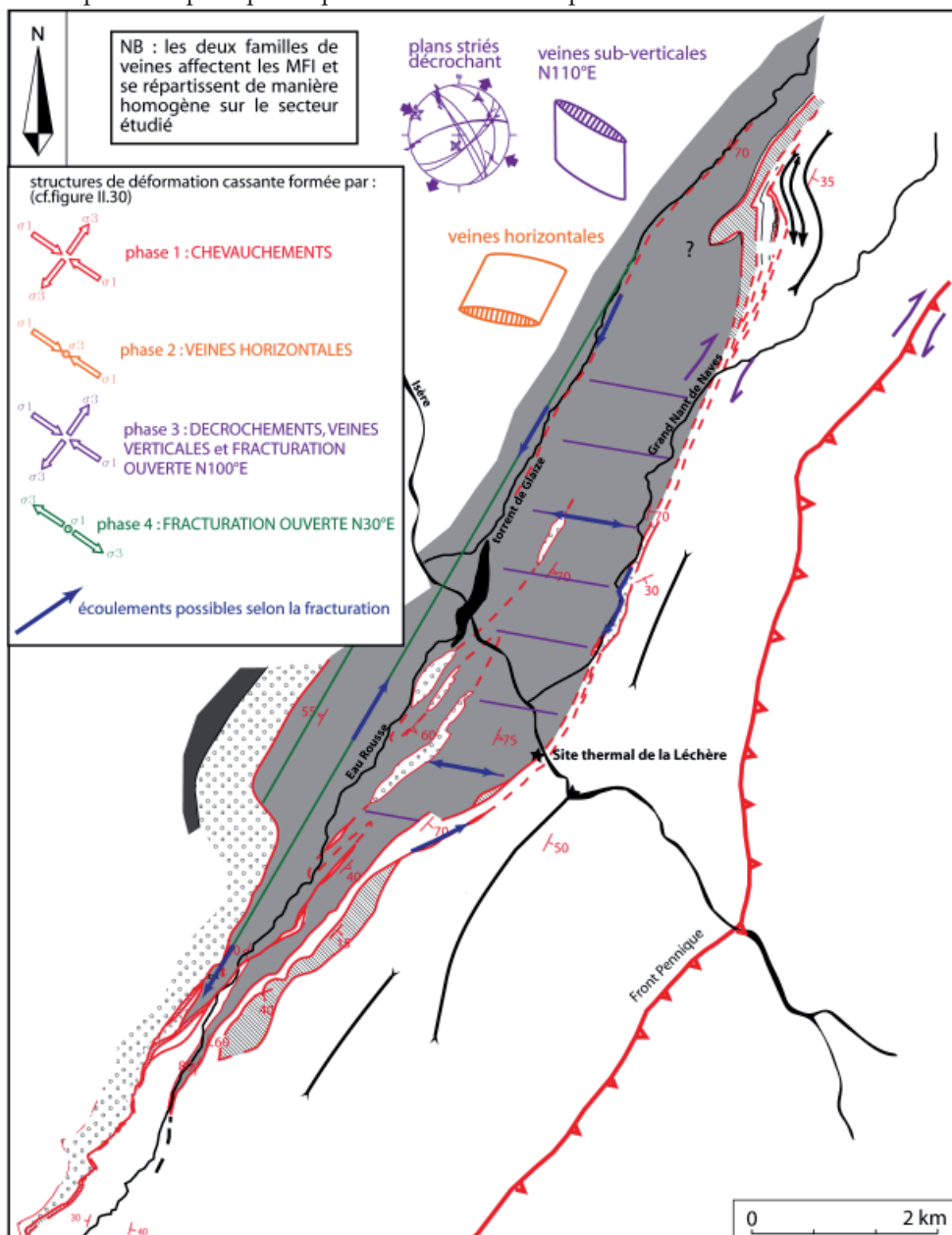


Figure II.33 : Schéma montrant les différentes structures formées par les 3 phases de déformation et les possibilités de circulation qui en découlent

1. Les données disponibles

De très nombreux forages ont été réalisés au sein de l'ombilic d'Aigueblanche (localisation sur la figure II.34 et description en annexe 2).

- Plusieurs forages de 5 à 25 m de profondeur (17 piézomètres réalisés par Solétanche, 1952) ; et 11 forages géotechniques (Jamier, 1988) traversent uniquement les alluvions de l'Isère.
- Quatre forages, réalisés par Solétanche (1952), de 25 à 60 m de profondeur, ont permis d'identifier des dépôts de moins en moins grossiers puis des dépôts fins correspondant à des dépôts glacio-lacustres.
- Onze forages thermaux ont été réalisés. Les 6 premiers ne traversent pas le substratum et les 5 derniers atteignent 80 à 200 m de profondeur (Eberentz, 1987 ; Corrigan, 1995 ; Jerphanion et Corrigan, 1996 et SOGREA, 1998c).
- Trois forages géotechniques atteignent également le substratum ; l'un situé sur le site d'émergence thermique (S1 ; Besson, 1987) et les deux autres sont situés sur la commune de Petit Cœur au NE de la Léchère (Pachoud, 1973).

De plus, les forages réalisés lors de l'exécution du barrage des échelles d'Annibal (situé à l'amont de l'ombilic d'Aigueblanche) permettent de situer le toit du substratum à une cote de 385 m, soit 65 m sous la surface topographique (figure II.35). Sur le site de la Léchère, le toit du substratum se trouve à 100m de profondeur, soit une cote de 350m au niveau du forage Natacha. En une distance d'environ 4km, l'ancienne vallée glaciaire s'est enfoncée de 35m dans l'ombilic.

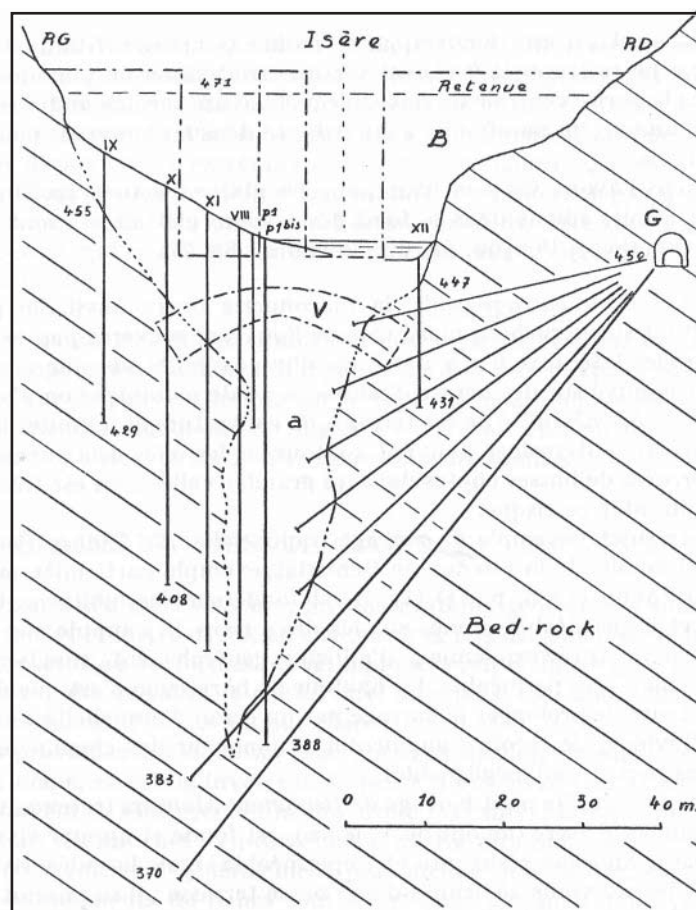


Figure II.35 : Base du substratum, reconstituée à partir de données de forage lors de la réalisation du barrage des échelles d'Annibal situé à l'amont de la Léchère (Gignoux et Barbier, 1955)

Tous les forages sont destructifs et la qualité des descriptions des profils géologiques est donc peu fiable (annexe 2). Les forages réalisés par Solétanche (1952) sont les mieux décrits, toutes les autres descriptions sont de qualité médiocre. La réinterprétation de ces données est essentiellement basée sur la description de la taille des éléments rencontrés, leur nature (siliceux ou non) et/ou leur forme (anguleuse ou émoussée). Deux coupes ont pu être ainsi établies (figure II.36) dans chacune des directions : SW-NE parallèle à l'accident de la Léchère et NW-SE perpendiculaire à celle-ci. Elles permettent de visualiser la structure du substratum et du remplissage quaternaire.

2. Le substratum

La coupe orientée SW-NE de la figure II.36 est parallèle à l'accident de la Léchère. On visualise ici que l'accident de la Léchère est plissé selon cette direction (plissement à surimposer au plissement observé précédemment sur les coupes de direction NW-SE (planche hors-texte n°2). L'épaisseur du contact triasique (dolomies, cargneules et gypses) varie considérablement le long de cette coupe. Au niveau de la galerie EDF, située au SW, une importante épaisseur de gypse et anhydrite est à nouveau observée. Ces niveaux triasiques ont servi de niveau de décollement de la couverture sédimentaire. Ainsi, ils jalonnent l'accident comme des sortes de "copeaux" arrachés à la couverture sédimentaire. En rive droite de l'Isère, les forages de Petit-Cœur ont traversé une écaille de quartzites du Trias terminal ainsi qu'une écaille de conglomérats permo-carbonifères observée également en surface au Nord de Petit-Cœur (cf. planche hors-texte n°1).

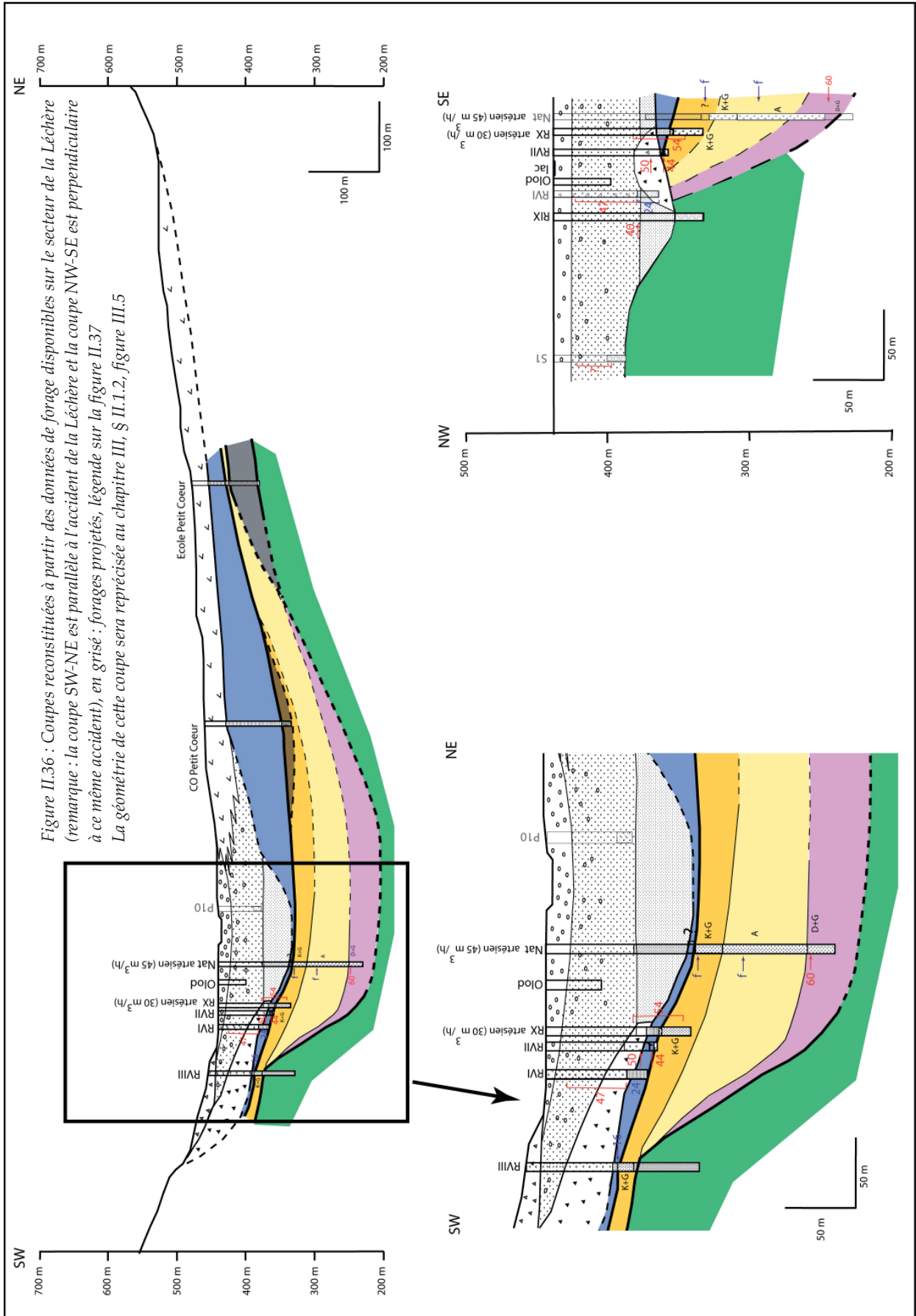
Sur la coupe NW-SE perpendiculaire à l'accident, on peut voir que le contact se situe entre les forages RIX et RVI.

3. Le remplissage quaternaire

Le secteur de la zone d'émergence se situe au sein de l'ombilic glaciaire qui se développe à l'amont du verrou de ND de Briançon. La coupe SW-NE montre bien que la surface du substratum a une forme typique en auge glaciaire. Des sables fins ont été décrits en fond d'ombilic (forages Natacha et P10) sur environ 20 m d'épaisseur. Ils correspondent à des dépôts glacio-lacustres (figure II.17) et constituent une barrière imperméable à semi-imperméable entre le substratum et les dépôts quaternaires plus superficiels. On observe ensuite sur environ 50 m des graviers fluvio-glaciaires qui sont de plus en plus grossiers en s'approchant de la surface. Viennent enfin les galets déposés par l'Isère sur 20 à 25 m d'épaisseur. Sur le versant SW, des "éboulis de marnes" et des "éboulis polygéniques" sont décrits dans les forages RVII et RVIII. Nous considérons que ces descriptions correspondent à un écroulement ancien de 15 à 20 m d'épaisseur. Mais son extension est mal définie car des doutes existent sur la véritable nature de la "zone indurée conglomératique" du forage RX. De plus, aucun indice ne permet de définir la chronologie de formation de cet écroulement par rapport aux dépôts glacio-lacustres. En surface, ce versant est marqué par une forte épaisseur de colluvions cimentées par des travertins. En rive droite, des dépôts de cône de déjection sont présents.

4. Proposition d'un schéma de circulation dans la zone d'émergence

La température des eaux captées par les forages est reportée sur les coupes de la figure II.36. La répartition de ces températures permet de proposer un schéma de circulation des eaux dans la zone d'émergence, résumé sur la figure II.37. Les eaux thermales se trouvent à la base du contact triasique, remontent vers la surface en circulant du SE vers le NW et débouchent au sein de l'écroulement ancien. Cet écroulement sert de zone de transition entre le griffon thermal et le remplissage quaternaire. Tandis que les eaux froides circulent du SW au NE, le long du versant constitué par l'écroulement ancien, le Lias et le sommet du contact triasique. Ces eaux froides ont été observées dans le forage RVIII, au fond de RVI et au milieu de Natacha. Les deux types d'eau se mélangent dans l'écroulement puis dans les dépôts fluviatiles.



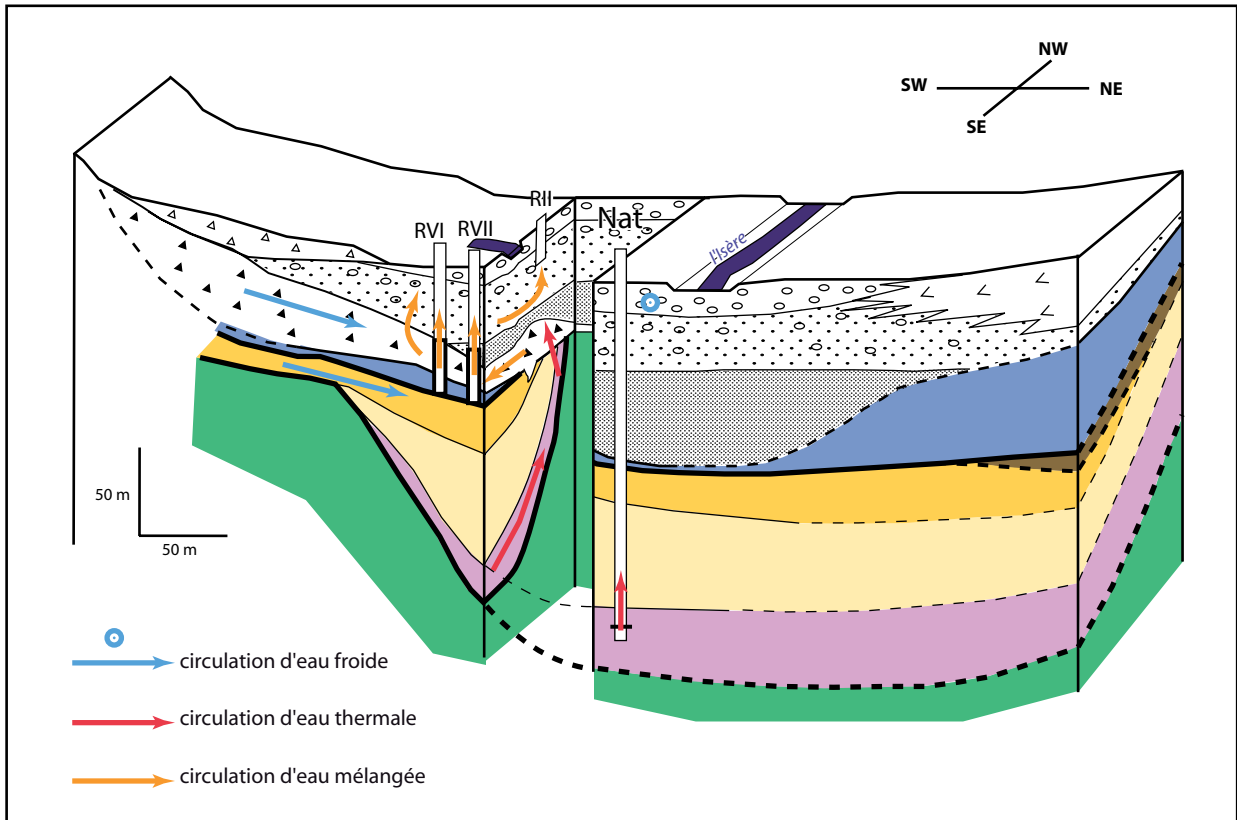


Figure II.37 : Bloc diagramme de la structure géologique de la zone d'émergence et circulation des différents types d'eau légende en figure II.38

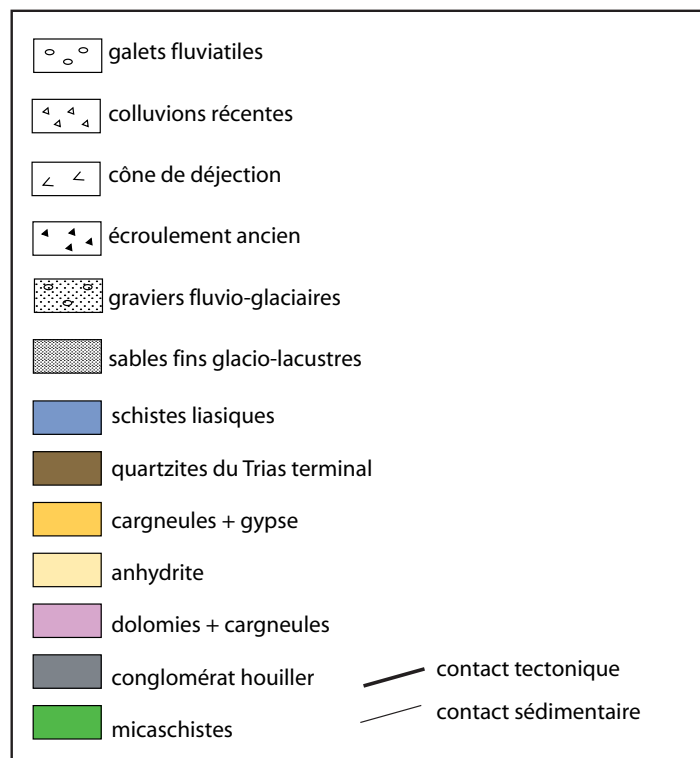


Figure II.38 : Légende des figures II.36 et II.37

Les différents forages thermaux ont capté des mélanges entre eau thermale profonde et eau froide superficielle, en proportion variable en fonction de leur position par rapport au griffon thermal. Seul le forage Natacha capte directement l'eau du griffon thermal avant sa diffusion dans l'écroulement.

Il apparaît alors vraisemblable que l'eau thermale ait toujours été présente dans le remplissage quaternaire avant même la formation du lac d'eau chaude en 1869. En effet, le niveau piézométrique actuel de l'eau du remplissage quaternaire se trouve sous la surface du sol comme le montrent les piézomètres et le lac. Le griffon thermal a créé des formes de dissolution sous l'écroulement ancien (figure II.37). Ceci a mené en 1869 à un affaissement au sein de l'ensemble du remplissage quaternaire et à la formation d'une dépression en surface. La surface topographique s'est alors retrouvée sous la surface piézométrique et le lac s'est rempli d'eau thermale mélangée à l'eau froide des versants. Le lac, apparu en rive gauche de l'Isère, était trop loin du griffon thermal ; c'est pourquoi il ne s'est rempli que d'eau froide.

Cette proposition de schéma de circulation dans la zone d'émergence repose sur les observations des données de forages disponibles. Afin de confirmer ces hypothèses, une meilleure définition de l'étendue de l'écroulement ancien est nécessaire.

VI. Conclusion

1. La structure géologique du secteur étudié

Le site de la Léchère se trouve sur la bordure orientale du massif cristallin de Belledonne. Le socle cristallin et son tégument permo-carbonifère sont en contact tectonique, jalonné de dépôts triasiques évaporitiques, avec la couverture delphino-helvétique essentiellement carbonatée. Les dépôts quaternaires recouvrent l'ensemble. Le socle est constitué par des granites, gneiss et micaschistes et son tégument permo-carbonifère de conglomérats et grès contenant par endroits de la matière organique. Les dépôts triasiques, ayant servi de niveau de décollement, sont constitués de dolomies, cargneules, gypse et anhydrites. La couverture delphino-helvétique présente une alternance de calcaires et de schistes. Parmi les dépôts quaternaires, on observe des dépôts liés à la présence de glaciers (dépôts glaciaires, pro-glaciaires et périglaciaires), des dépôts gravitaires mais aussi des travertins.

La cartographie du secteur nous a permis d'observer que les micaschistes de Feissons-sur-Isère (MFI), constitués de micaschistes, amphibolites et leptynites, sont déformés par trois schistosités hercynienne, tardi-hercynienne et alpine. Ils sont également affectés par deux familles de veines, horizontales et verticales, liées à des circulations hydrothermales miocènes. Au sein des MFI, les terrains permo-carbonifères forment des synclinaux pincés. De plus, le contact entre socle et couverture n'est pas un simple accident, mais il se divise en plusieurs accidents associés, formant les différentes écailles du secteur. L'accident de la Léchère (comme tous les autres accidents associés) est affecté par des plis dont les axes, espacés d'environ 500 m, plongent très légèrement vers le NE. Ce plan plissé, à grand rayon de courbure, finit par s'enraciner dans le plan de décollement basal situé entre 4 et 5 km de profondeur (Ménard, 1988 et Tardy *et al.*, 1999). L'épaisseur du Trias qui jalonne l'accident est très variable.

En ce qui concerne l'analyse de la fracturation, le socle est affecté par un réseau complexe de failles, fractures et veines qui rend possible les circulations aussi bien dans la direction SW-NE que NW-SE.

De bas en haut, l'ombilic glaciaire est constitué par des dépôts glacio-lacustres, recoupés par un écroulement ancien, puis par des dépôts fluvio-glaciaires de plus en plus grossiers et enfin par les alluvions récentes de l'Isère.

2. Conséquences sur les écoulements

Le réseau de fractures, développé dans les MFI, permet aux eaux de circuler dans les directions SW-NE et NW-SE avant de rejoindre les accidents associés à l'accident de la Léchère (figure II.39). La couverture sédimentaire carbonatée et marneuse constitue une barrière semi-imperméable. Les eaux, ainsi drainées, circulent au sein des contacts tectoniques en direction de la vallée de l'Isère, mais probablement aussi vers le SW (Maurienne) en rive gauche ou vers le NE en rive droite. Bien que l'étude géologique ait montré que les structures (axes de plis dans la couverture sédimentaire et axes des plis du plan chevauchant) plongent légèrement vers le NE, aucun argument ne permet de trancher pour définir une direction d'écoulement privilégiée au sein de cet accident. Sur la base des arguments géologiques, les deux versants peuvent donc participer à l'alimentation du système thermal. Le réseau de failles et fractures est le siège de circulations profondes qui se mettent en place sous l'effet de la différence de pression entre les sommets et la vallée de l'Isère. On observe alors des circulations au sein de l'accident principal aussi bien en sub-surface (eaux de la galerie EDF) qu'en profondeur (eau thermale). Au droit de la vallée de l'Isère, elles remontent en surface par l'intermédiaire de l'accident de la Léchère (du SE vers le NW). Les dépôts glacio-lacustres constituent une barrière imperméable à semi-imperméable, franchie par les eaux thermales grâce à la présence, en rive gauche, d'un écoulement ancien. Les eaux thermales se diffusent alors dans tout le remplissage et se mélangent avec les eaux froides superficielles.

Cette proposition de schéma de circulation nécessite d'être confortée par des arguments hydrodynamiques, géochimiques et thermiques.

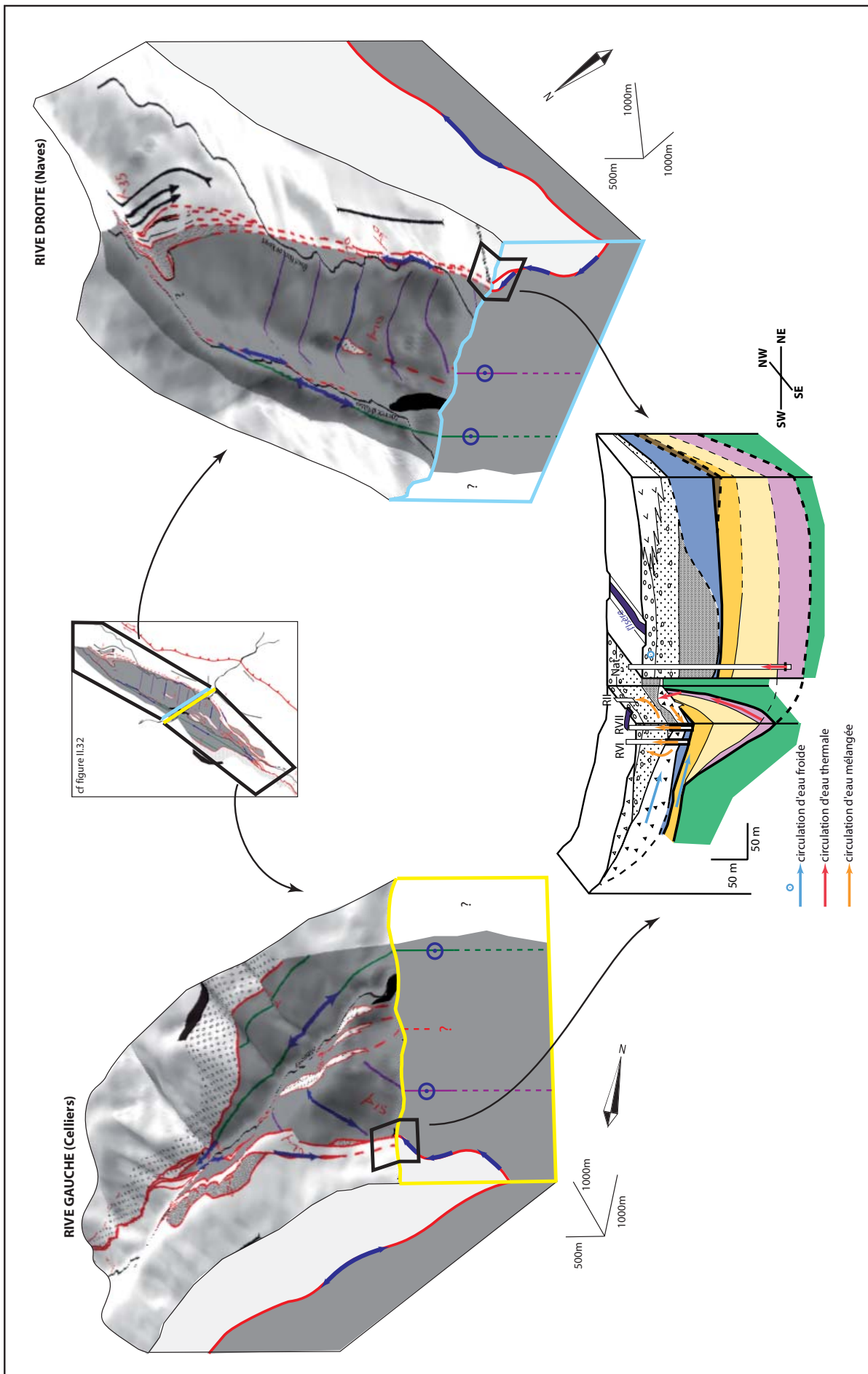


Figure II.39 : Blocs diagrammes schématiques de circulation sur les versants de Celliers et de Naves

Chapitre III : Aspects hydrodynamiques

Le chapitre III traite des aspects hydrodynamiques du système. Les entrées du systèmes (infiltration et pertes du réseau hydrographique) sont quantifiées. Les relations hydrodynamiques entre les aquifères présents dans la zone d'émergence thermique sont établies. Les réponses du système aux signaux d'entrée sont analysées.

Chapitre III : Aspects hydrodynamiques

A l'issue du chapitre sur la géologie, un schéma des circulations possibles a été proposé (figure II.39). Il nécessite d'être appuyé, entre autres, par des observations hydrodynamiques. Pour ce troisième chapitre, les investigations ont consisté à réaliser des mesures de débits sériés, à caractériser les comportements hydrodynamiques des différents aquifères de la zone d'émergence, ainsi qu'à enregistrer et interpréter les données d'entrée (pluviométrie) et de sortie (niveaux piézométriques et débits) du système. Ces observations ont permis d'évaluer les possibilités d'alimentation par le réseau hydrographique, de quantifier l'infiltration, de déterminer les propriétés hydrodynamiques des aquifères, de définir les relations hydrodynamiques entre les entrées et les sorties du système mais aussi entre les trois aquifères présents dans la zone d'émergence. A partir de tous ces éléments, un modèle conceptuel du comportement hydrodynamique du système est proposé en fin de chapitre.

I. Les données d'entrée

1. Les zones de perte et d'apport sur le réseau hydrographique

Les études précédentes (SOGREAH, 2001 et Debombourg, 2003) ont évoqué la possibilité d'une alimentation du système thermal par des pertes au niveau du réseau hydrographique. En effet, l'Eau Rousse ainsi que le Grand Nant de Naves traversent à plusieurs reprises le contact tectonique de la Léchère. Les mesures de débits sériés ont permis de vérifier cette hypothèse.

1.1. Le réseau hydrographique et son substratum

1.1.1) Le bassin versant de l'Eau Rousse

La vallée de l'Eau Rousse (**ER**) est encaissée, la ligne de crête limitant son bassin versant culmine à 2829 m au Grand Pic de la Lauzière (figure I.10). Sur sa rive gauche, le torrent de l'ER est alimenté par de nombreux affluents, soit d'amont en aval : le Ruisseau de la Rave, le Ruisseau de la Valette, le Nant Perou, le Nant Bridan, le Ruisseau de la Roche, le Ruisseau du Plan Villard et le Tartet (figure III.1). Sur la rive droite, les écoulements de surface sont beaucoup moins nombreux et drainent une plus petite surface.

Dans sa partie amont, l'ER circule sur les formations sédimentaires schisto-calcaires de la couverture dauphinoise, recouvertes en grande majorité par des dépôts glaciaires (figure III.1). Entre Celliers et le hameau du Crozat, l'ER traverse des écaillles tectoniques constituées de micaschistes et de terrains du Trias. Enfin dans la partie aval du torrent, l'eau circule au sein des micaschistes de Feissons-sur-Isère. En rive gauche, seuls le Tartet et le Ruisseau du Villard circulent exclusivement au sein du socle. Tous les autres affluents de la rive gauche circulent, dans leur partie amont, sur les terrains du socle (granite de la Lauzière, gneiss de Pussy Plan du Col et micaschistes de Feissons) puis traversent le(s) contact(s) tectoniques associés à l'accident de la Léchère. Dans la partie amont du bassin versant de l'ER, le substratum est très largement recouvert par des dépôts glaciaires. En rive droite, l'ensemble des écoulements se fait au sein des schisto-calcaires.

Plusieurs prises d'eau sont présentes sur ce bassin versant (figure III.1) : sur le Nant Bridan, le Nant Perou et sur l'ER. Le volume prélevé sur ces trois prises d'eau est regroupé au niveau de la prise de l'ER et transporté jusqu'à la retenue de la Coche par galerie souterraine. Une prise d'eau est également présente sous le hameau du Cudray.

1.1.2) Le bassin versant du Grand Nant de Naves

La vallée du Grand Nant de Naves (GNN) est peu encaissée, la ligne de crête limitant son bassin versant culmine à 2455m, à la Pointe du Dzonfié (figure I.10). A l'amont, le réseau est intensément ramifié tandis qu'à l'aval, le Grand Nant de Naves reçoit très peu d'affluents.

Les eaux de ce bassin versant circulent en totalité sur les terrains schisto-calcaires recouverts par des dépôts glaciaires et même glacio-lacustres à l'aval de Grand Naves (figure III.1). Dans la partie aval, le GNN traverse à plusieurs reprises le contact de la Léchère et circule sur une distance non négligeable (environ 4 km au total) au sein des micaschistes de Feissons.

Sur ce versant également, des aménagements hydroélectriques sont présents. L'eau du GNN est prélevée au niveau de Ronchat pour être acheminée par galerie souterraine vers la centrale de Feissons-sur-Isère.

1.2. Méthodologie

1.2.1) Plan des mesures de débits sériés

Le but des mesures de débits sériés est d'identifier les échanges entre le réseau hydrographique et son substratum, et plus particulièrement les pertes au niveau des contacts tectoniques. Pour cela, il est nécessaire de découper le réseau hydrographique en sections sur lesquelles sont mesurés un débit aval et la totalité des débits amont. La différence entre débit aval et débits amont nous indique s'il y a une perte vers le substratum ou alimentation du réseau hydrographique par les écoulements souterrains. Afin de s'approcher de conditions d'écoulement constantes, les mesures de chaque section sont réalisées le même jour et en absence de pluie. Les points de mesure ont été choisis de façon à encadrer les zones de contact anormal.

Le bassin versant de l'ER a donc été découpé en six sections et celui du GNN en deux sections (figure III.1). Chaque section comprend entre deux et cinq points de mesures principaux.

1.2.2) Les jaugeages

- L'injection instantanée de NaCl

Sur les deux bassins versants, les cours d'eau à jauger présentent des écoulements turbulents, typiques des torrents de montagne. Les jaugeages au micro-moulinet, pourtant les plus précis, ne peuvent pas être appliqués dans ce contexte. Seuls peuvent être mis en œuvre des jaugeages par mesure volumétrique pour les écoulements inférieurs à 10l/s et par dilution chimique pour les débits supérieurs à 10l/s. Parmi les méthodes de jaugeage par dilution chimique, la méthode par injection en continu de E110 (Fanget *et al.*, 2003) est apparue, dans un premier temps, comme la plus précise pour l'objectif recherché (identification de pertes). Cependant, le matériel nécessaire encombrant et la durée de mise en œuvre (2h) rendent cette méthode inadaptée aux mesures de débits sériés en milieu de montagne. Plus adaptée aux torrents de montagne (Jobard, 2005), la méthode par injection instantanée de NaCl a finalement été adoptée. Cette méthode consiste à injecter une masse (m) de traceur chimique (ici le NaCl) et de mesurer l'évolution de la concentration du traceur à l'aval de l'injection (Cosandey et Robinson, 2000 et Musy et Higy, 2004). Le débit est alors calculé grâce à la formule (2) :

$$Q = \frac{m}{\int c \cdot dt} \quad (2)$$

Q : débit, en l/s

m : masse de traceur injectée, en g

c : concentration en traceur dans le cours d'eau, en g/l

dt : intervalle de temps, en s

$$c = k (\chi_m - \chi_0) \quad (3)$$

χ_0 conductivité à 25°C du ruisseau avant l'injection

χ_m conductivité à 25°C du ruisseau après l'injection

k coefficient de corrélation entre conductivité à 25°C et concentration en NaCl

Le coefficient de corrélation k a été déterminé en laboratoire pour chaque conductimètre utilisé et pour chacune des campagnes réalisées.

- *Les conditions nécessaires sur le terrain*

La méthode choisie repose sur l'hypothèse que la concentration en sel est homogène sur toute la largeur du cours d'eau, à l'endroit où l'on mesure la conductivité. Il faut donc choisir judicieusement les points d'injection et de mesure afin d'être dans les meilleures conditions d'expérimentation. Pour cela, les règles suivantes ont été respectées sur le terrain, dans la mesure où les configurations le permettaient :

- 1) Une distance de bon mélange est définie au préalable de manière visuelle en injectant de la fluorescéine dans un des cours d'eau du secteur. Cette distance de 150 à 200m a servi de référence pour l'ensemble des cours d'eau jaugés.
- 2) Le point d'injection est placé à l'amont d'une zone de brassage de l'eau.
- 3) Les zones stagnantes sont évitées entre les points d'injection et de mesure.
- 4) Le point de mesure est placé dans un endroit relativement calme, si possible sur une section étroite, où les eaux se rassemblent.
- 5) Les mesures sont faites en plusieurs points de la section du cours d'eau afin de vérifier l'homogénéité transversale de la concentration en NaCl.

L'erreur classiquement admise pour cette méthode est de 20%. Toutes les mesures ont été réalisées dans les mêmes conditions et sont donc entachées de la même erreur. L'objectif de ces mesures n'est pas de quantifier les pertes ou les apports mais de mettre en évidence les zones d'échange possible.

1.3. Résultats

Deux campagnes de mesure ont été réalisées durant les étiages estivaux de 2005 et 2006 (résultats complets en annexe 4). La campagne de 2005 permet de déterminer, de façon qualitative, la nature des échanges entre le réseau hydrographique et le substratum (figure III.1). La campagne 2006 a deux objectifs : confirmer ces premiers résultats (figure III.1) et localiser plus précisément les zones de perte et d'apport identifiées (figure III.2).

Le GNN ne présente aucun échange avec son substratum dans sa partie aval (section 1). Sa partie amont (section 2) est marquée par des apports, vraisemblablement dus aux circulations d'eau au sein des dépôts quaternaires. Ces circulations d'eau dans les dépôts superficiels masquent la présence éventuelle de pertes vers le substratum rocheux.

Sur le bassin versant de l'ER, les sections 3 et 4 présentent des apports du même type, tandis que la partie aval (sections 1 et 2) est marquée par des phénomènes plus complexes.

Bien que celle-ci reste dans la fourchette d'erreur des 20%, la perte identifiée durant les deux campagnes sur la section 2 peut être considérée comme effective. La campagne de 2006 a permis de la localiser plus précisément au niveau du ruisseau du Colomban (figure III.2), juste avant sa confluence avec l'ER, au niveau du contact entre les micaschistes et l'écaille sédimentaire du Crozat.

La section 1, quant à elle, présente un apport en 2005 et une perte en 2006, tous deux compris dans la marge d'erreur (20%). Dans ce secteur, les débits mesurés ne permettent donc pas de caractériser l'échange entre le substratum et le réseau hydrographique. Par contre, les conductivités naturelles permettent de calculer la conductivité théorique du point aval de la façon suivante :

$$cth = \frac{\sum ci.Qi}{\sum Qi} \quad (3)$$

cth : conductivité théorique du point aval

ci : conductivité des affluents

Qi : débit des affluents

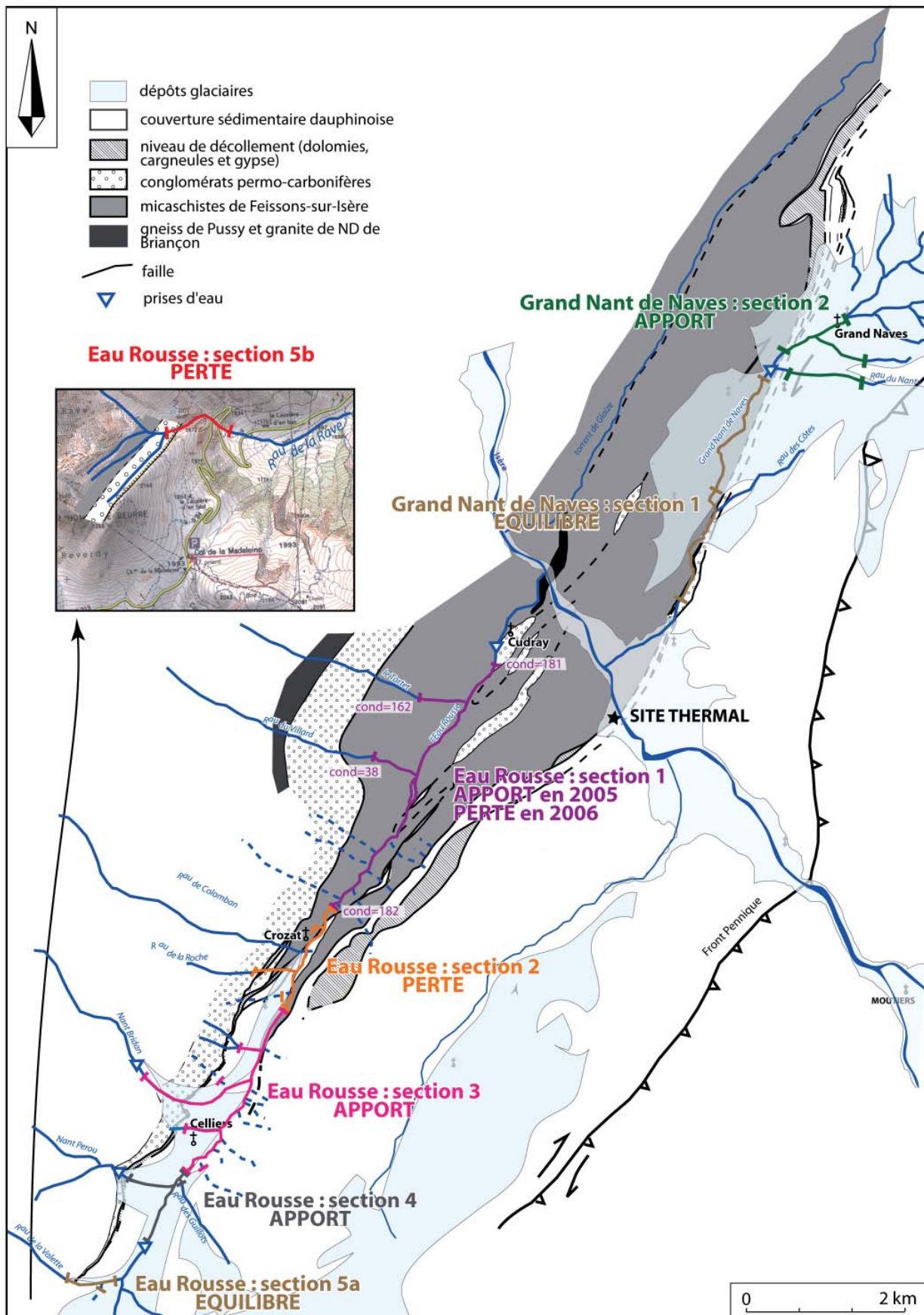


Figure III.1 : Echanges entre réseau hydrographique et substratum, carte synthétique réalisée à partir des résultats des deux campagnes de jaugeage 2005 et 2006 (résultats complets en annexe 4)

Sur la section 1 du bassin versant de l'Eau Rousse, sont indiquées les conductivités naturelles mesurées durant la campagne 2005, en $\mu\text{S}/\text{cm}$

Pour les deux campagnes, la conductivité mesurée au point aval est supérieure à sa conductivité théorique (tableau III.1). Ceci implique nécessairement qu'un apport minéralisé est présent sur la section 1.

	2005	2006
cond. aval mesurée	181	272
cond. aval théorique	132	177

Tableau III.1 : Conductivités aval mesurées et théoriques sur la section 1 de l'ER, années 2005 et 2006 (en $\mu\text{S}/\text{cm}$)

Afin de préciser cette observation, cette section a été découpée en six sous-sections lors de la campagne de 2006 (figure III.2). Une perte est identifiée au niveau de la source des îles et toutes les autres sous-sections sont marquées par des apports. La conductivité de l'ER augmente entre l'amont et l'aval de la sous-section (e) alors qu'elle ne présente pas d'anomalies entre les autres sous-sections. La zone d'apport minéralisé, précisée ici sur la sous-section (e), se situe donc au NW des petites écailles de roches sédimentaires. Si la perte située au niveau de la source des îles est effective, sa présence permettrait d'expliquer les résultats différents, observés sur la section totale lors des deux campagnes. En effet, la coexistence d'une perte et d'un apport minéralisé sur la section 1 peut faire basculer le bilan global d'un côté ou de l'autre en fonction de leur importance relative.

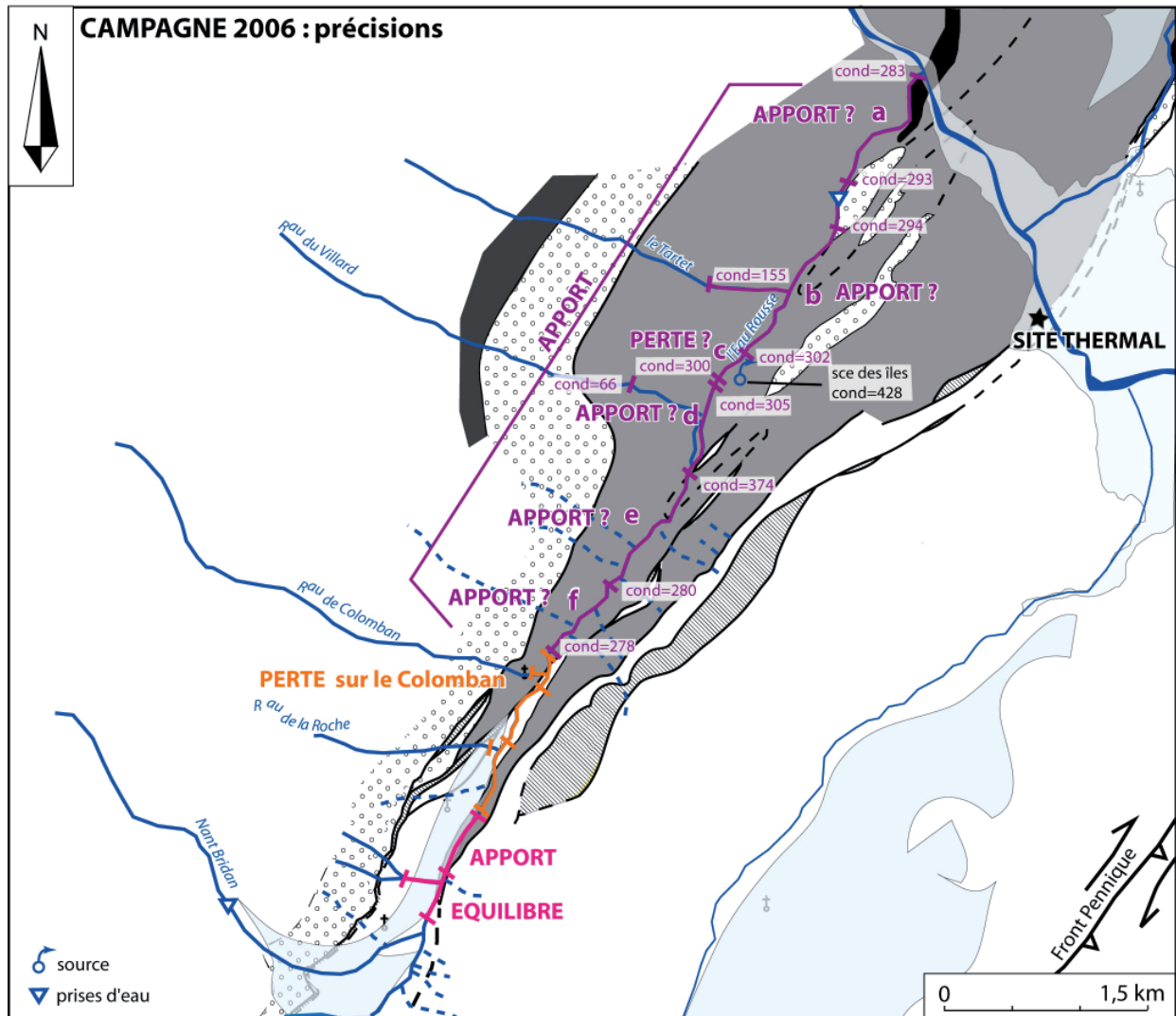


Figure III.2 : Précisions sur les échanges entre réseau hydrographique et substratum dans le bassin versant de l'Eau Rousse, campagne réalisée durant l'été 2006 (résultats complets en annexe 4), conductivités naturelles en $\mu\text{S}/\text{cm}$

La source des îles présente une conductivité ($428\mu\text{S}/\text{cm}$) supérieure à celle de l'ER ($300\mu\text{S}/\text{cm}$). Cette source, comme l'apport minéralisé identifié sur la sous-section (e), sont vraisemblablement marqués par une interaction avec des dépôts triasiques. Ces deux points doivent vraisemblablement participer à la résurgence de la perte identifiée précédemment sur la section 2, bien que le lien entre les deux ne soit pas clairement établi. L'écaille sédimentaire du Crozat, qui se prolonge au NE par des petites écailles sédimentaires puis par les plis pincés de Permo-Carbonifère, jouerait donc ici un rôle important dans ces circulations souterraines superficielles, bien que la continuité entre ces différentes structures n'ait pas été observée lors de l'étude géologique.

Pour finir, la section 5b a permis de localiser une légère perte sur le ruisseau de la Rave, au niveau de l'Homme de Beurre, où il traverse le contact tectonique de la Léchère.

1.4. Conclusion

La partie aval du bassin versant du GNN ne présente aucune perte ou apport. Sur le bassin versant de l'ER, deux pertes ont été clairement identifiées sur le ruisseau de la Rave près de l'Homme de Beurre et sur le Colomban au niveau du Crozat. La présence d'une perte au niveau de la source des îles reste hypothétique. Des apports par le substratum sont présents au NW des petites écailles sédimentaires (sous-section (e) de la section 2). Le réseau hydrographique est donc marqué par la présence de pertes sans qu'il ne puisse être établi si ces pertes alimentent effectivement le système thermal ou si elles participent uniquement à des circulations superficielles dans le versant, mettant en cause l'écaille sédimentaire du Crozat qui se prolonge au NE par les plis pincés permo-carbonifères.

2. L'infiltration

Les données enregistrées par les stations météorologiques des deux versants permettent d'établir des gradients altitudinaux de pluviométrie et de température, utilisés ensuite pour évaluer l'infiltration sur les deux bassins versants.

2.1. Les stations météorologiques

Sur le secteur de la Léchère, trois stations Météo France sont présentes (figure I.10 et tableau III.2). La station de St-Jean-de-Belleville (n°732440001) est trop éloignée de notre secteur. Les stations de Moûtiers (n°731810001) et Grand Naves (n°73870002) permettent d'avoir les données de pluviométrie dans la vallée de l'Isère ainsi que sur la rive droite à 1340m d'altitude. Aucune station Météo France n'étant présente en rive gauche de l'Isère, une station a été installée le 29/06/05, au niveau du village de Celliers, à 1400m d'altitude (figures I.10 et III.3). Cette station est équipée d'un datalogger Campbell® CR10X, alimenté par une batterie 7A-12V et par un panneau solaire. Cette centrale d'acquisition et de stockage des données permet d'enregistrer, avec un pas de temps de 15 minutes, la température et la pluviométrie. La température est mesurée par une sonde de température Campbell® et la pluviométrie grâce à un pluviomètre à augets basculeurs. On dispose maintenant de données climatiques dans la vallée de l'Isère ainsi que sur les deux versants de notre étude.

Nom de la station	n° de la station	coordonnées géographiques en Lambert II étendu		altitude en m	période d'enregistrement	type de station
		X	Y			
Moûtiers	73181001	928,2	2062,4	480	1954-actuel	station bénévole manuelle
La Léchère	73187002	925,8	2070,5	1340	1959-2007	station bénévole manuelle
Saint-Jean de Belleville	73244001	924,1	2056,1	1050	1952-actuel	station bénévole manuelle

Tableau III.2 : Localisation et caractéristiques des stations Météo France présentes du secteur de la Léchère

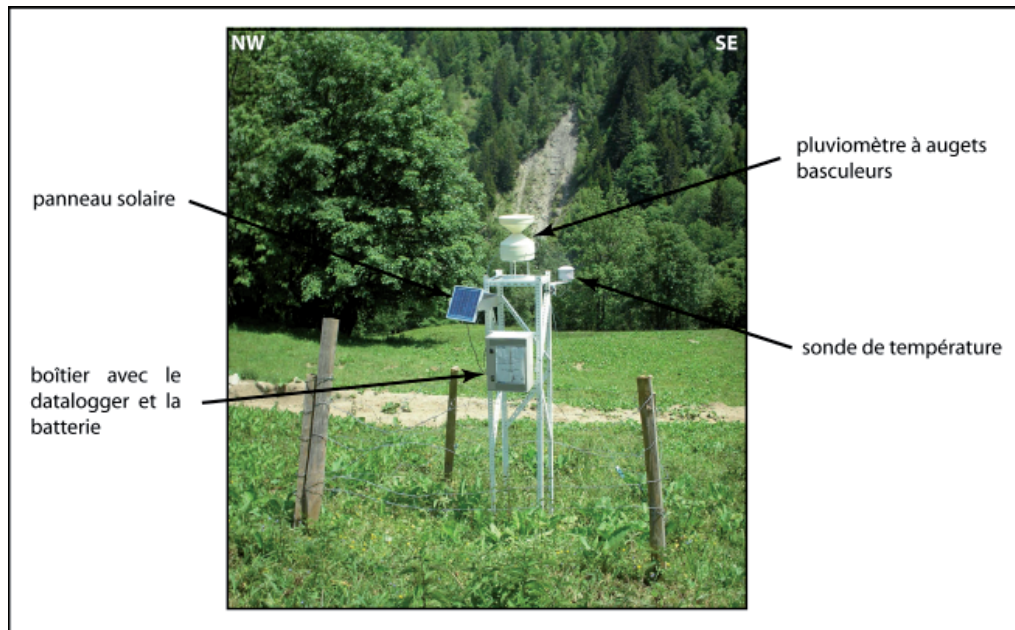


Figure III.3 : La station météorologique EDYTEM, installée à Celliers (1400 m d'altitude)

Cependant, les deux stations n'enregistrent pas le même type de données. La station Météo France de Grand Naves mesure la quantité de pluie équivalente ; c'est-à-dire le volume total d'eau, précipité aussi bien sous forme liquide que solide. La station EDYTEM de Celliers, quant à elle, n'est pas équipée pour mesurer la pluie équivalente. Pendant la période hivernale, la neige se dépose sur le pluviomètre et le signal n'est enregistré que lorsque cette neige fond (une partie du signal est perdue par débordement et/ou sublimation). La station de Celliers enregistre donc le signal au moment où l'eau s'infiltré effectivement dans le sol (lame d'eau) tandis que la station de Grand Naves enregistre le signal alors que l'eau est encore sous forme solide (pluie équivalente). La station de Naves enregistre la hauteur de neige tombée en 24h et la station de Celliers la température.

2.2. Evaluation des gradients altitudinaux et de la pluie efficace

Pour calculer les gradients altitudinaux, on dispose des données de la station de Moûtiers. Les gradients annuels sont alors calculés pour la pluviométrie sur les deux versants (tableau III.3). Le gradient est plus faible sur le versant de Naves. Quant au gradient altitudinal de température, il ne peut être calculé que sur le versant de Celliers où il est de $-0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ en moyenne.

a)			b)			
	Celliers	Moûtiers	t°C moyenne à Celliers	t°C moyenne à Moûtiers	gradient en °C/100m	
altitude en m	1400	480	juil.-05	14,8	22	-0,8
pluviométrie annuelle en mm	1231	843	août-05	12,8	20,7	-0,9
gradient pluviométrie /an	42mm/100m		sept.-05	11,5	18,3	-0,7
			oct.-05	9,6	13,4	-0,4
			nov.-05	1,8	5,4	-0,4
			déc.-05	-4,0	-2,1	-0,2
			janv.-06	-1,4	-0,2	-0,1
			févr.-06	-2,2	1,8	-0,4
			mars-06	0,5	5,5	-0,5
			avr.-06	5,7	11,8	-0,7
			mai-06	9,7	15,9	-0,7
			juin-06	14,5	20	-0,6
			moyenne	6,1	11,0	-0,5

Tableau III.3 : a) Gradients altitudinaux annuels de pluviométrie sur les versants de Celliers et Naves et b) Gradients altitudinaux mensuels de température sur le versant de Celliers (juillet 2005 à juin 2006)

La pluie efficace est égale à la pluviométrie à laquelle on retranche l'évapotranspiration. L'évapotranspiration résulte de tous les phénomènes d'évaporation des sols et du couvert végétal. Elle dépend de plusieurs paramètres tels que les conditions climatiques (température, ensoleillement, humidité de l'air, vent), la nature des sols ou encore le couvert végétal.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité maximale d'eau qui peut être évaporée et transpirée. Dans le contexte du secteur d'étude et avec les données disponibles, l'évaluation de l'ETP par les formules de Turc (1961) (figure III.4) est plus adaptée que celles de Penman-Monteith (Penman, 1948 et Monteith, 1981) pour évaluer l'ETP. La station de Bourg-St-Maurice (n°73054001), située à l'Est de notre secteur d'étude (figure I.10), enregistre les temps d'insolation qui sont convertis en rayonnement global (données Météo France). L'ETP calculée à partir de la formule annuelle est sous-estimée (tableau III.4), l'ETP serait donc d'environ 530mm à la station de Celliers, pour l'année 2005-2006.

Formule de Turc annuelle :

$$ETP = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (4)$$

ETP : évapotranspiration potentielle annuelle en mm
 P : précipitations annuelles en mm
 $L = 330 + 25 t + 0.05 t^3$
 t : température moyenne annuelle en °C

Formule de Turc mensuelle :

$$ETP = 0.4(R_g + 50) \frac{t}{t+15} \quad (5)$$

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle en mm
 R_g : rayonnement global mensuel en cal/cm²/jr
 t : température moyenne mensuelle en °C

Formule de Turc décadaire :

$$ETP = 0.13(R_g + 50) \frac{t}{t+15} \quad (6)$$

ETP : évapotranspiration potentielle décadaire en mm
 R_g : rayonnement global décadaire en cal/cm²/jr
 t : température moyenne décadaire en °C

Figure III.4 : Formules de Turc (1961) utilisées pour évaluer l'évapotranspiration potentielle

ETP	Turc annuel	Turc mensuel	Turc décadaire
juil.-05		105	102
août-05		82	80
sept.-05		62	61
oct.-05		43	42
nov.-05		8	14
déc.-05		0	0
janv.-06		0	0
févr.-06		0	0
mars-06		0	9
avr.-06		43	41
mai-06		75	73
juin-06		116	111
juil-05 à juin-06	355	534	533

PE	Turc annuel	Turc mensuel	Turc décadaire
juil.-05		5	43
août-05		7	0
sept.-05		0	0
oct.-05		29	5
nov.-05		19	14
déc.-05		41	41
janv.-06		25	25
févr.-06		77	77
mars-06		304	294
avr.-06		89	90
mai-06		142	144
juin-06		0	0
juil-05 à juin-06	876	738	734

Tableau III.4 : Valeurs des Evapotranspirations Réelles (ETP) et des Pluies Efficaces (PE) en mm à Celliers (1400m) calculées à partir des formules de Turc annuelle, mensuelle et décadaire

L'évapotranspiration réelle (ETR) est la quantité d'eau qui s'évapore des sols et de la végétation. Elle dépend du couvert végétal, de son stade de développement et de l'humidité du sol (RFU : réserve facilement utilisable). Elle est calculée à partir de l'ETP, de la RFU (classiquement fixée à 100mm) et de la pluviométrie. On obtient alors une pluie efficace (PE) qui représente environ 60% de la pluie brute (tableau III.4).

3. Conclusion

A l'issue de cette partie, le bilan des pluies efficaces (PE) entrant sur les bassins versants de l'ER et du GNN peut être établi (tableau III.5). Du fait de sa surface et de sa pluviométrie moins importante, le bassin versant du GNN intercepte moins de PE que le bassin versant de l'ER. Les deux bassins versants totalisent 7760m³/h de PE. Ce volume se répartit ensuite entre le ruissellement, les circulations souterraines superficielles et les circulations profondes.

Le ruissellement est plus intense sur le bassin versant de l'ER que sur celui du GNN. Dans le bassin versant de l'ER, les pertes identifiées sur le réseau hydrographique (environ 150m³/h au total) ne représentent que quelques % du ruissellement.

Parmi les circulations souterraines superficielles, une partie rejoint le réseau hydrographique (zones d'apport identifiées sur l'ER). L'autre partie émerge dans les sources de versant encadrant la vallée de l'Isère (source de la Route de la Forêt, par exemple).

Les circulations profondes, émergeant dans la zone d'exploitation thermique, ne représentent que quelques % des circulations souterraines ayant lieu dans les deux bassins versants.

Bassin versant de l'Eau Rousse		Bassin versant du Grand Nant de Naves	
altitude médiane	1700m	altitude médiane	1600m
surface	62km ²	surface	31,1km ²
P_{am}	1357mm	P_{am}	1143mm
t°C_{am}	4,6°C	t°C_{am}	5,1°C
ETP_{am}	425mm	ETP_{am}	428mm
PE_{am} (Turc annuelle)	932mm	PE_{am} (Turc annuelle)	715mm
PE_{am} (-15%)	792mm	PE_{am} (-15%)	608mm
PE_{am} volumique	5600m ³ /h	PE_{am} volumique	2160m ³ /h
R (étiage)	4000m ³ /h	R (étiage)	650m ³ /h

P : pluviométrie
 ETP : Evapo-Transpiration Potentielle
 PE : Pluie Efficace
 R : Ruissellement
 am : à l'altitude médiane

Tableau III.5 : Bilan des Pluies Efficaces (PE) et du Ruissellement (R) sur les bassins versants de l'Eau Rousse et du Grand Nant de Naves

II. Caractérisation du comportement hydrodynamique des différents aquifères

Les essais par pompage et les observations réalisées lors de la mise en exploitation des différents forages mènent à la définition des relations hydrodynamiques entre les aquifères présents dans la zone d'émergence (aquifère alluvial, aquifère thermal et aquifère de l'écroulement ancien). Dans un second temps, l'analyse des réponses du système aux signaux d'entrée permet de caractériser le comportement hydrodynamique de l'ensemble des écoulements superficiels et profonds.

1. Les caractéristiques des différents aquifères présents dans la zone d'émergence

1.1. Estimation de la transmissivité

Pour chaque mise en exploitation, des essais par paliers de courte durée (essais de puits) et des essais de longue durée (essai de pompage) ont été réalisés individuellement sur chaque forage. Les essais par paliers permettent de définir les caractéristiques de l'ouvrage au moment de l'essai et le débit d'exploitation tandis que les essais par pompage permettent de caractériser l'aquifère capté (transmissivité T et coefficient d'emmagasinement S). On ne s'intéressera ici qu'aux essais de longue durée (tableau III.6). Nous reprenons les interprétations effectuées par les bureaux d'étude de l'époque (Eberentz, 1987, Eberentz et Vaysse, 1990 et Jerphanion et Corrignan, 1996) (annexe 5). Ces interprétations ont été réalisées à partir de la formule de Theis (1935) (in Leven et Dietrich, 2006). L'application de cette méthode d'interprétation nécessite des conditions très restrictives : (i) l'aquifère est captif, homogène, isotrope, de même épaisseur et d'extension latérale infinie ; (ii) le puits est complet, de petit diamètre, sans perte de charge et à débit constant. Bien que ces conditions soient rarement réunies, cette méthode reste, encore aujourd'hui, beaucoup utilisée dans le domaine de l'exploitation de l'eau souterraine. Lors des essais réalisés sur le site, les variations de niveau piézométrique ont été enregistrées directement dans le forage pompé et non pas dans un piézomètre d'observation. Cette configuration implique que seules les valeurs de T peuvent être retenues comme valeurs moyennes de la transmissivité des aquifères captés et les valeurs de S doivent être rejetées (Renard, 2005). On peut alors visualiser la répartition de cette transmissivité moyenne, conforme à la structure géologique du secteur d'émergence (figure III.5). Ainsi, les alluvions récentes de l'Isère (RIV et RV) présentent une transmissivité de $2,5$ à $4,5 \cdot 10^{-2}$ m^2/s ; soit une conductivité hydraulique de $1,25$ à $2,25 \cdot 10^{-3}$ m/s si l'on prend une épaisseur d'environ $20m$ pour les alluvions grossières. Les traçages réalisés par L. Somméria (1998) ont permis de définir une conductivité hydraulique du même ordre de grandeur (entre 2 et $5 \cdot 10^{-3}$ m/s). Le forage Olod présente une transmissivité légèrement plus faible ($1 \cdot 10^{-3}$ m/s), vraisemblablement due à la position de la crépine dans les dépôts fluvio-glaciaires plus fins (figure III.5). D'après notre interprétation (chapitre II, § V.4), les forages RVI et RVII captent les eaux thermales au sein d'un écroulement ancien, servant de zone de transfert entre l'aquifère thermal et les formations fluvio-glaciaires. La forte hétérogénéité de cet écroulement est certainement responsable de la différence importante entre les deux valeurs de transmissivité estimées ($3 \cdot 10^{-3}$ m/s pour RVI et $5 \cdot 10^{-4}$ m/s pour RVII). Les crépines du forage RX captent vraisemblablement des eaux issues aussi bien des alluvions anciennes que de l'écroulement ancien et du Trias. La valeur de transmissivité obtenue, qui représente une valeur moyenne pour ces trois aquifères, ne peut donc pas apporter des informations précises.

source	forage	prof.	aquifère capté	durée du palier	débit	rabattement	T en m ² /s	S
Eberentz (1987)	RVI	71,5m	écroulement ancien +Lias	31h	31m ³ /h	5m	2,5.10 ⁻³	5.10 ⁻³
	RVII	80m	écroulement ancien	24h	44m ³ /h	32m	4,75.10 ⁻⁴	1.10 ⁻³
Eberentz et Vaysse (1990)	RIV	13m	alluvions	21h	44m ³ /h	1,5m	2,37.10 ⁻²	2,98.10 ⁻¹³
	RV	22,6m	alluvions	4jrs	47m ³ /h	1,2m	4,6.10 ⁻²	2,52.10 ⁻²²
	Olod	21m	alluvions	15h	12m ³ /h	6m	1,18.10 ⁻³	1,5.10 ⁻⁷
	RVI	71,5m	écroulement ancien +Lias	16h	28m ³ /h	5m	2,78.10 ⁻³	7,92.10 ⁻⁷
Jerphanion et Corrignan (1996)	RX	105m	alluvions + écroulement ancien + Trias	27h	60m ³ /h	2,5m	3,1.10 ⁻³	

Tableau III.6 : Résultats des essais par pompage réalisés sur les forages thermaux du site de la Léchère
 T : transmissivité et S : coefficient d'emmagasinement

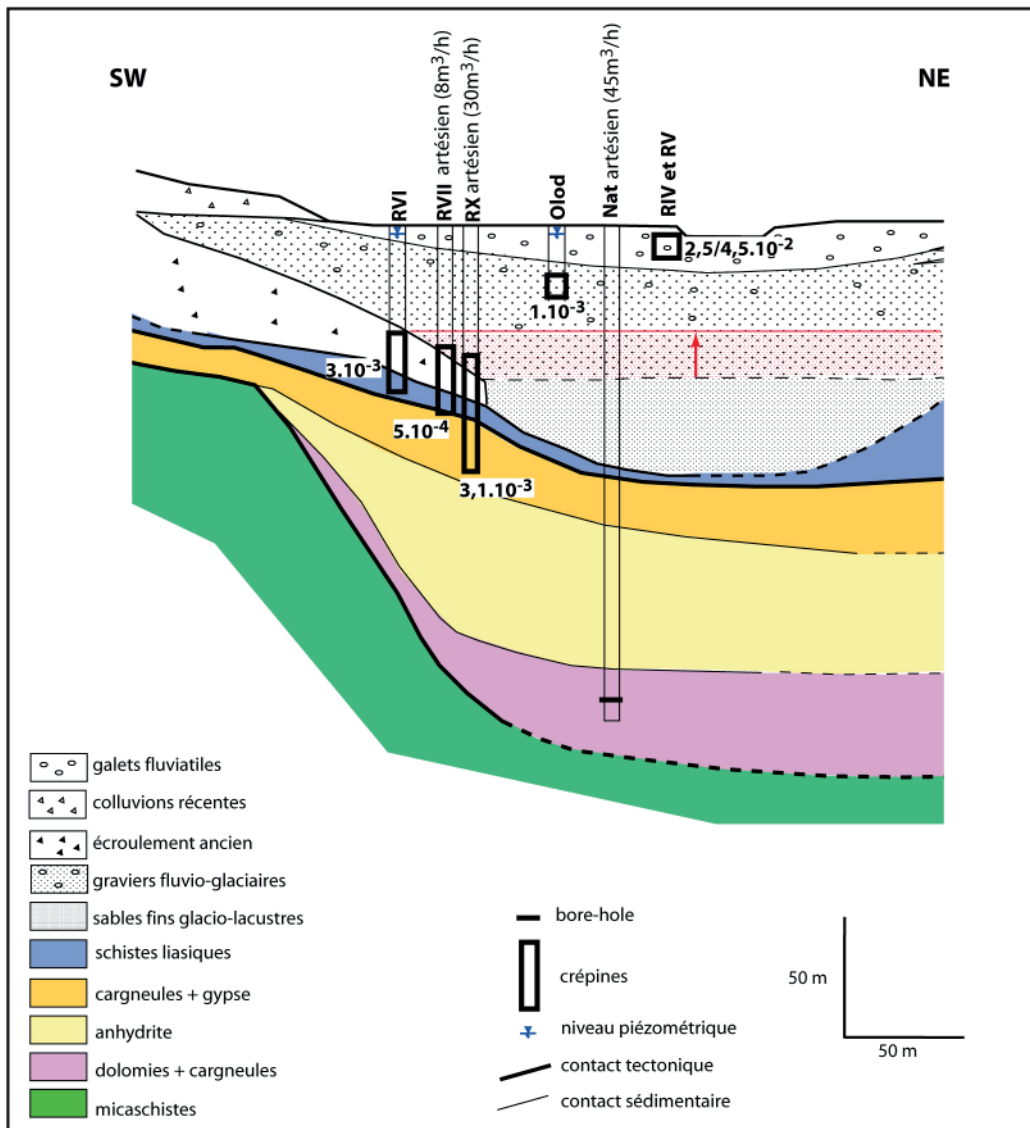


Figure III.5 : Répartition des transmissivités (en m²/s) obtenues par les essais par pompage sur les forages Olod, RIV, RV, RVI, RVII et RX ainsi que des charges et artésianismes observés au niveau des forages RVI, RVII, RX et Natacha au moment de leur réalisation : implication sur la définition de la structure géologique (en rouge)

1.2. Relations hydrodynamiques entre les points d'observation

Les observations relevées lors de la réalisation des forages et des essais par pompage permettent de mettre en évidence quatre points : les interférences entre les différents forages, la semi-captivité de l'aquifère constitué par l'écroulement ancien, l'isolement hydraulique de l'écroulement par rapport à la nappe alluviale et la continuité hydraulique entre cet écoulement et l'aquifère thermal.

1) L'interprétation des essais simultanés par pompage, réalisés sur le site, reste délicate. En effet, le détail des conditions de pompage n'est pas toujours très clair et les suivis temporels comprennent, au mieux, une mesure par heure. Quoiqu'il en soit, chaque rapport conclut que les interférences hydrodynamiques entre les forages profonds (RVI, RVII, RVIII, RIX et Nat), d'une part, et les forages plus superficiels (RII, RIII, RIV et RV), d'autre part, sont négligeables. D'un point de vue dynamique, les aquifères superficiels (alluvions et dépôts fluvio-glaciaires) et les aquifères profonds (écroulement et aquifère thermal) sont donc indépendants. Par contre, les interférences entre les forages superficiels, eux-mêmes, sont de l'ordre de quelques dizaines de cm et il en est de même pour les forages profonds (Eberentz, 1987, Eberentz et Vaysse, 1990 et Jerphanion et Corrignan, 1996).

2) L'analyse de l'état de charge des différents forages, observé au moment de leur réalisation, permet de compléter le modèle géologique de la zone d'émergence (figure III. 5). En effet, seuls les forages profonds RVII, RX et Natacha se sont révélés artésiens au moment de leur réalisation, avec des débits artésiens respectifs de 8, 30 et 45m³/h. Les forages RVI, RVIII et RIX, quant à eux, n'étaient pas artésiens. Les forages RVIII et RIX n'ont pas capté l'aquifère thermal mais des eaux superficielles. Par contre, le forage RVI se trouve dans une position comparable à celle de RVII. Cette observation a des implications sur la définition de la structure géologique de la zone d'émergence. En effet, le passage aux dépôts fins glacio-lacustres est progressif et il ne peut être identifié exactement par l'analyse des coupes des forages (chapitre II, §V.3). Mais d'après les données hydrodynamiques, il apparaît que les dépôts fins surmontent l'écroulement ancien jusqu'au forage RVII. La captivité des eaux de l'écroulement ancien, à cet endroit, explique alors l'artésianisme des forages RVII et RX. Dès que l'on se déplace vers le versant SW, l'écroulement ancien n'est plus captif et le forage RVI présente alors un niveau piézométrique en équilibre avec celui de la nappe alluviale.

3) Les essais par pompage réalisés en 1987 amènent d'autres éléments que les caractéristiques hydrauliques des aquifères, décrites dans le paragraphe précédent. En effet, pour des débits pompés et des temps de pompage proches (tableau III.6), le rabattement dans le forage RVII (32m) est beaucoup plus important que dans le forage RVI (2m). De plus, à l'issue du pompage dans RVI, celui-ci présente une légère diminution de température et conductivité tandis que, pour le forage RVII, la mise en pompage n'implique pas ou peu de variation de ses caractéristiques physico-chimiques (tableau III.7). Pour résumer, le pompage dans le forage RVI mobilise l'eau de la nappe alluviale sans diminuer la charge, tandis que le pompage dans le forage RVII fait diminuer la charge de manière importante sans mobiliser l'eau de la nappe alluviale. Les deux forages présentent donc des comportements très différenciés. La mobilisation de l'eau de la nappe alluviale par le forage RVI est logique puisque, au niveau de celui-ci, l'écroulement ancien est directement en contact avec les dépôts fluvio-glaciaires. En ce qui concerne le forage RVII, la forte diminution du niveau piézométrique est vraisemblablement due à l'isolement partiel de l'écroulement par rapport aux dépôts fluvio-glaciaires et à l'éloignement du forage par rapport au griffon thermal.

4) Un essai par pompage a été réalisé sur les forages RVII et Natacha en mars 2003. Les résultats de cet essai (figure III.6) ont permis d'observer que les variations de niveau dans les deux forages sont

	RVI		RVII	
	t°C	cond.	t°C	cond.
début pompage	45,2	2700	58	3360
fin pompage	44,4	2500	57,8	3310
différence	-0,8	-200	-0,2	-50

Tableau III.7 : Evolution de la température (°C) et de la conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des forages RVI et RVII pendant les essais par pompage de 1987 (Eberentz, 1987)
pour les débits pompés, la durée du pompage et le rabattement, voir tableau III.6

complètement synchrones. L'aquifère thermal et l'éroulement ancien sont donc en continuité hydraulique. La limite entre les deux serait alors complètement perméable et ne correspondrait pas à une limite drainante. La différence de niveau piézométrique entre les deux forages ne serait due qu'aux pertes de charge ayant lieu pendant la remontée jusqu'au fond de la vallée glaciaire, puis dans l'éroulement ancien. Il est également à noter qu'une augmentation du débit de Natacha de $8\text{m}^3/\text{h}$ provoque une diminution des niveaux de 64cm (débit spécifique de $12,5\text{m}^2/\text{h}$) tandis qu'une augmentation du débit de RVII de $1,3\text{m}^3/\text{h}$ provoque une diminution des niveaux de 15cm (débit spécifique de $8,6\text{m}^2/\text{h}$). Cette différence de débit spécifique entre les deux forages indique que l'aquifère thermal capté par le forage Natacha a une perméabilité plus forte que l'éroulement capté par RVII.

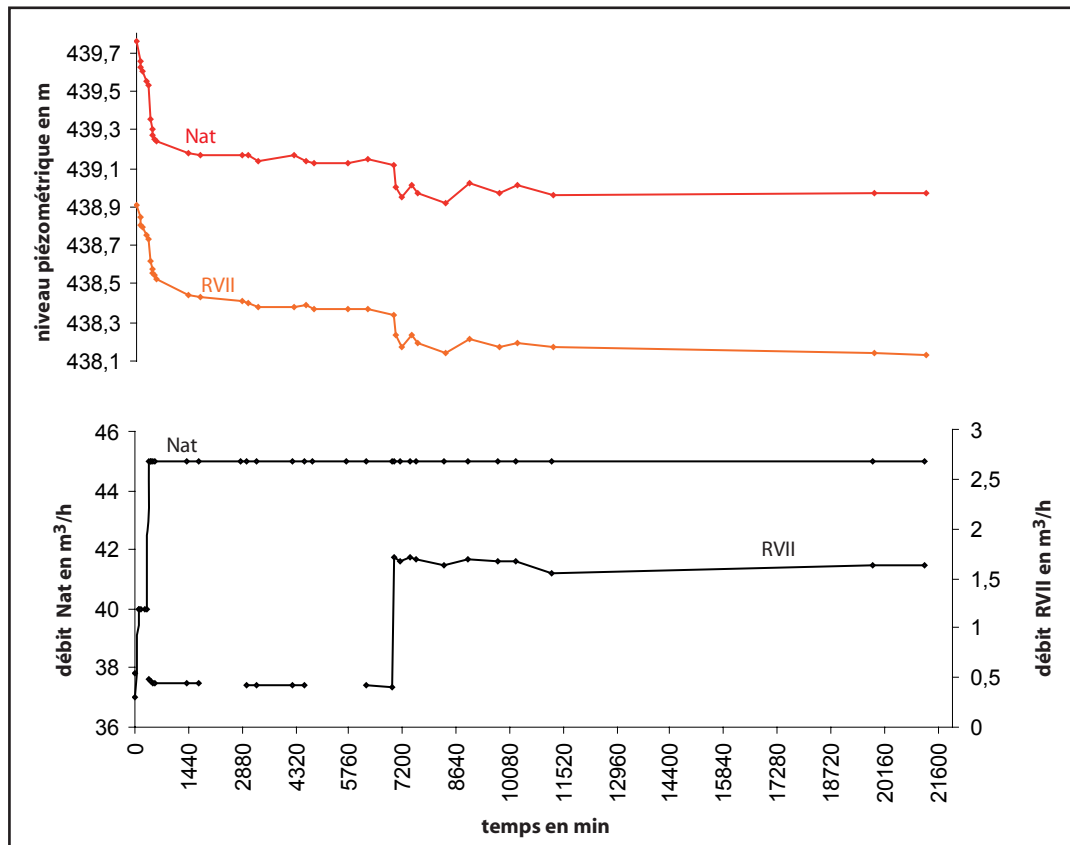


Figure III.6 : Essai par pompage réalisé sur les forages Natacha et RVII en mars 2003

2. Les réponses du système aux signaux d'entrée

Grâce aux suivis réalisés dans la zone d'émergence ainsi qu'à la station installée dans la galerie EDF, nous disposons de chroniques des variations de l'état de charge (débit ou niveau piézométrique), à l'échelle de l'année hydrologique, pour les trois aquifères présents dans la zone d'émergence.

2.1. Dans la zone d'émergence

2.1.1) L'acquisition des données

Dans la zone d'émergence, le dispositif d'enregistrement a été mis en place puis géré par les exploitants et le bureau d'étude SOGREAH. Depuis fin 1999, le débit, le niveau piézométrique, la température et la conductivité sont enregistrés en continu sur les forages RII, RVII et Natacha. Le forage RII a été cimenté en 2005. Le niveau de l'Isère a également été suivi grâce à une station limnimétrique EDF jusqu'en 2004. Les piézomètres ont été suivis tous les jours jusqu'en 2003 puis de façon ponctuelle jusqu'en septembre 2006. Sur ces six années d'enregistrement (figure III.7), les débits de Natacha, RVII et RII sont maintenus

respectivement à 45m³/h, 0,5m³/h et 1m³/h, sauf événements exceptionnels (ouverture des vannes, débitmètre défectueux ou arrêt du pompage). Les variations des niveaux piézométriques des forages peuvent donc être considérées comme des variations naturelles de l'état de charge.

2.1.2) Les résultats (figure III.7)

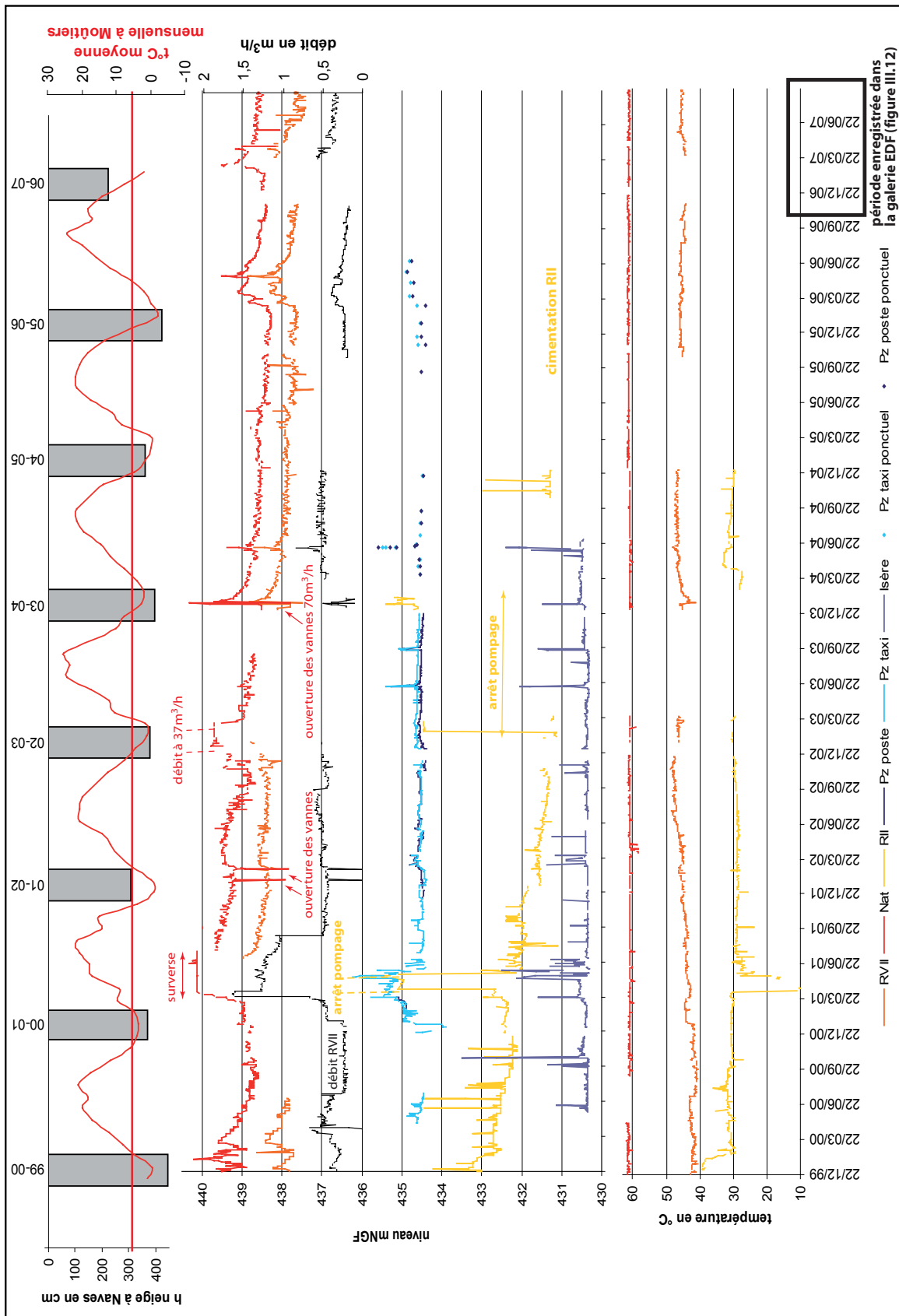


Figure III.7 : Niveaux piézométriques suivis dans la zone d'émergence thermique (Natacha, RVII, RII, Pz taxi, Pz poste, Isère) du 22/12/00 au 17/09/07
 débit de Natacha 45m³/h, débit de RVII variable, débit de RII 1m³/h, les périodes sans mesure sont dues à des problèmes de fonctionnement du système NAPAC

Les forages Natacha et RVII, captant respectivement les eaux dans l'aquifère thermal et dans l'éroulement ancien, présentent les mêmes variations piézométriques, comme on l'avait déjà observé au paragraphe II.1.2. De 1999 à 2006, la tendance générale montre une diminution de 0,5 m sur les deux niveaux piézométriques, soit une diminution moyenne de 10cm/an. Cette diminution progressive du niveau de l'aquifère profond est vraisemblablement due à la mise en exploitation du forage Natacha et ne semble pas stabilisée. A cette tendance générale, s'ajoutent des variations saisonnières avec des pics au printemps, en réponse à la fonte nivale. L'amplitude de ces pics n'est pas la même chaque année, et elle est fonction de l'intensité de la recharge annuelle (hauteur de neige tombée durant l'hiver), de la durée de la période de fonte, mais aussi du débit de chaque forage et du niveau piézométrique de la nappe alluviale. Ainsi, l'année 2001, durant laquelle le forage Natacha était en surverse (augmentation du niveau de Natacha supérieur à 1m), est exceptionnelle. En effet, l'année est très enneigée (335cm à Naves), le forage RII est arrêté et le niveau de la nappe alluviale a fortement augmenté. L'augmentation du débit de RVII jusqu'à 1,5m³/h n'a pas permis de faire diminuer rapidement les niveaux piézométriques.

L'année 2002, plus faiblement enneigée et dans des conditions d'exploitation normales (pompage sur RII), montre un pic de plus faible amplitude (0,5m). Durant l'hiver 2003, le débitmètre du forage Natacha était défectueux et le débit réel était de 37m³/h. L'enregistrement de cette année est donc perturbé par cette diminution du débit et le pic du printemps reste faible. Les années 2004 et 2005, peu arrosées (figure I.14), présentent des pics de très faible amplitude (<0,5m) alors que les deux années suivantes (2006 et 2007) retrouvent des amplitudes importantes (1m).

Pour les années 2006 et 2007, l'enregistrement des lames d'eau grâce à la station de Celliers permet d'analyser les réponses du système aux signaux d'entrée. Les coefficients d'intercorrélation entre lames d'eau et niveau de Natacha restent inférieurs à 0,2 pour les deux années d'observation 2006 et 2007 (figure III.8). En effet, les réponses du système se chevauchent entre elles (figure III.9 et III.10). Pour déterminer le temps de réponse du système par des corrélogrammes croisés, il faudrait d'abord différencier la réponse

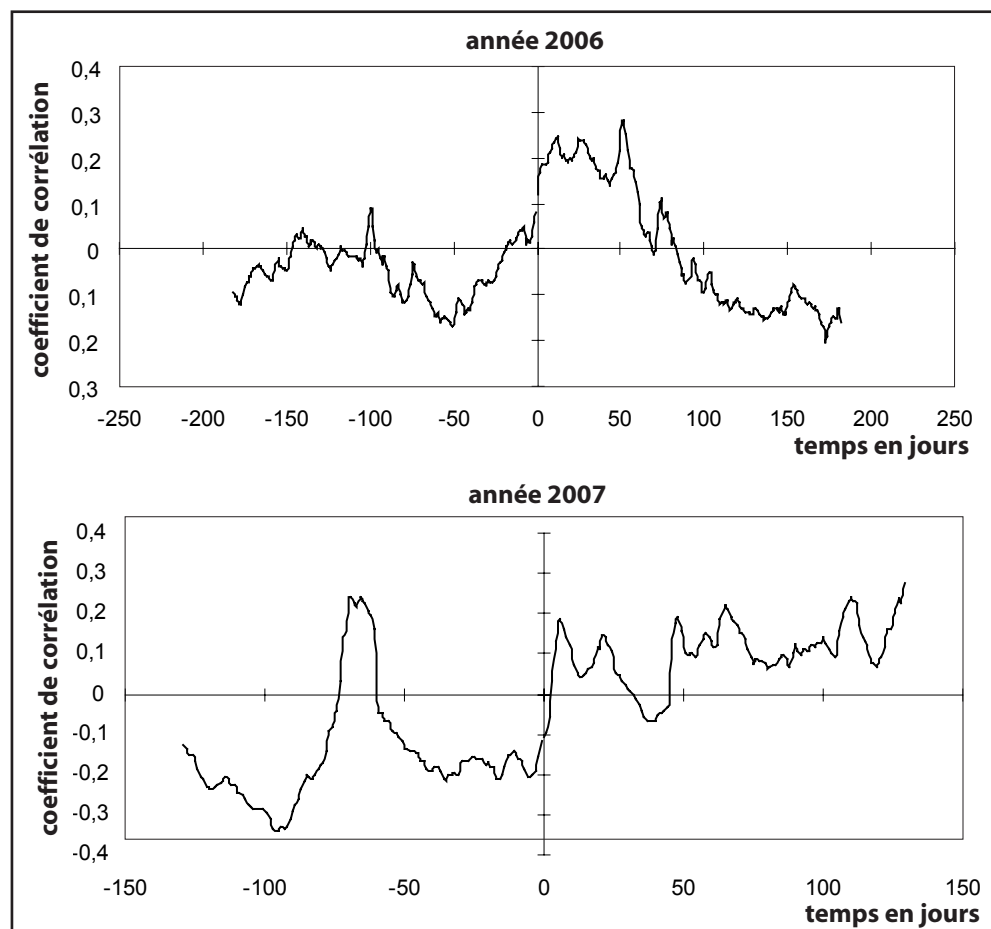


Figure III.8 : Corrélogrammes croisés entre lame d'eau à Celliers et niveau de Natacha pour les années 2006 et 2007

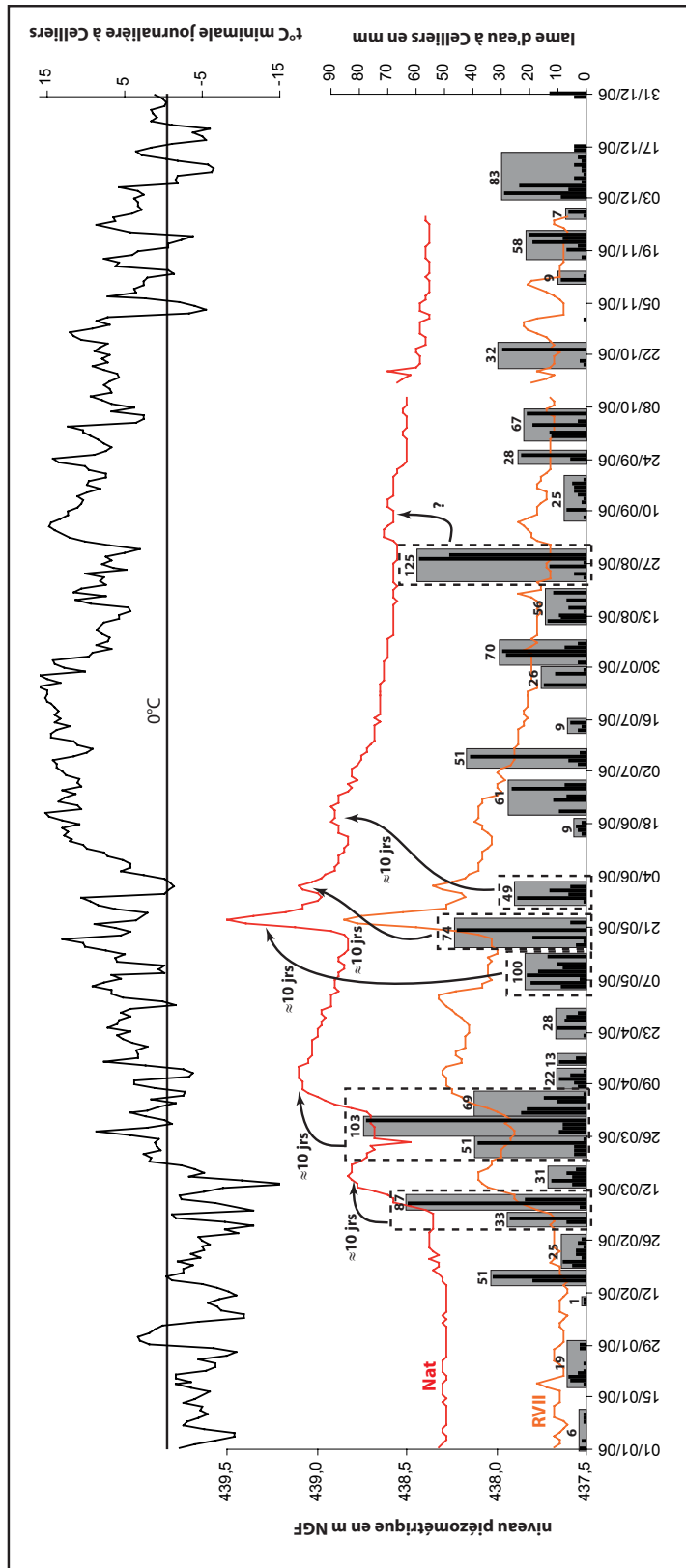


Figure III.9 : Enregistrements des niveaux piézométriques des forages Natacha et RVII du 01/01/06 au 31/12/06, pluviométrie et température à la station de Celliers (1400m) et évaluation des temps de réponse de l'aquifère thermal par analyse qualitative

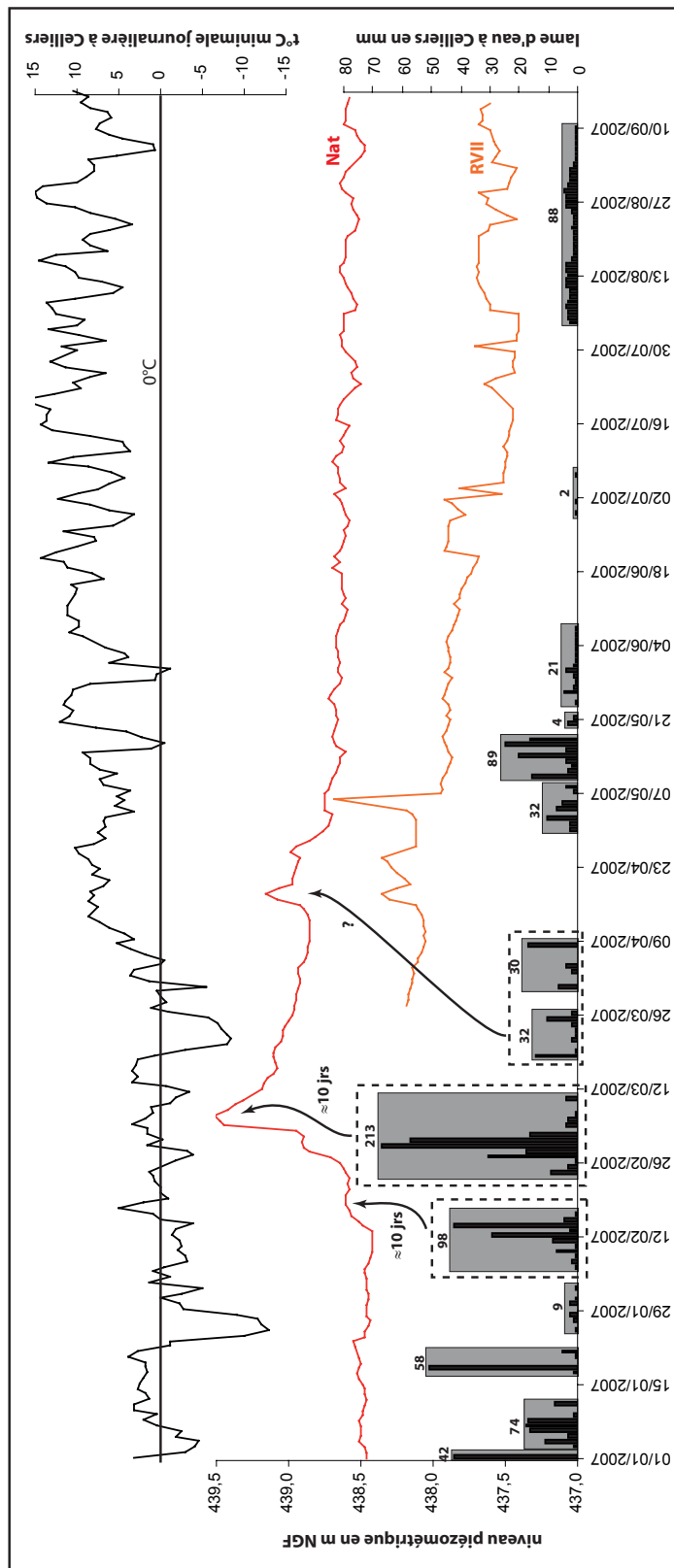


Figure III.10 : Enregistrements des niveaux piézométriques des forages Natacha et RVII du 01/01/07 au 17/09/07, pluviométrie et température à la station de Celliers (1400m) et évaluation des temps de réponse de l'aquifère thermal par analyse qualitative

réelle du système de son effet mémoire. Des modèles de récession sont classiquement appliqués dans le domaine du karst (Maillet, 1905, Drogue, 1972, Lhomme *et al.*, 1995, Eisenlohr *et al.*, 1997 et Kovacs *et al.*, 2005) afin d'évaluer les caractéristiques intrinsèques des aquifères. La transposition de tels modèles à notre problématique reste délicate. En effet, la réponse enregistrée est un niveau piézométrique et la linéarité entre ce niveau piézométrique et le débit artésien de Natacha n'a jamais pu être établie. Dans le cadre de cette étude, l'analyse des temps de réponse du système restera qualitative. Ainsi, au sein de l'augmentation générale des niveaux piézométriques du printemps, on peut distinguer plusieurs pics que l'on peut corrélérer à des épisodes de recharge distincts (figures III.9 et III.10). Le temps de réponse apparent du système thermal est d'environ 10 jours pour les deux années d'observation. La détermination de ce temps de transfert de pression reste approximative puisque la fusion ayant lieu dans le réceptacle du pluviomètre n'est pas exactement concomitante avec la fusion globale du manteau neigeux.

Sur chaque année d'enregistrement, les pics présentent deux formes différentes : des pics à forme arrondie, marqués par une récession lente et des pics aigus, correspondant à une récession rapide (24/05/06 et 07/03/07). Il semble que les pics aigus n'apparaissent que lorsque le niveau piézométrique du forage Natacha dépasse la valeur seuil de 439m. Ceci peut s'expliquer par l'impact de la présence d'une zone décomprimée sur le régime des circulations profondes. En effet, il est classiquement observé que la conductivité hydraulique des roches cristallophylliennes diminue en profondeur (Maréchal, 1998) du fait de la décompression des roches en surface (environ 600m d'épaisseur au niveau des sommets). Ainsi, lorsque le niveau piézométrique augmente dans la zone d'alimentation, il passe au dessus de la limite entre zone comprimée et décomprimée. Des écoulements superficiels rapides ont alors lieu au sein de la zone décomprimée, provoquant une diminution rapide du niveau piézométrique dans la zone de recharge et du même coup, au niveau des forages thermaux. Si l'on revient maintenant aux années précédentes (figure III.7), on s'aperçoit que le niveau piézométrique de Natacha en 2003, 2004 et 2005 reste inférieur à 439m et ne présentent donc pas de pics à vidange rapide. En 2001, le pic étant écrêté, on ne peut pas vérifier si la vidange est effectivement rapide. L'année suivante (2002), le niveau de base est supérieur à 439m, la vidange dans la zone décomprimée serait donc continue sur toute l'année, ce qui expliquerait l'absence de pics à vidange rapide.

En outre, bien que son amplitude soit comparable aux épisodes de fonte enregistrés, l'épisode pluvieux du 29/08/06 n'implique pas ou peu de réponse du système thermal (moins de 10cm d'augmentation du niveau piézométrique) (figure III.9). Le système profond semble donc réagir uniquement à la fonte nivale et pas aux épisodes pluvieux isolés.

En ce qui concerne les autres enregistrements, le forage RII, captant les eaux mélangées dans la nappe alluviale, n'est pas affecté par les effets de la fonte nivale (figure III.7). Son niveau piézométrique diminue progressivement depuis 1999 jusqu'à se retrouver à 1m au dessus du niveau de l'Isère. Lorsque le pompage est arrêté, son niveau est égal à celui de la nappe alluviale, mesuré par les piézomètres Pz poste et Pz taxi. Pendant l'arrêt de 2001, le niveau est remonté très brusquement et la température a chuté de 30 à 10°C. Dans ce forage, le pompage permet de mobiliser des remontées d'eau thermale au sein des dépôts fluvio-glaciaires.

L'ouverture des vannes sur le forage Natacha (en janvier-février 2002 et en janvier 2004) a provoqué une brusque baisse de 1m sur le niveau piézométrique de Natacha sans influencer de manière notable le niveau de RII.

Le niveau de l'Isère présente de fortes variations qui sont dues soit à des crues naturelles soit à des lâchers depuis le barrage d'Annibal, situé à l'amont. Le niveau de la nappe alluviale est directement lié aux variations du niveau de l'Isère. La nappe alluviale, ainsi influencée par ces variations naturelles et anthropiques, ne montre pas de réponse claire à la fonte nivale.

En ce qui concerne la température (figure III.7), celle du forage RVII a augmenté de 40°C à 50°C entre 1999 et 2003 puis s'est stabilisée. Sur le suivi à plus long terme (figure IV.24), on peut voir que ce sont les essais par pompages du forage Natacha qui l'ont déséquilibré et il a retrouvé sa température originelle depuis 2004. Le forage Natacha garde une température constante de 61°C.

2.2. Dans la galerie de reconnaissance EDF

2.2.1) L'acquisition des données

Les venues d'eau froides interceptées par l'antenne 2 de la galerie de reconnaissance EDF sont collectées puis dirigées vers la galerie d'accès (figure III.11). La station de mesure a été installée à l'exutoire du tuyau de collecte. L'enregistrement permet d'acquérir une chronique des variations de débits en ce point. Cette station mesure, avec un pas de temps de 15 minutes, la hauteur d'eau, la conductivité et la température de l'eau collectée dans une cuve réceptrice équipée d'un seuil en V (figure III.11).

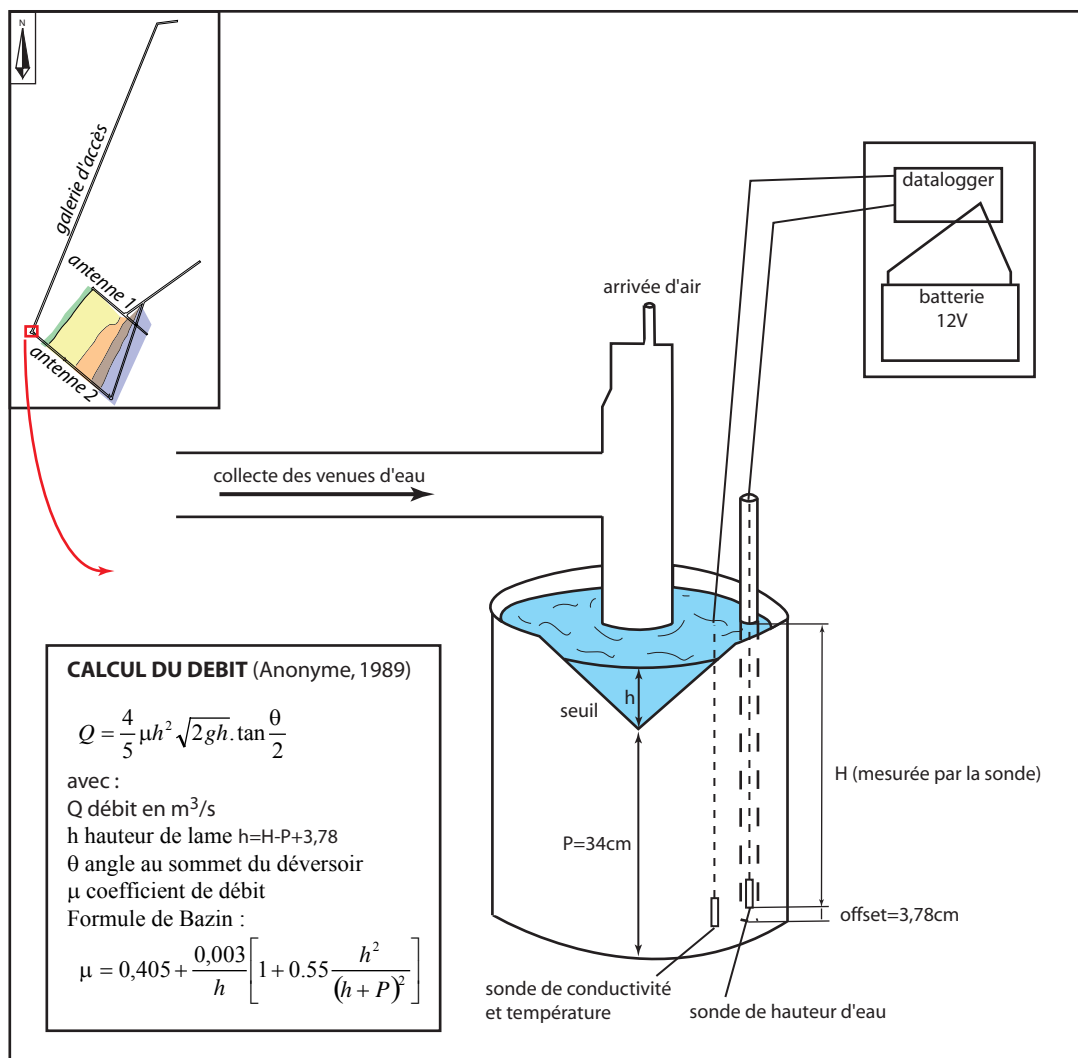


Figure III.11 : Schéma de la station de mesure en continu, installée dans la galerie EDF

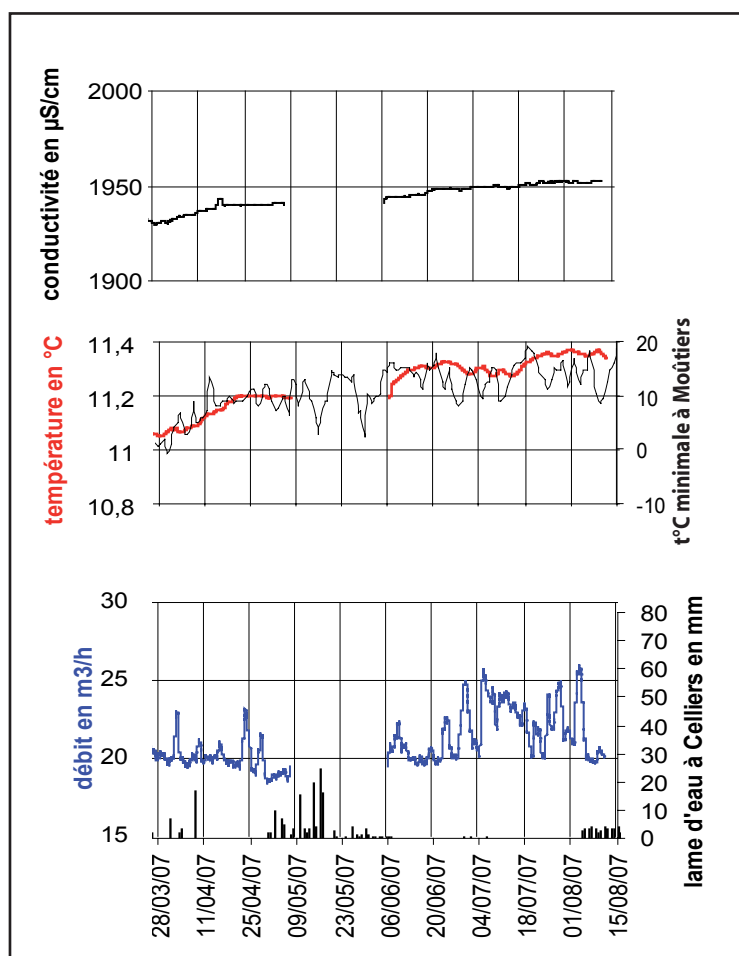


Figure III.12 : Données enregistrées durant la période de fonte nivale (du 28/03/06 au 15/08/07) par la station installée dans la galerie EDF

NB : en raison de problèmes techniques, les données précédentes ne sont pas exploitables

2.2.2) Les résultats (figure III.12)

Durant la période de fonte nivale, les trois paramètres mesurés présentent des variations de faible amplitude : moins de $50\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la conductivité (soit 2,5%), moins de $0,4^\circ\text{C}$ pour la température (soit 4%) et $5\text{m}^3/\text{h}$ pour le débit (soit 25%).

La conductivité mesurée à cet endroit est comparable à celle des autres sources du secteur, issues du contact triasique ($1950\mu\text{S}/\text{cm}$). On observe une légère augmentation de la conductivité durant la fonte nivale. Le même phénomène a été observé grâce aux mesures mensuelles de l'année précédente (cf. chapitre IV, § II.1.1.5).

En ce qui concerne la température, les variations sont très faibles et elles sont concordantes avec les variations saisonnières de la température atmosphérique, enregistrée à la station de Moûtiers (480m d'altitude). Les variations de température, enregistrées ici, correspondent donc aux variations de température de l'atmosphère de la galerie, naturellement aérée par ses deux extrémités. Les variations réelles de température des eaux de la galerie ont été observées grâce aux prélèvements mensuels de la campagne 2005-2006 (cf. chapitre IV, § II. 1.1.5 et figure IV.12).

Durant la période de fonte nivale, le débit ne présente pas d'augmentation. Ceci tend à montrer que la galerie EDF ne se situe pas dans la zone décomprimée, dont la présence est mise en évidence par les suivis réalisés dans la zone d'émergence (cf. chapitre III, § II.2.1.2).

III. Conclusion

L'ensemble des phénomènes décrits ci-dessous sont synthétisés par la figure III.13.

Le secteur étudié est marqué par **des circulations profondes**, comme en atteste la présence de l'émergence thermique, et par **des circulations superficielles**, mises en évidence par les différentes sources froides et les apports identifiés dans l'ER. Une fois ce constat réalisé, il convient de comprendre le lien entre ces deux types de circulation. Tout d'abord, toutes deux transitent dans le même milieu : la fracturation des MFI et les parois des accidents tectoniques, constituées par la zone broyée des MFI ainsi que les dolomies, cargneules et gypses du contact lui-même. La présence d'une zone décomprimée dans la zone de recharge sert de trop-plein à l'ensemble du système et explique les pics à vidange rapide enregistrés dans le forage Natacha. Les circulations superficielles observées (source de la Route de la Forêt et apports dans l'ER) correspondent aux circulations dans cette zone décomprimée. L'ensemble de ce double système est alimenté à la fois de façon diffuse par les infiltrations dans le réseau de fractures des MFI et de façon ponctuelle par les pertes du réseau hydrographique, présentes au Crozat (1300m) et sur le ruisseau de la Rave (1700m).

Dans la zone d'émergence, trois formations aquifères sont présentes : l'aquifère thermal profond, l'éroulement ancien et l'aquifère alluvial. Les dépôts glacio-lacustres constituent une couche imperméable qui rend captif l'aquifère thermal et une partie de l'éroulement ancien. D'un point de vue dynamique, ces deux aquifères n'en forment alors plus qu'un et les niveaux piézométriques des forages RVII et Nat présentent des variations synchrones. La différence de niveau piézométrique entre RVII et Nat (environ 80cm) est uniquement due aux pertes de charge liées à la remontée jusqu'au fond de la vallée glaciaire puis dans l'éroulement ancien. Quant à la partie libre de l'éroulement et à la nappe alluviale, elles forment un aquifère unique, avec un niveau piézométrique non artésien. L'éroulement ancien est le siège des échanges entre les deux aquifères ainsi définis. Les circulations sont ascendantes depuis l'aquifère thermal profond vers l'éroulement puis vers la nappe alluviale. L'éroulement reçoit également des flux depuis les écoulements superficiels des versants de la rive gauche et de la nappe alluviale. Tant que le forage Natacha présentera un niveau supérieur à celui de la nappe alluviale, aucun flux descendant ne sera possible entre l'éroulement et l'aquifère thermal profond. La seule protection de Natacha envers une contamination par de l'eau superficielle est de maintenir son niveau piézométrique supérieur à celui de la nappe alluviale et à celui du forage RVII.

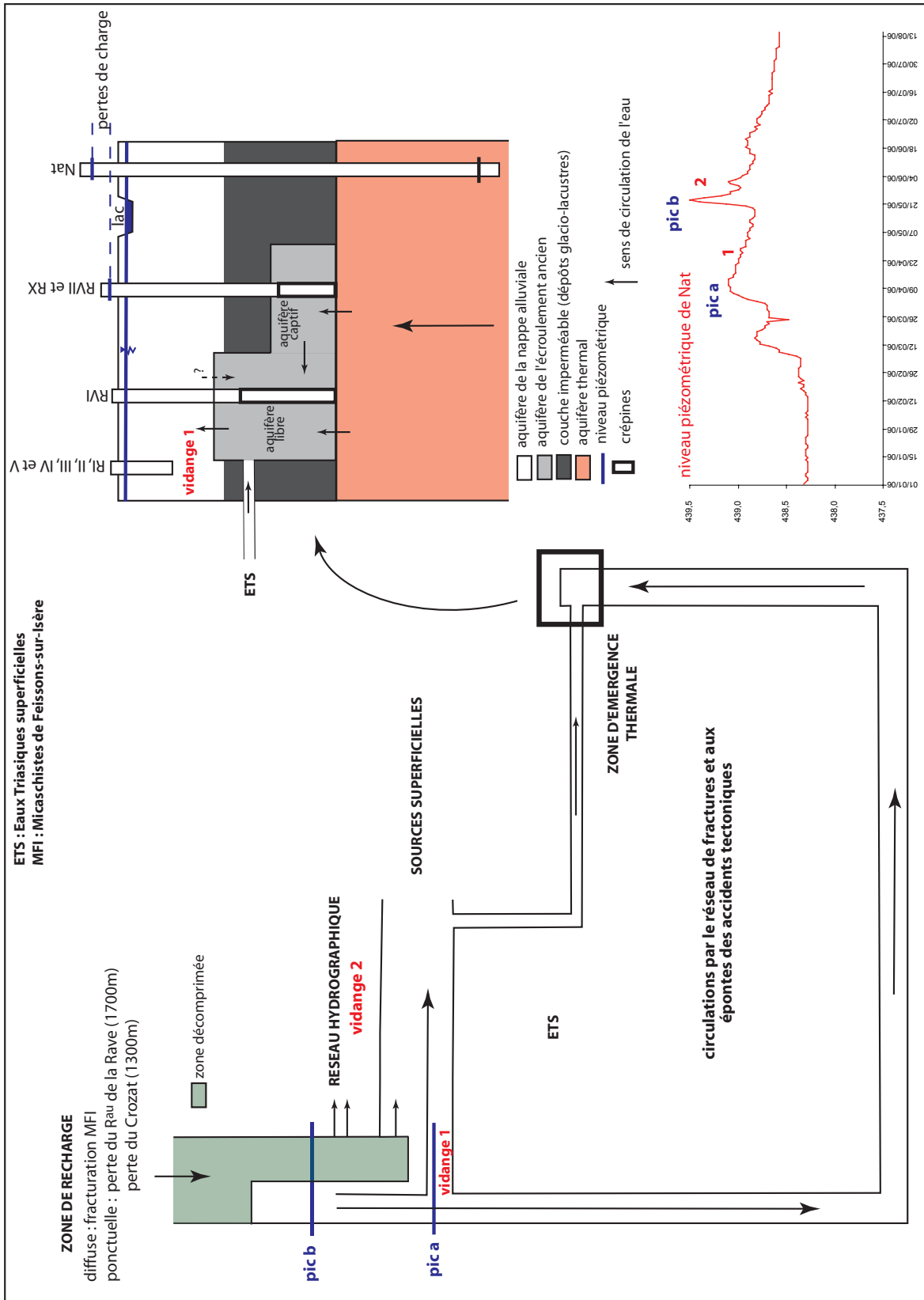


Figure III.13 : Relations hydrodynamiques entre la zone de recharge et les sorties d'une part et entre les différents aquifères de la zone d'émergence d'autre part

Chapitre IV : Etude des échanges fluides-roches

Le chapitre IV est consacré à l'étude des échanges fluides-roches grâce à l'outil hydrogéochimique. Pour cela, les éléments majeurs, les éléments traces et les isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$ et ^{14}C) des eaux et des roches du secteur ainsi que la composition de la phase gazeuse des eaux du forage Natacha sont analysés.

Chapitre IV : Etude des échanges fluides-roches

Le schéma des écoulements défini à partir des observations géologiques a été précisé grâce aux observations hydrodynamiques du chapitre précédent. Il convient maintenant de le conforter et l'affiner par des observations hydrogéochimiques. Pour ce quatrième chapitre, il a été nécessaire de réaliser une campagne d'analyses sur les eaux de tous les aquifères présents sur le site (éléments majeurs et traces, isotopes et gaz dissous), de réinterpréter les données physico-chimiques acquises depuis 1949 sur les forages thermaux et d'analyser la chimie des roches encaissantes (éléments majeurs, éléments traces et isotopes). L'interprétation de ces données hydrogéochimiques va permettre de définir les interactions fluide-roche qui ont lieu tout au long du parcours des eaux thermales.

I. L'utilisation de l'hydrogéochimie dans l'étude des systèmes thermaux

Depuis les années 1990, l'hydrogéochimie est de plus en plus utilisée dans le domaine du thermalisme pour caractériser les eaux exploitées. Ceci mérite de faire un état des lieux des types d'analyses réalisées, des modes de traitement des données et des informations apportées.

Certaines études, même récentes, (Razack et Dazy, 1990, Chiodini *et al.*, 1995, Fara *et al.*, 1999, Gemici *et al.*, 2002, Gudmundsson et Arnorsson, 2002 ainsi que Gökğöz et Tarcan, 2006) se basent uniquement sur les analyses des éléments majeurs et de quelques traces contenus dans les eaux. Ces analyses permettent à ces auteurs de définir les faciès des eaux analysées à l'aide de diverses représentations (Piper, Ludwig-Angelier, Schoeller-Berkalov, etc...). Les données sont traitées à l'aide de diagrammes binaires simples ou par des analyses statistiques telles que les Analyses en Composante Principale. Les indices de saturation (IS) sont calculés à l'aide de logiciels spécifiques (Phreeqc, Netpath...). Différents géothermomètres sont utilisés afin d'estimer la température atteinte par les eaux.

La même approche peut être complétée par des données sur les isotopes stables. Les rapports $\delta^{18}\text{O}$ et δD sont classiquement mesurés. Les analyses des eaux sont placées par rapport à une droite météorique locale (Craig, 1961) afin de mettre en évidence ou non des phénomènes responsables de la modification de la composition isotopique des eaux infiltrées (Bianchetti *et al.*, 1992, Ceron et Pulido-Bosch, 1998, Druschel *et al.*, 2001, Favara *et al.*, 1998, Nieva *et al.*, 1997, Pastorelli *et al.*, 1999 et Portugal *et al.*, 2005). L'analyse du rapport $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ peut compléter ces travaux (Brugger *et al.*, 2005, Favara *et al.*, 2001 et Inguaggiato *et al.*, 2005) et permet de définir la nature et l'origine du carbone ayant échangé avec l'eau souterraine (sols ou matière organique fossile, carbonates, CO_2 magmatique).

Des travaux plus complets (Pauwels *et al.*, 1997, Manzoor *et al.*, 2002, Bahati *et al.*, 2005, Qin *et al.*, 2005 et Mariner *et al.*, 2006) intègrent des données de ^3H et ^{14}C , ainsi que les compositions isotopiques des sulfates ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{34}\text{S}$). Le ^3H a été rejeté de manière artificielle dans l'atmosphère pendant les essais thermonucléaires aériens qui ont eu lieu de 1952 à 1980, avec un pic en 1963. Ceci permet alors de distinguer les eaux infiltrées durant cette période des autres eaux, plus anciennes ou plus récentes. Les valeurs de ^{14}C , associées à celles de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ permettent de calculer des temps de séjour à partir de différents modèles d'âge (Godwin, 1962, Tamers, 1960, Carillo-Rivera *et al.*, 1992, Clark et Fritz, 1997) dont le but est de corriger les modifications du ^{14}C par les échanges entre l'eau et le carbone présent le long de son parcours. Ces corrections restent cependant des estimations.

L'analyse des compositions isotopiques des sulfates permet de définir leur origine (marine, évaporitique ou volcanique) et d'observer des éventuels phénomènes d'oxydo-réduction des sulfates.

Tous ces travaux ont pour but d'établir des modèles d'interaction fluide-roche. Des travaux plus récents (Michard *et al.*, 1996, Pastorelli *et al.*, 2001, Gianelli et Grassi, 2001, André et Vuataz, 2005 et Rabemanana, 2005) testent ces modèles par des modélisations numériques prenant en compte les équilibres thermodynamiques.

Cette partie de mon travail suivra la même logique de construction d'un modèle d'interaction fluide-roche.

II. Analyses chimiques des eaux et des roches du secteur étudié

1. Analyses physico-chimiques des eaux

Depuis 1949, il existe de nombreuses données physico-chimiques, mais uniquement sur les eaux captées par les forages. Ces dernières ont été complétées, entre autres, par une campagne d'analyse réalisée sur l'ensemble des aquifères présents sur le secteur : l'aquifère thermal, le contact triasique, la nappe alluviale, les MFI et les carbonates. A la lumière de ces nouveaux résultats, les anciennes données sur les forages sont réinterprétées.

1.1. Données acquises sur tous les aquifères (campagne 2005-2006)

1.1.1) Plan d'échantillonnage et méthodologie

De septembre 2005 à août 2006, les eaux des différents aquifères présents sur le secteur ont été analysées (figure IV.1). Les forages Natacha et RVII sont les seuls points d'accès à l'aquifère thermal. Dans tout ce qui suit, les eaux issues du contact tectonique, constitué de gypses, cargneules et dolomies, sont regroupées sous le terme d'eaux triasiques superficielles (ETS). Ce groupe est représenté par la source de la Route de la Forêt (RF), la source des îles (SI) et les venues sulfatées (VS). L'accès à des prélèvements d'eau de la nappe alluviale s'est révélé délicat. En effet, les 3 piézomètres présents sur le site (Pz poste, Pz taxi et Pz OT), prélevés en surface et en profondeur, sont influencés par l'aquifère thermal. A l'amont de la zone d'émergence, le puits d'un particulier, de 20m de profondeur, non influencé par les venues thermales, a donc été prélevé (Bellecombe). Cependant, la position de ce puits laisse envisager qu'il capte des eaux circulant au sein du cône de déjection du Morel plutôt que la nappe alluviale de l'Isère. Comme aucun autre accès à la nappe alluviale n'est présent, ce point sera donc considéré, dans un premier temps, comme représentatif de la nappe alluviale. L'Isère, elle-même, a également été prélevée à l'amont de la zone d'émergence. Les sources de Glaizette, de Pont Botto ainsi que le ruisseau du Tartet correspondent aux eaux circulant au sein des formations du socle. Pour finir, la source des Avignons et le ruisseau des Guillots représentent les eaux circulant dans les carbonates. Les eaux de la galerie EDF ont été prélevées au niveau du contact de la Léchère, au sein des évaporites (V8) mais également aux éponges du côté socle (V46) et du côté couverture carbonatée (F2).

Les points les plus proches de la zone d'émergence ont été prélevés tous les mois et les points les plus difficiles d'accès (source des îles, VS, Glaizette, Tartet, Pont Botto, les Avignons et le Guillot) ont été échantillonnés une à trois fois dans l'année, selon les points.

Pour chacun des prélèvements, les paramètres physico-chimiques de terrain (température, conductivité, pH, eH et alcalinité) ont été mesurés. Les éléments majeurs ont été analysés par chromatographie ionique à détection conductimétrique (Dionex® ICS 90) au laboratoire Transferts lithosphériques de Saint-Etienne (UMR-CNRS 6524). Ces analyses ont été effectuées par Emilie Thiébaud et Stéphanie Gallino sous la responsabilité de Bertrand Moine. Le détail de la méthodologie employée ainsi que les résultats des analyses sont donnés en annexe 6.

1.1.2) Paramètres physiques et facies chimiques des eaux prélevées

La moyenne et l'écart type des paramètres physico-chimiques suivis durant la campagne 2005-2006 figurent dans le tableau IV.1. Dans un premier temps, les caractéristiques de chaque point sont décrites et seront analysées par la suite.

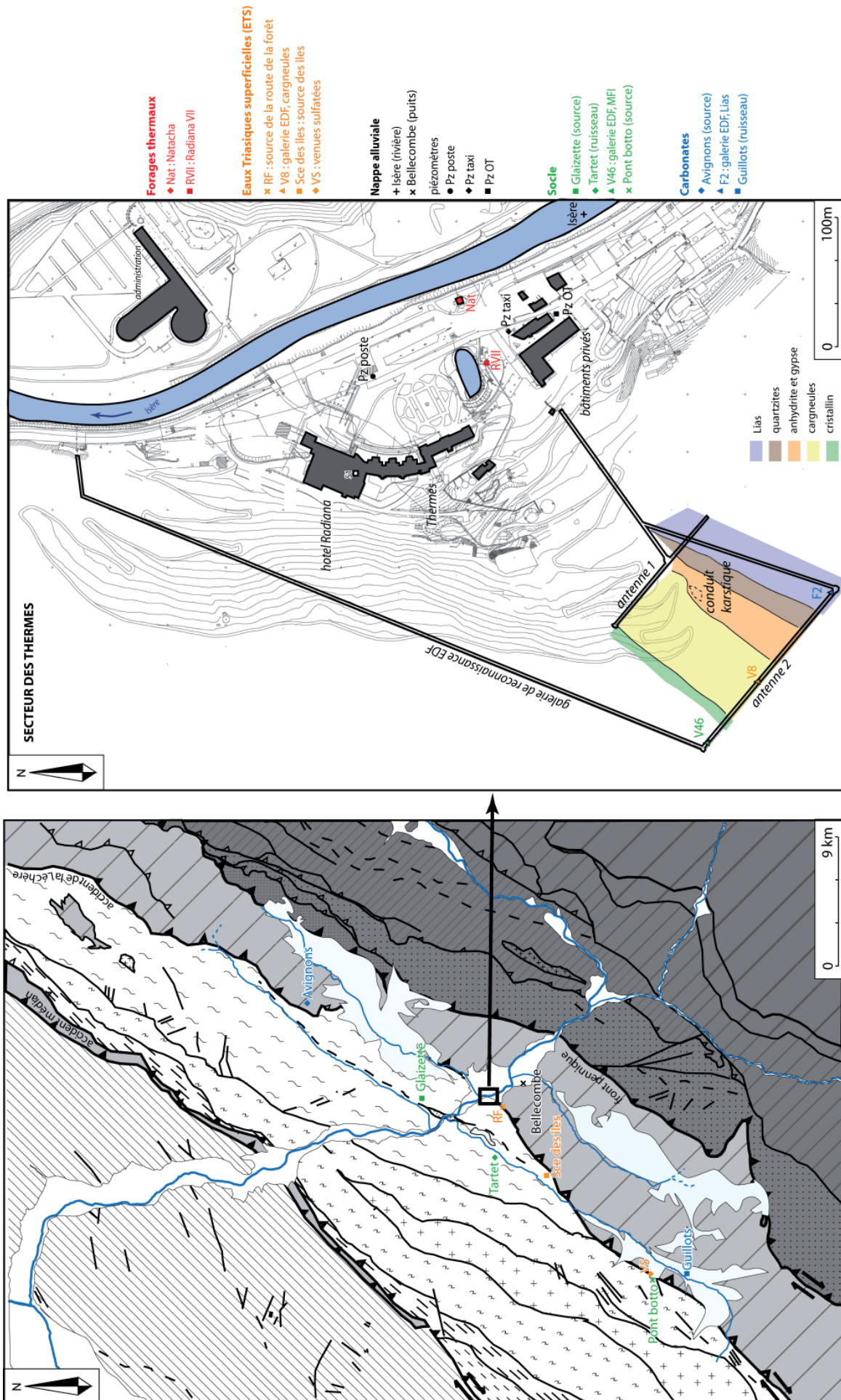


Figure IV.1 : Cartes de localisation des points de prélèvement de la campagne 2005-2006 en rouge : les eaux thermales, en orange : les eaux de la nappe alluviale, en vert : les eaux du socle et en bleu : les eaux des carbonates.

	nb	t °C	cond.	pH	eH	Li	Na	NH4	K	Mg	Ca	Sr	F	Cl	NO2	Br	N03	PO4	S04	HCO3	
FORAGES THERMAUX																					
Natacha	moyenne	55,4	2905	7,1	-18,7	0,9	257,6	2,6	17,5	35,7	465,6	10,3	3,0	119,4	0,1	0,9	0,3	0,6	1573,3	84,4	
	écart type	2,5	32	0,2	6,7	0,0	6,5	1,0	0,4	3,7	11,3	1,3	0,2	6,7	0,3	2,0	0,4	1,9	34,6	12,2	
RVII	moyenne	41,8	3098	7,0	-7,0	0,7	201,5	1,4	14,5	47,7	603,8	11,2	2,4	89,0	0,5	2,7	0,6	7,3	1775,3	113,0	
	écart type	1,3	41	0,1	4,6	0,1	23,2	0,7	2,6	7,7	65,6	1,7	0,6	4,6	1,8	8,6	2,0	23,6	42,1	10,9	
EAUX TRIASIQUES SUP.																					
RF	moyenne	10,2	1917	7,8	-51,3	0,0	1,8	0,0	0,7	52,9	401,5	8,3	0,2	3,8	0,1	0,0	0,2	0,4	933,8	255,0	
	écart type	2,6	232	0,3	8,1	0,0	0,3	0,0	0,5	4,9	28,7	2,3	0,0	1,2	0,1	0,0	0,2	0,9	86,0	13,5	
F2 (carbonates)	moyenne	11,0	1665	7,1	-9,7	0,0	2,0	0,1	0,8	53,9	308,9	6,5	0,2	4,8	0,1	0,0	0,3	1,2	722,1	298,7	
	écart type	0,7	61	0,1	7,1	0,0	0,3	0,0	0,2	8,3	28,5	0,9	0,0	2,9	0,2	0,2	0,3	2,5	18,2	9,9	
V8 (cargneules)	moyenne	10,2	2610	7,4	-24,3	0,0	2,3	0,1	2,5	76,7	586,4	13,0	0,2	3,1	0,8	0,0	0,6	0,0	1574,6	185,7	
	écart type	0,7	60	0,1	3,3	0,0	0,8	0,1	0,8	6,3	15,9	1,0	0,1	1,2	2,4	0,0	26,5	0,0	60,4	32,5	
V46 (MFI)	moyenne	11,6	2312	7,1	-12,3	0,0	2,2	0,1	1,5	64,0	520,5	11,8	0,2	3,9	0,0	0,0	0,4	0,0	1267,4	259,4	
	écart type	0,6	28	0,1	6,9	0,0	0,6	0,1	0,6	5,3	10,5	0,9	0,1	3,2	0,1	0,0	0,4	0,0	34,4	24,2	
VS	moyenne	8,2	1905	7,7	-32,5	0,0	1,5	0,0	1,3	25,8	452,3	7,3	0,1	2,6	0,0	0,0	0,5	0,0	1127,8	68,3	
	écart type	4,1	426	0,3	9,2	0,0	0,4	0,0	0,5	6,0	121,7	2,6	0,1	0,9	0,1	0,0	0,6	0,0	326,4	6,1	
NAPPE ALLUVIALE																					
Pz OT surf	moyenne	10,1	1146	7,1	-	0,0	9,0	0,2	1,8	39,2	182,1	3,2	0,0	7,2	0,0	0,0	2,6	0,0	351,6	295,9	
	écart type	1,1	3	0,1	-	0,0	0,1	0,1	0,1	4,9	14,5	0,1	0,0	0,3	0,1	0,0	0,7	0,0	37,0	22,9	
Pz OT prof	moyenne	12,4	1009	7,2	-15,3	0,0	9,7	0,1	2,1	43,1	189,3	3,0	0,0	8,5	0,7	0,1	2,7	0,2	354,1	299,4	
	écart type	1,9	366	0,1	6,4	0,0	0,8	0,1	0,4	5,7	13,9	0,4	0,0	1,0	1,2	0,2	0,5	0,7	22,3	13,1	
Pz poste surf	moyenne	14,4	1200	7,2	-16,5	0,0	9,2	0,1	2,2	39,8	200,9	4,2	0,2	9,2	0,1	0,0	1,2	1,2	460,1	207,2	
	écart type	1,7	364	0,1	13,4	0,0	2,5	0,1	0,4	13,5	58,7	1,4	0,0	3,2	0,1	0,0	0,6	3,6	140,7	48,5	
Pz poste prof	moyenne	14,3	1349	7,2	-20,0	0,0	10,3	0,1	2,2	46,5	229,8	4,9	0,3	10,2	0,1	0,2	1,1	3,3	550,0	237,8	
	écart type	1,6	86	0,2	15,6	0,0	0,3	0,1	0,4	4,9	6,2	0,4	0,1	0,6	0,2	0,5	0,5	1,0	19,4	16,3	
Pz taxi surf	moyenne	12,2	933	7,4	-16,3	0,0	14,2	0,1	2,1	32,0	150,8	2,5	0,1	13,6	0,5	0,3	3,7	2,9	301,7	232,7	
	écart type	1,4	370	0,2	7,2	0,0	6,9	0,1	0,3	15,0	61,4	1,2	0,1	10,2	1,2	0,9	2,9	6,1	141,2	73,9	
Pz taxi prof	moyenne	12,0	1200	7,2	-16,3	0,0	9,2	0,1	1,9	43,8	198,8	3,4	0,0	8,2	1,0	0,0	3,0	0,3	409,6	290,8	
	écart type	1,6	33	0,1	7,0	0,0	0,4	0,0	0,2	6,4	16,6	0,5	0,0	0,6	2,0	0,0	1,8	0,6	23,1	13,0	
Bellecombe	moyenne	14,1	840	7,6	-37,0	0,0	9,7	0,1	1,3	22,5	140,2	2,3	0,1	11,2	0,1	0,0	4,1	0,0	266,3	166,3	
	écart type	3,7	72	0,2	10,5	0,0	2,7	0,2	0,2	2,5	14,5	0,1	0,0	3,1	0,2	0,0	2,8	0,0	34,6	32,7	
Isère	moyenne	9,0	690	8,1	-76,0	0,0	8,7	0,2	1,5	18,3	110,8	1,8	0,1	11,5	0,2	0,0	3,2	0,0	208,1	137,5	
	écart type	5,0	239	0,4	7,1	0,0	6,0	0,2	0,3	7,2	34,6	0,9	0,0	7,9	0,2	0,0	2,0	0,0	94,7	23,2	
CARBONATES																					
Avignons	moyenne	11,3	423	8,1	-66,0	0,0	6,9	0,1	0,6	8,4	72,2	0,4	0,5	2,4	0,2	0,0	3,6	0,1	45,8	188,3	
	écart type	3,6	82	0,0	7,1	0,0	9,2	0,1	0,6	2,2	9,9	0,2	0,7	2,4	0,1	0,0	2,2	0,2	21,2	21,0	
SOCLE																					
Pont Botto	moyenne	7,6	104	8,1	-64,0	0,0	1,0	0,1	1,3	1,1	17,3	0,2	0,0	0,4	0,1	0,1	2,1	0,0	4,9	47,6	
	écart type	3,1	6	0,3	18,4	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8	0,0	0,0	0,2	0,1	0,3	0,5	0,0	0,5	1,4	
Glazette	moyenne	7,7	260	7,9	-51,0	0,0	2,5	0,1	0,6	2,1	49,6	0,3	0,1	1,2	0,2	0,0	0,6	0,0	23,1	120,5	
	écart type	5,8	38	0,1	2,8	0,0	0,4	0,1	0,3	0,3	8,4	0,1	0,0	0,2	0,2	0,0	0,3	0,0	0,8	26,2	
Tartet	moyenne	6,7	184	8,2	-	0,0	2,2	0,2	2,4	2,4	29,9	0,2	0,1	0,6	0,1	0,0	0,8	0,0	23,9	81,7	
	écart type	7,4	406	7,9	-50,5	0,0	2,5	0,3	1,9	8,0	68,3	0,9	0,0	1,3	0,1	0,0	1,9	0,1	114,7	98,8	

Tableau IV.1 : Moyennes et écarts-types des paramètres physico-chimiques de chaque point de prélèvement (campagne 2005-2006) conductivités à 25°C en µS/cm, concentrations en mg/l (résultats complets en annexe 6)

le pH

Les eaux thermales, les eaux de la galerie EDF ainsi que les piézomètres ont un pH neutre, tandis que toutes les autres eaux, plus superficielles, ont un pH légèrement basique.

la température et la conductivité (figure IV.2)

La température des eaux thermales, 55°C pour Natacha et 42°C pour RVII, est relativement constante dans le temps. Tous les autres points suivis présentent des variations de température saisonnières.

Les deux forages thermaux présentent des conductivités différentes : RVII (3100 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est plus minéralisé que Natacha (2900 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les ETS, quant à elles, ont une conductivité d'environ 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dans la galerie EDF, des différences de conductivité importantes existent entre les trois points suivis : le point F2 est moins minéralisé (1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) par rapport aux deux autres (2300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour V46 et 2600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour V8). Le point RF, situé en contre-haut des thermes, a une conductivité intermédiaire entre V8 et F2. Les eaux de la nappe alluviale sont assez fortement minéralisées (800 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les eaux superficielles, prélevées sur les deux versants et circulant dans les carbonates et le socle, sont peu minéralisées (100 à 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Le remplissage quaternaire est le lieu d'un mélange entre les eaux thermales (Natacha), les eaux de la nappe alluviale (Bellecombe) et les ETS (V8). Ces trois pôles présentent des températures et conductivités bien distinctes (figure IV.2). Les piézomètres capent un mélange entre des eaux superficielles et une petite proportion d'eau thermique. Le piézomètre poste est plus chaud (14°C) que les deux autres (12°C) ; il semble donc être le plus influencé par l'eau thermique. Comme on le verra par la suite, les eaux du forage RVII, présentant une conductivité plus élevée, ne semblent pas résulter d'un mélange entre les eaux du type Natacha et les ETS prélevées.

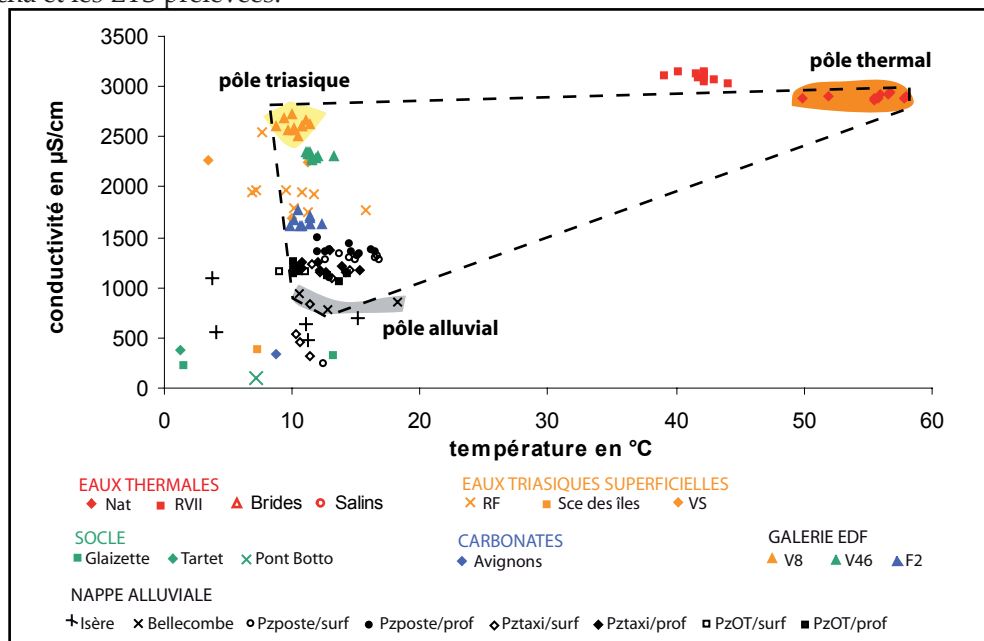


Figure IV.2 : Relation entre température et conductivité des eaux prélevées lors de la campagne 2005-2006

les faciès chimiques

Les différents faciès sont définis globalement à partir du diagramme de Piper (figure IV.3) et plus précisément à partir des diagrammes de Schoeller-Berkalov (figure IV.4).

Les eaux thermales de la Léchère ont un faciès sulfaté calcique et sodique (Ca-Na-SO_4) (figure IV.4a). A titre de comparaison, les eaux thermales de Salins-les-Thermes et Brides-les-Bains, situées quelques kilomètres en amont sur l'Isère (figure II.7) et beaucoup plus minéralisées que celles de la Léchère, présentent un faciès différent, chloruré sodique et calcique (Na-Ca-Cl). Les eaux triasiques superficielles (figure IV.4b) sont sulfatées calciques et magnésiennes (Ca-Mg-SO_4). Les eaux thermales de la Léchère sont enrichies en Na, Cl et K par rapport aux eaux superficielles qui sont elles plus riches en Mg. Les eaux prélevées dans la galerie EDF présentent toutes le même faciès que les eaux triasiques superficielles. Le

faciès des eaux de la nappe alluviale, sulfaté calcique (Ca-SO_4), est comparable à celui des eaux triasiques superficielles bien que légèrement plus riche en Na. Le piézomètre poste, représentatif de tous les autres piézomètres, a le même faciès chimique que la nappe alluviale. Les eaux superficielles circulant dans les carbonates et le socle présentent des faciès peu minéralisés, bicarbonatés calciques (Ca-HCO_3). Dans le chapitre III (SI.1.3), la source des îles semblait constituer une résurgence des pertes identifiées à l'amont, après avoir circulé dans les écaïlles tectoniques évaporitiques. Etant donné que cette source présente un faciès bicarbonaté calcique, cette première hypothèse est rejetée et la source des îles peut donc être considérée comme une eau de socle.

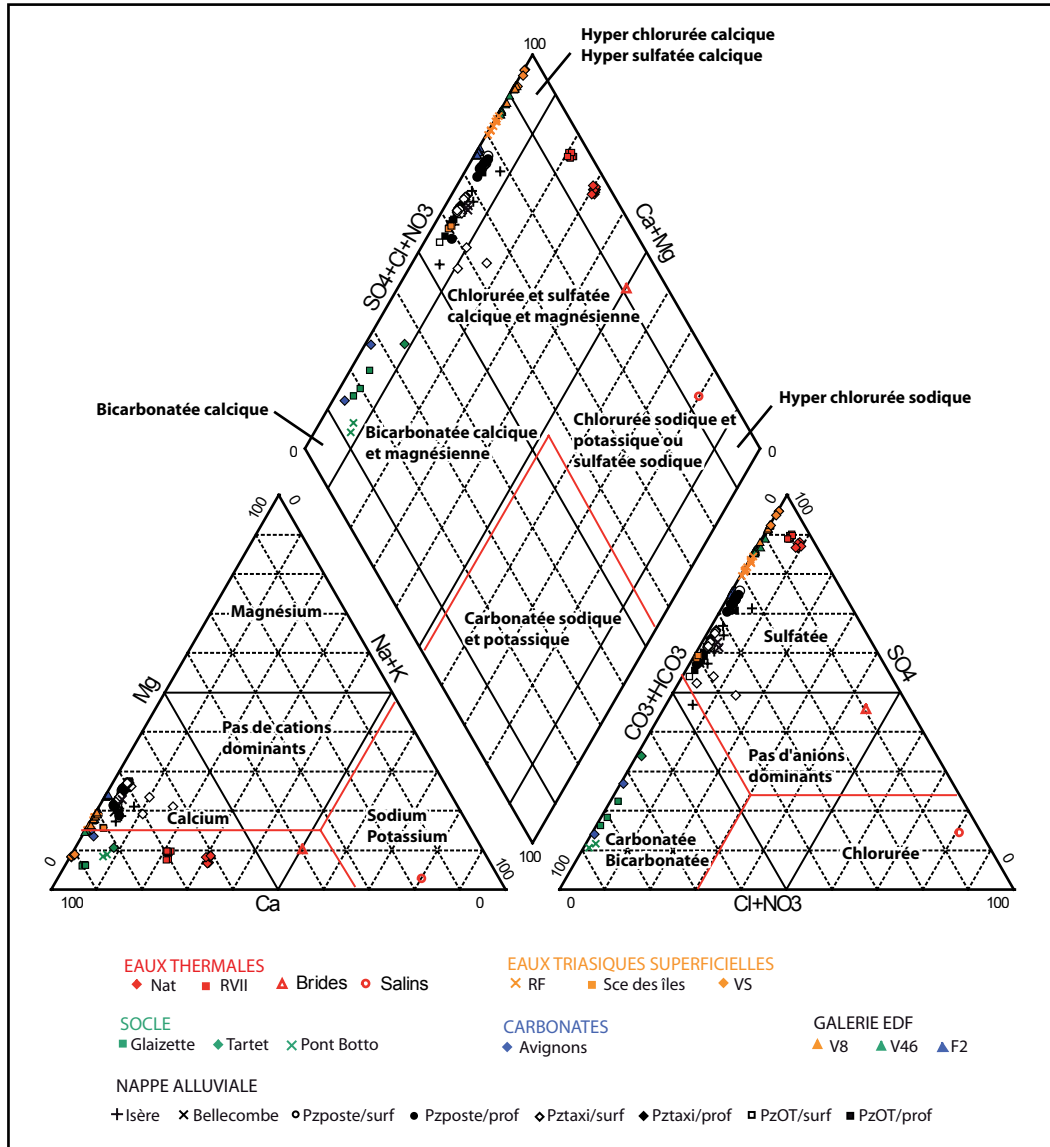


Figure IV.3 : Diagramme de Piper des eaux des différents aquifères prélevés lors de la campagne 2005-2006 données de Salins et Brides issues de Siméon (1980)

Conclusion partielle

Pour la première fois, les eaux de tous les aquifères présents sur le secteur ont été prélevées en s'éloignant de la zone d'émergence thermique. Les eaux issues des carbonates et des MFI sont peu minéralisées et de faciès bicarbonaté calcique (Ca-HCO_3). Parmi les aquifères présents au niveau de la zone d'émergence (eaux thermales, eaux triasiques superficielles et nappe alluviale), tous trois présentent des faciès sulfatés calciques (Ca-SO_4), se différenciant par de plus fortes teneurs en Na, K et Cl pour les eaux thermales et en Mg pour les ETS. La similitude des faciès de ces eaux rend plus complexe la compréhension des phénomènes de mélange de la zone d'émergence.

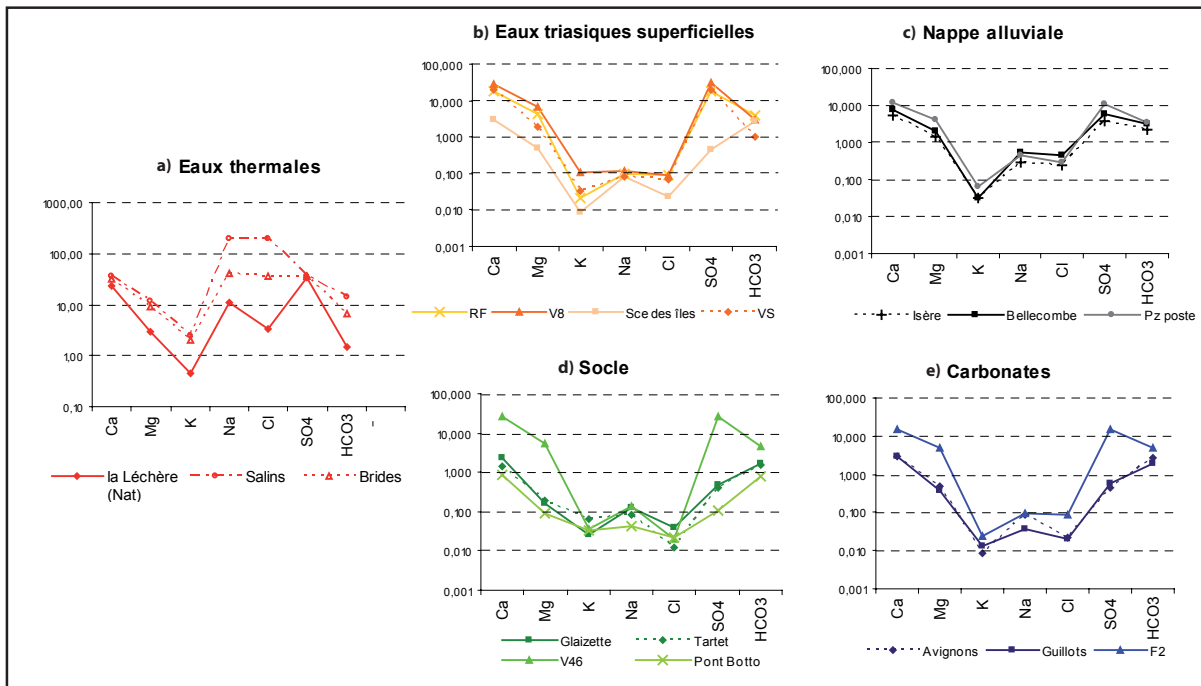


Figure IV.4 : Diagrammes de Schoeller-Berkalov des eaux des différents aquifères prélevés lors de la campagne 2005-2006 concentrations moyennes en mg/l, données de Salins et Brides issues de Siméon (1980)

1.1.3) Indices de saturation et géothermométrie

Les indices de saturation (IS) ont été calculés pour les phases présentes dans les roches du secteur étudié. Parmi les espèces carbonatées, la calcite est présente dans les schistes carbonatés de la couverture sédimentaire et la dolomite dans les dolomies du contact tectonique. Ce même contact tectonique est constitué d'évaporites (gypse, anhydrite et halite) pouvant contenir de la célestite ($SrSO_4$). Les roches du socle (MFI et granites) contiennent du quartz, des feldspaths potassiques et plagioclases (albite et anorthite) mais aussi des argiles (illite et kaolinite). Des phases particulières, telles que la strontianite ($SrCO_3$) ou la fluorite (CaF_2), peuvent être présentes dans les veines affectant le socle.

Dans un premier temps, les indices de saturation (IS) ont été calculés (logiciel Phreeqc®, version 2.12.5) pour les eaux du forage Natacha à partir de l'analyse la plus complète possible (tableau IV.2). Ils ont été calculés à différentes températures : 20°C, 60°C (température d'émergence) et 100°C (figure IV.5).

Natacha	t°C	pH	en mg/l																	en µg/l		
			H2S	S	SiO2	HCO3	Cl	SO4	F	Br	NO3	Ca	Mg	K	Na	Li	Fe	Mn	Sr	Al	B	Ba
24/10/2004	60,2	7,2	90	90	26,6	89,8	122,2	1570	3	1,1	1,22	478	37,9	17,2	254	1,1	0,01	0,06	11	11	1305	20

Tableau IV.2 : Tableau d'analyse du 24/10/04 qui a servi à calculer les indices de saturation du forage Natacha

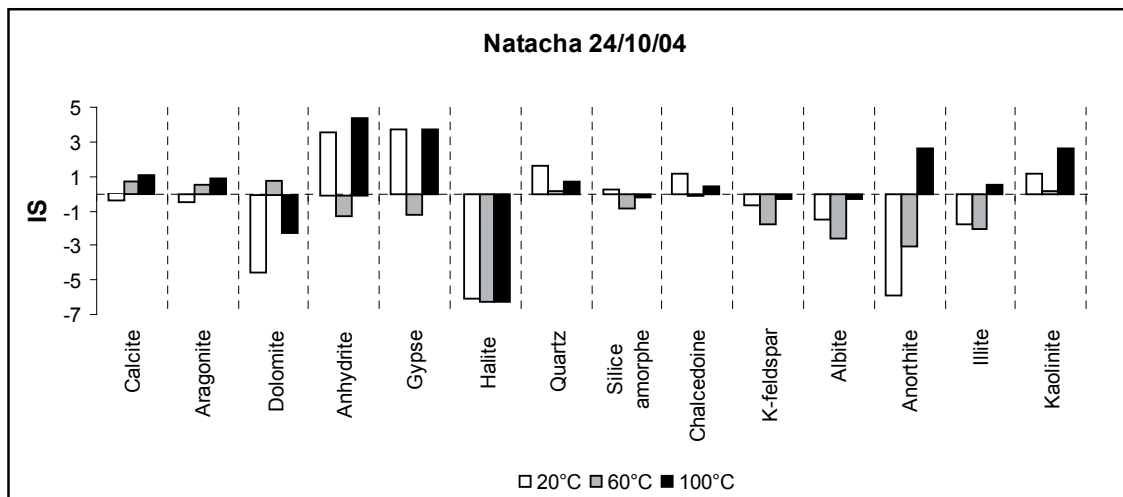


Figure IV.5 : Indices de saturation des eaux du forage Natacha calculés pour différentes températures (analyse du 24/10/04)

A la température où les eaux sont captées (60°C), ces dernières ne sont sursaturées vis-à-vis d'aucune espèce. Elles sont à l'équilibre avec les espèces carbonatées ainsi que l'anhydrite, le gypse, le quartz, le feldspath K et la kaolinite (valeurs comprises entre -1 et 1). Elles sont sous-saturées vis-à-vis de l'illite, de la halite, de l'albite et de l'anorthite.

A 20°C, on observe une sursaturation en gypse et anhydrite et une sous-saturation en dolomite. La sursaturation explique la présence de cristaux de gypse sur la tête du forage Natacha. A 100°C, on observe également une sursaturation vis-à-vis du gypse et de l'anhydrite.

Dans un second temps, les IS ont été calculés pour l'ensemble des eaux prélevées durant la campagne 2005-2006, sans intégrer les espèces siliceuses pour lesquelles les données n'ont pas été acquises lors de cette campagne. Les eaux thermales ainsi que les ETS sont sous-saturées en halite et à l'équilibre avec toutes les autres espèces (figure IV.6a). Il en est de même pour les eaux des piézomètres et de la nappe alluviale (figure IV.6c).

A leur émergence, les sources triasiques superficielles présentent des dépôts de carbonates, sous forme de travertins au niveau de la source RF et de précipitations de calcite dans la galerie EDF. Le caractère diffus de la source VS ne permet pas d'observer directement son émergence. Avant leur émergence, les ETS sont donc sursaturées en calcite. A leur émergence, du CO₂ est libéré vers l'atmosphère et la calcite peut précipiter. Les eaux prélevées présentent alors un IS à l'équilibre vis à vis de la calcite (figure IV.6b).

Lors de la réalisation du forage Natacha, des encroûtements ont été observés au sein des dépôts quaternaires de la zone d'émergence. La nature de ces encroûtements n'a pas pu être déterminée analytiquement mais il s'agirait de calcite (Duboeuf, communication personnelle). Etant donné que les eaux thermales sont à l'équilibre vis-à-vis de la calcite à toutes les températures où les IS ont été calculés, il semble que ces encroûtements aient été déposés par les eaux triasiques superficielles.

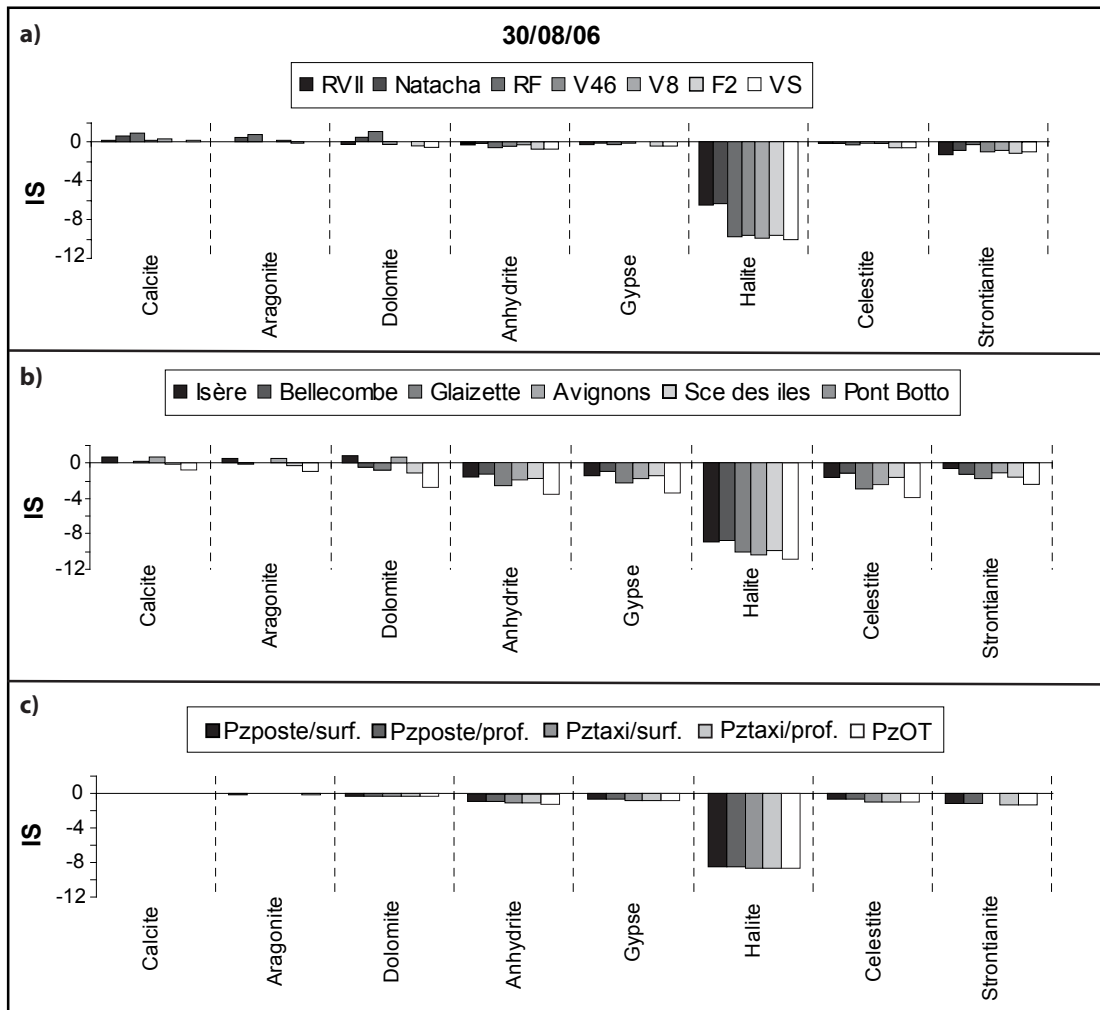


Figure IV.6 : Indices de saturation des différentes eaux prélevées, 30/08/06

Les géothermomètres ne peuvent être utilisés que si les espèces considérées ne sont pas à l'état sursaturé. Comme les eaux du forage Natacha ne présentent aucune sursaturation à la température de captage, l'application des géothermomètres est donc possible. Les résultats obtenus en appliquant les différents géothermomètres (annexe 7) sont représentés sur la figure IV.7. Certains géothermomètres ne sont pas adaptés au contexte de la Léchère : le géothermomètre Na-K à cause de l'échange entre Na et Ca mis en évidence au §II.1.1.6 et le géothermomètre à SO_4 à cause de la présence d'évaporites. Les géothermomètres, basés sur les autres espèces, donnent des températures concordantes, comprises entre 60 et 110°C (figure IV.7a). La méthode des IS permet également d'obtenir une température du même ordre de grandeur (figure IV.7b). La majorité des méthodes donne une température de l'ordre de 90°C.

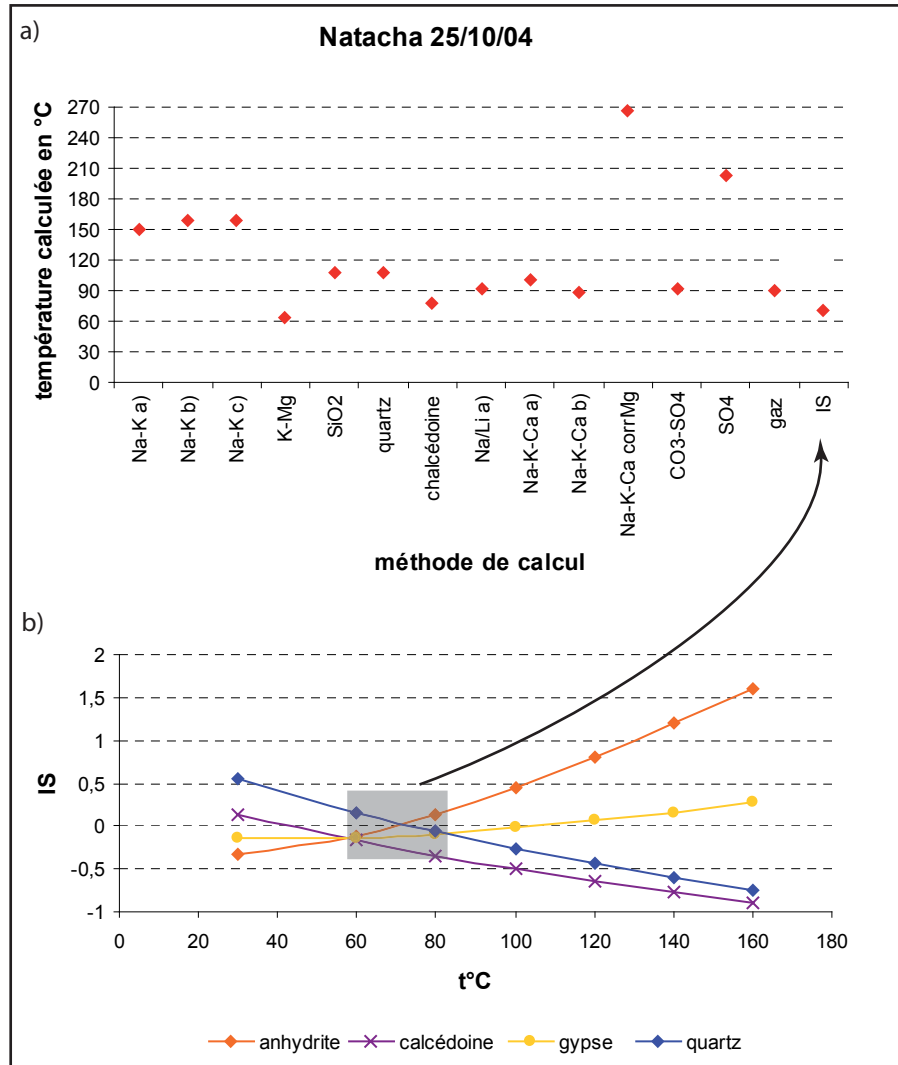


Figure IV.7 : a) Evaluation de la température atteinte par les eaux thermales de la Léchère à l'aide de différents géothermomètres
b) Evaluation de la température d'équilibre des eaux à partir des IS

Conclusion partielle

La minéralisation des eaux triasiques superficielles est sous-estimée puisqu'elles déposent toutes des carbonates à leur résurgence. Les encroûtements décrits comme de la calcite dans le remplissage quaternaire (Duboeuf, communication personnelle) ne peuvent être déposés que par des eaux triasiques superficielles puisque les eaux thermales ne sont jamais sursaturées vis-à-vis des espèces carbonatées. Par contre, elles deviennent sursaturées en gypse et anhydrite en se refroidissant.

D'après les calculs géothermométriques, nous retenons une température maximale atteinte par les eaux de 90°C. Pour un gradient géothermique moyen de 0,03°C/m, cette température correspond à une profondeur de 3 km sous la vallée de l'Isère. La cohérence de cette estimation de la température maximale atteinte par les eaux est vérifiée dans le chapitre V (§IV.3.2).

1.1.4) Analyses en Composantes Principales des données physico-chimiques

Maintenant que les IS des différentes eaux du secteur ont été calculés, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) de l'ensemble des données acquises lors de la campagne 2005-2006 va permettre de définir de manière précise les éléments marqueurs des trois aquifères présents dans la zone d'émergence puis de définir les conditions de mélange entre ces trois pôles .

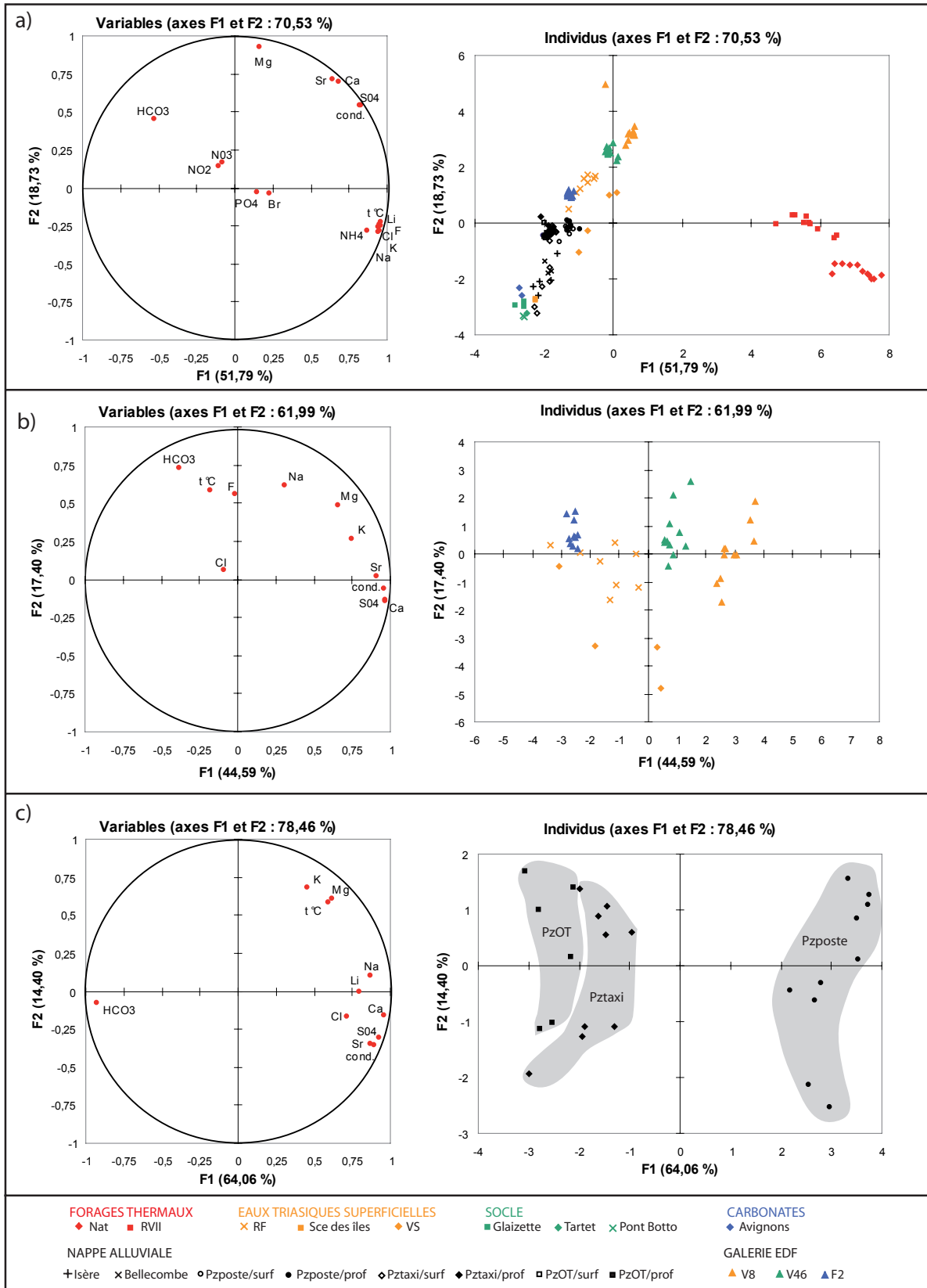


Figure IV.8 : ACP réalisées sur les données physico-chimiques de la campagne 2005-2006
 a) sur tous les points prélevés, b) sur les ETS, c) sur les piézomètres

Une première ACP (figure IV.8.a) a été réalisée sur tous les points prélevés ayant des données complètes et une balance ionique inférieure à 5% (130 analyses). Les axes F1 et F2 expriment 70, 53% de la variance. Sur le diagramme des variables, l'axe F1 (51,79%) est défini par les éléments Na, K, Cl, F, Li, NH_4 et la température. L'axe F2 (18,73%) est défini par l'élément Mg. Les éléments NO_3 , NO_2 , PO_4 et Br ne sont pas sur le cercle de corrélation. A l'inverse, les éléments Ca, SO_4 , Sr et la conductivité se situent sur le cercle de corrélation, dans le quart NE. De ce fait, ces éléments coexistent dans les eaux contenant les éléments définissant déjà les axes F1 et F2. L'élément HCO_3 , situé dans le quart NW, est anticorrélé aux éléments définissant l'axe F1. Ainsi, sur le diagramme des individus, le pôle profond (Nat et RVII) est clairement marqué par la température et les éléments Li, F, Cl, K, Na et NH_4 (axe F1) tandis que les ETS se distinguent par des fortes teneurs en Mg (axe F2). Les eaux du point F2 se distinguent des autres points de la galerie EDF par des teneurs plus élevées en HCO_3 (quart NW). Les eaux thermales et triasiques superficielles sont communément marquées par une forte conductivité ainsi que les éléments Sr, Ca et SO_4 (quart NE). Les autres eaux superficielles n'apparaissent marquées que par le HCO_3 .

Une deuxième ACP (figure IV.8.b) a été effectuée sur l'ensemble des ETS. Les axes F1 et F2 expriment 61,99% de la variance. Sur le diagramme des variables, l'axe F1 (44,59%) est défini par les éléments Ca, SO_4 , Sr et la conductivité. L'axe F2 (17,4%) est défini par les éléments F, HCO_3 et la température. L'élément Cl n'est pas sur le cercle de corrélation. Sur le diagramme des individus, le point F2 se distingue par sa teneur en HCO_3 et le point V8 est marqué de façon plus importante par les éléments Ca, SO_4 , Sr et la conductivité.

La dernière ACP (figure IV.8.c) est réalisée sur les analyses des trois piézomètres. Les axes F1 et F2 expriment 78,46% de la variance. Sur le diagramme des variables, l'axe F1 (64,06%) est défini par les éléments Na, Li, Ca, SO_4 , Sr, Cl et la conductivité. L'axe F2 (14,4%) est défini par l'élément HCO_3 . Les éléments K, Mg et la température, situés dans le quart NE, coexistent avec les éléments définissant l'axe F1. Le piézomètre poste est marqué par certains des éléments définissant le pôle profond (Na et Li) comme le révélait déjà sa température. A l'inverse, les deux autres piézomètres sont marqués par le HCO_3 , marqueur aussi bien des ETS que des eaux de la nappe alluviale.

Conclusion partielle

Bien que les faciès des eaux, présentes dans la zone d'émergence, soient très proches (figure IV.4), l'Analyse en Composantes Principales a permis de clairement les différencier. Le pôle profond est défini par des éléments issus du socle (F, Na et K), de la halite (Cl) ou encore de la matière organique (NH_4) (figure IV.9). Le Na est attribué ici au socle car un échange entre Ca et Na est mis en évidence au §II.1.1.6. Le pôle triasique superficiel est marqué par l'élément Mg provenant des dolomies. Le pôle alluvial n'est défini par aucun marqueur spécifique. Les pôles thermal et triasique sont communément marqués par les éléments Ca, SO_4 issus des gypses et anhydrites, tout comme le Sr (Kilchmann *et al.*, 2004). De même, les pôles triasique et alluvial sont marqués par le HCO_3 provenant des dolomies et carbonates.

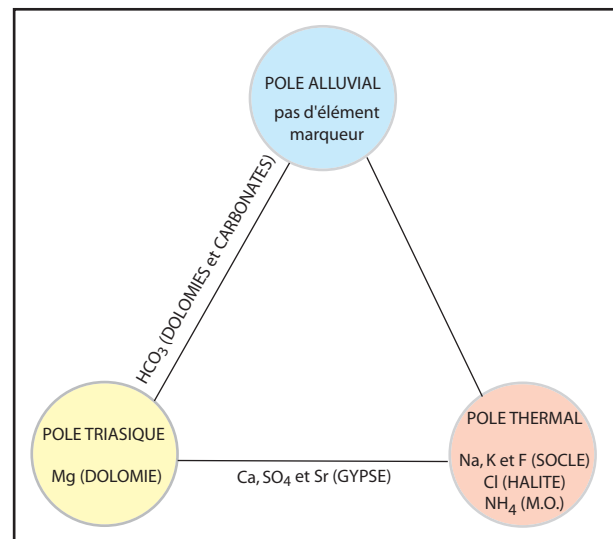


Figure IV.9 : Schéma systémique définissant les éléments marqueurs des différents pôles présents dans la zone d'émergence

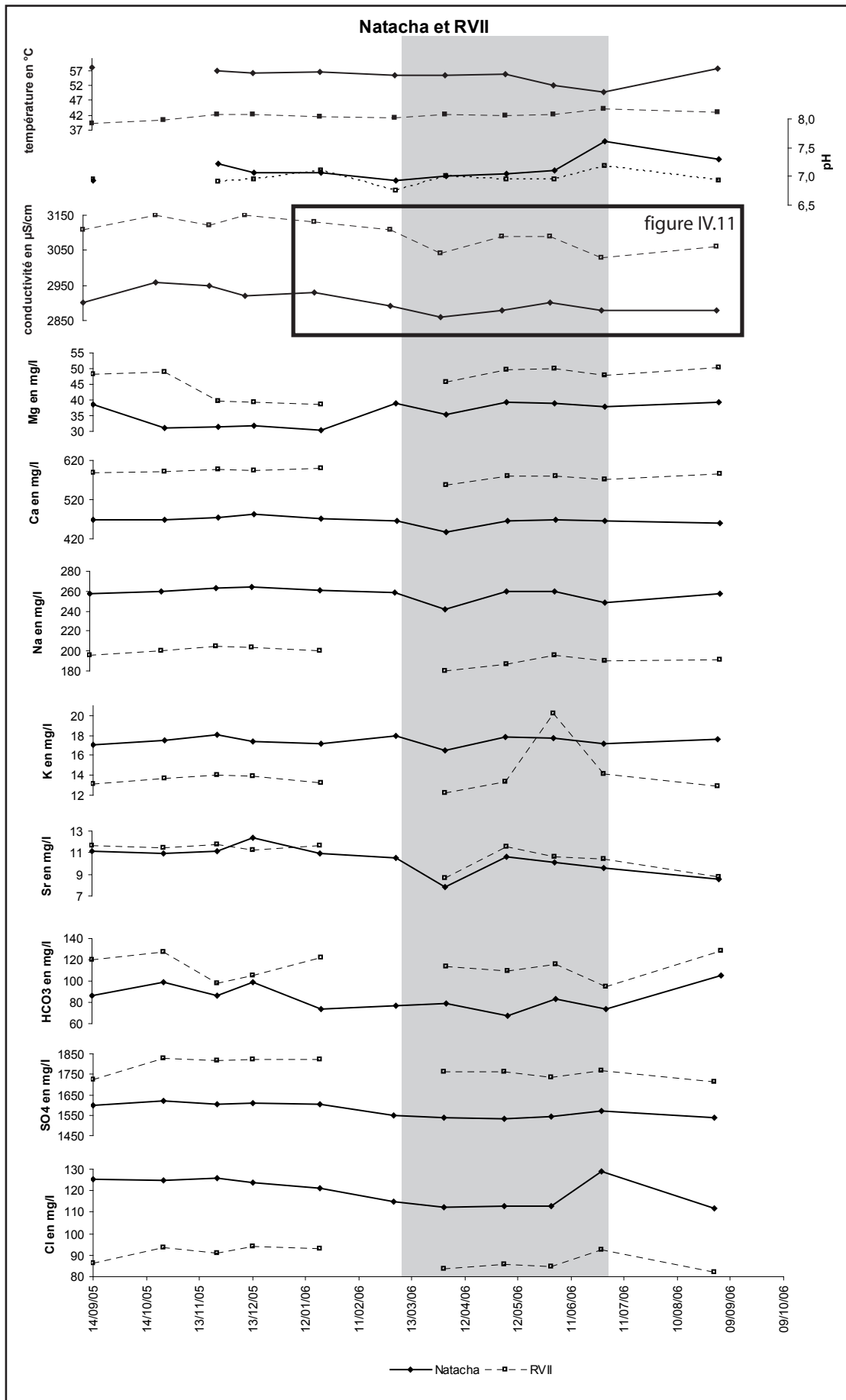


Figure IV.10 : Evolution des paramètres physico-chimiques des forages Natacha et RVII durant la campagne de prélèvement 2005-2006
en grisé : période de fonte nivale

1.1.5) Evolution temporelle des paramètres physico-chimiques

L'analyse de l'évolution temporelle des paramètres physico-chimiques va permettre de mettre en évidence les modes d'écoulement des eaux superficielles et profondes.

Pour les forages Natacha et RVII (figure IV.10), la température (57°C pour Natacha et 40°C pour RVII) et le pH (7 pour les deux forages) sont stables sur la période observée et les variations de conductivité (environ 2900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour Natacha et 3100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour RVII) restent inférieures à 3%. Cependant, pendant la période de fonte nivale (mars-avril), on observe une légère augmentation de la conductivité sur les deux forages, observée également sur l'enregistrement en continu (figure IV.11) et concomitante avec l'augmentation des niveaux piézométriques (figure III.9). Les éléments marqueurs du pôle thermal (Na, K et Sr) montrent la même augmentation que la conductivité durant la période de fonte nivale (figure IV.10). Cette augmentation de la conductivité et des teneurs des marqueurs du pôle thermal est vraisemblablement due à une chasse des eaux légèrement plus minéralisées, à plus long temps de séjour. Celles-ci peuvent provenir de zones de faible perméabilité, réactivées par la mise en charge de la période de fonte. Cette observation plaide en faveur de circulations par une porosité de fractures.

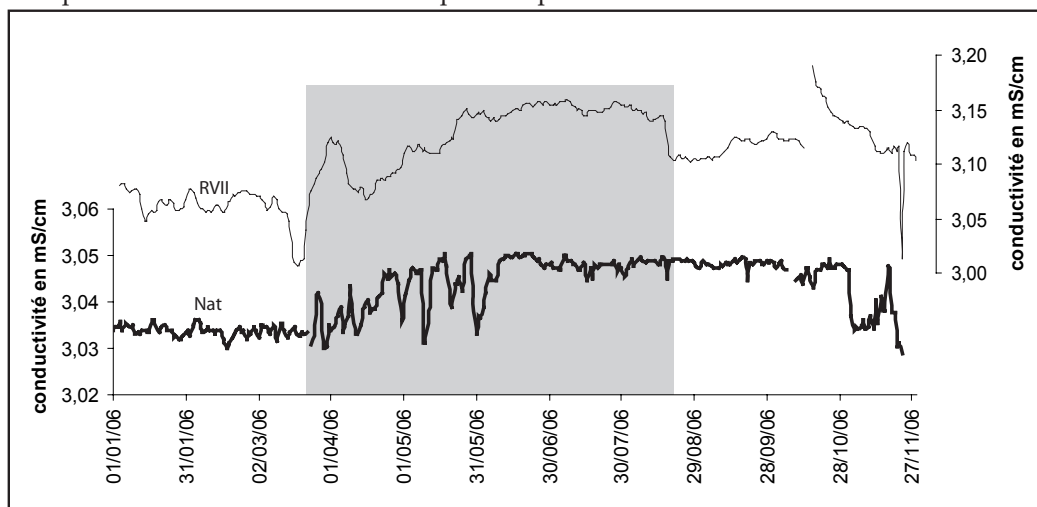


Figure IV.11 : Conductivité des forages Natacha et RVII enregistrée en continu par le système NAPAC (année 2006)

Parmi les ETS (figure IV.12), la source RF n'a pas le même comportement que les points de la galerie EDF vis-à-vis de la température. La température de la source RF, située dans la zone d'hétérothermie, suit les variations de température atmosphérique tandis que les points de la galerie EDF présentent des variations de très faible amplitude, en restant aux alentours de 11°C. Durant la fonte nivale, la source RF est marquée par une diminution de la conductivité et de la teneur en SO_4 qui peut s'expliquer par une simple dilution par des eaux de fonte. Par contre, dans la galerie EDF, la diminution de conductivité est accompagnée d'une augmentation de température (14°C pour V46 le 31/03/06). Le même phénomène a été observé l'année suivante avec une amplitude moins importante. Cette observation semble indiquer que la fonte hivernale mène à une mobilisation d'eau superficielle à long temps de séjour, présente dans les zones de faible perméabilité, (responsable d'une augmentation de la température), mais issue des formations du socle (ce qui expliquerait la diminution de conductivité). L'identification d'une contribution d'eau issue des micaschistes, pour les trois points de la galerie, plaide en faveur d'un drainage des écoulements des micaschistes vers l'accident de la Léchère.

En ce qui concerne les piézomètres (figure IV.13), les paramètres des eaux prélevées à la surface et à 20m de profondeur dans le piézomètre poste sont identiques sauf le 19 janvier 2006. Ce prélèvement a été effectué sous la pluie, il apparaît alors que la surface de l'aquifère alluvial est influencée, de manière instantanée, par les épisodes pluvieux. La conductivité et les concentrations en éléments majeurs ne présentent pas de réaction marquée à la fonte nivale. En effet, les eaux prélevées dans le piézomètre poste résultent d'un mélange entre les eaux de la nappe alluviale, les ETS et une petite quantité d'eau thermique. On a vu précédemment que les eaux thermales présentent une augmentation de ces paramètres durant la période de fonte alors que les ETS présentent une diminution. De ce fait, les paramètres des piézomètres, résultant d'un mélange entre ces deux pôles, restent constants.

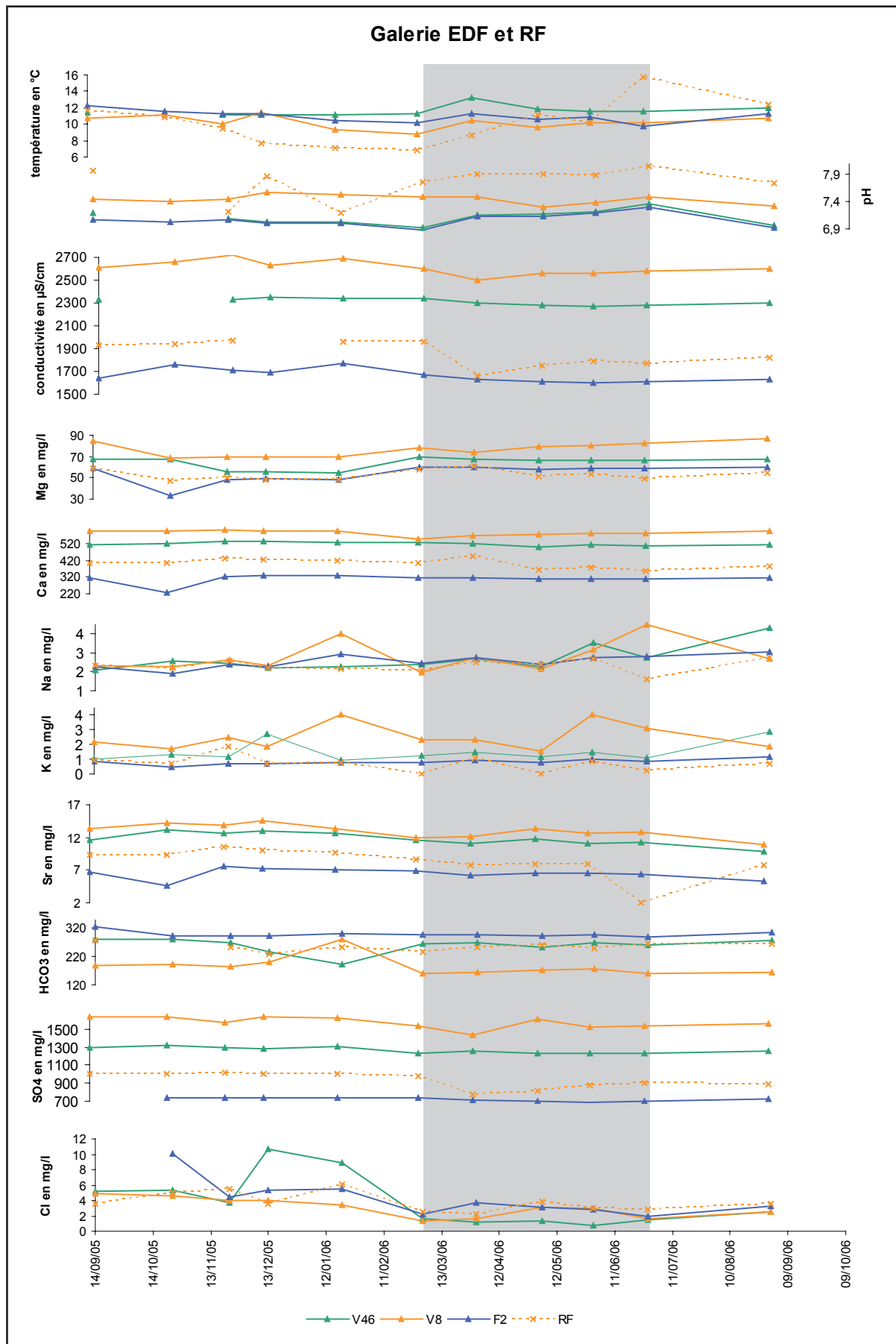


Figure IV.12 : Evolution des paramètres physico-chimiques des points de la galerie EDF et de la source RF durant la campagne de prélèvement 2005-2006
 en grisé : période de fonte nivale

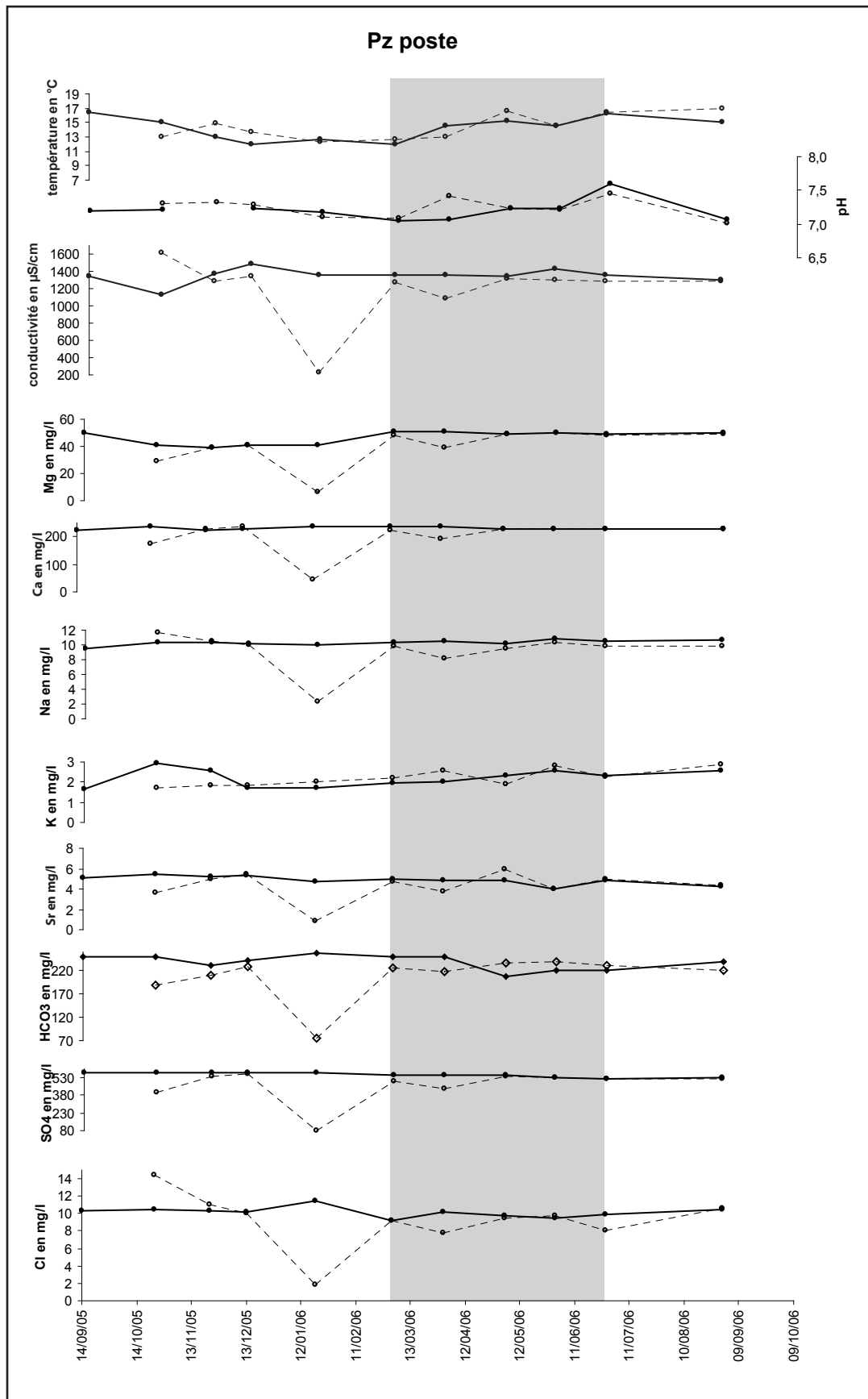


Figure IV.13 : Evolution des paramètres physico-chimiques du piézomètre poste durant la campagne de prélèvement 2005-2006 en trait plein : à 20 m de profondeur, en trait pointillé : à la surface piézométrique, en grisé : période de fonte nivale

Conclusion partielle

Les forages thermaux comme les eaux de la galerie EDF présentent des variations physico-chimiques de faible amplitude (inférieur à 15%). Les systèmes profond et superficiel ne sont pas marqués par des phénomènes de dilution lors des épisodes de recharge.

Dans les forages thermaux (RVII et Natacha), la période de fonte est marquée par une augmentation de la conductivité, concomitante à l'augmentation des niveaux piézométriques. Ceci implique que leur alimentation ne se fait pas par une porosité de type karstique, contrairement à ce que peut laisser penser la présence d'un gouffre dans les gypses de la galerie EDF, mais plutôt par une porosité de fractures.

Dans la galerie EDF, la légère modification des paramètres physico-chimiques durant la période de fonte nivale met en évidence que les écoulements, ayant lieu au sein des micaschistes, sont en partie drainés vers l'accident de la Léchère.

1.1.6) Echange Ca/Na et interaction avec les dolomies

La réalisation de diagrammes binaires va permettre de mettre en évidence les phénomènes d'interaction eau-roche. A titre comparatif, les analyses des eaux thermales de Salins-les-Thermes et Brides-les-Bains (Siméon, 1980) ont été prises en compte.

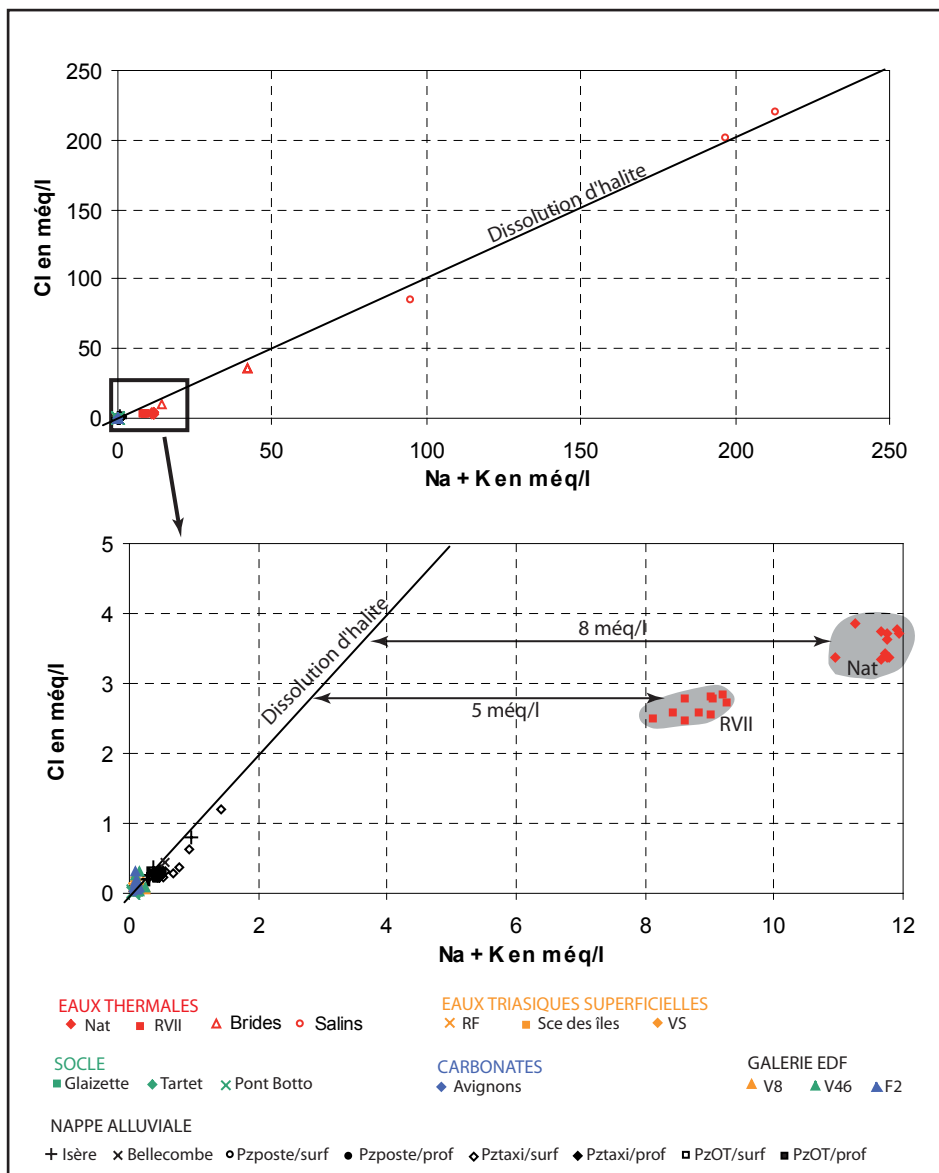


Figure IV.14 : Diagramme Cl en fonction de Na des eaux des différents aquifères du site de la Léchère ainsi que des eaux thermales de Brides et Salins (Siméon, 1980)

La relation entre Na et Cl (figure IV.14) permet de constater que les eaux thermales de la Léchère sont marquées par un excès de 5 (RVII) à 8 m éq/l (Nat) en Na par rapport à la droite de dissolution de la halite. Le Na des eaux de la Léchère ne provient donc pas exclusivement de la dissolution de la halite. A l'inverse, les eaux de Brides et Salins, qui présentent des teneurs nettement plus élevées, se retrouvent alignées sur cette droite. L'excédent en Na des eaux thermales de la Léchère est formé soit (i) par interaction (dissolution, oxydation) avec des roches cristallines soit (ii) par échange cationique entre Na et Ca (André *et al.* 2005). En effet, il est classiquement observé que les eaux de socle superficielles, qui présentent un faciès bicarbonaté calcique (Ca-HCO₃), passent à un faciès bicarbonaté sodique (Na-HCO₃) en profondeur (Pastorelli *et al.* 2001, Manzoor *et al.* 2002 et Gal 2005).

Dans le secteur de la Léchère, les eaux thermales se distinguent des eaux superficielles. En effet, elles ne s'alignent pas sur la droite de dissolution de l'anhydrite (figure IV.15) et présentent un déficit de 5 (RVII) à 8 m éq/l (Nat) de Ca. Ce déficit est à peu près équivalent à l'excès de Na, observé précédemment (figure IV.14). Le Na provient donc d'un échange entre Ca et Na, favorisé par des températures élevées. L'étude hydrogéochimique des eaux des forages réalisés dans le cadre du projet Lyon-Turin Ferroviaire (LTF) (aquifère siliceux) montre également ce phénomène d'échange cationique entre Ca et Na (Novel et Zuppi, 2000 et De Matteis, 2005).

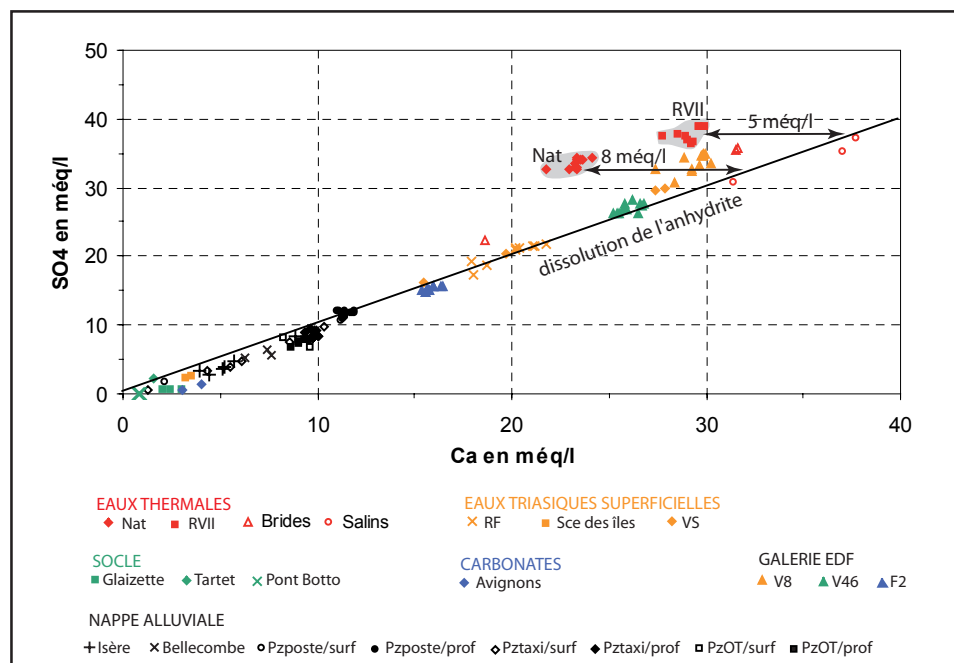


Figure IV.15 : Diagramme SO₄ en fonction de Ca des eaux des différents aquifères du site de la Léchère ainsi que des eaux thermales de Brides et Salins (Siméon, 1980)

Les points prélevés dans les carbonates s'alignent avec la droite de dissolution de la calcite (figure IV.16), tandis que les ETS et les eaux thermales gardent une concentration constante en HCO₃, quelle que soit la teneur en Ca. En effet, pour ces dernières, le Ca provient essentiellement de la dissolution des sulfates et n'est pas ou peu lié à la dissolution des carbonates. Cependant, les eaux thermales présentent des teneurs en HCO₃ plus faibles que les ETS. Deux hypothèses peuvent expliquer cette différenciation entre ETS et eaux thermales. Premièrement, ceci peut s'expliquer par le fait que les dolomies sont discontinues le long de l'accident (cf. chapitre II, §III.7), les roches carbonatées (dolomies et schistes) peuvent ne pas être présentes dans le circuit emprunté par les eaux profondes. Deuxièmement, les eaux thermales peuvent précipiter de la calcite au cours de la remontée vers la surface et s'appauvrir alors en HCO₃.

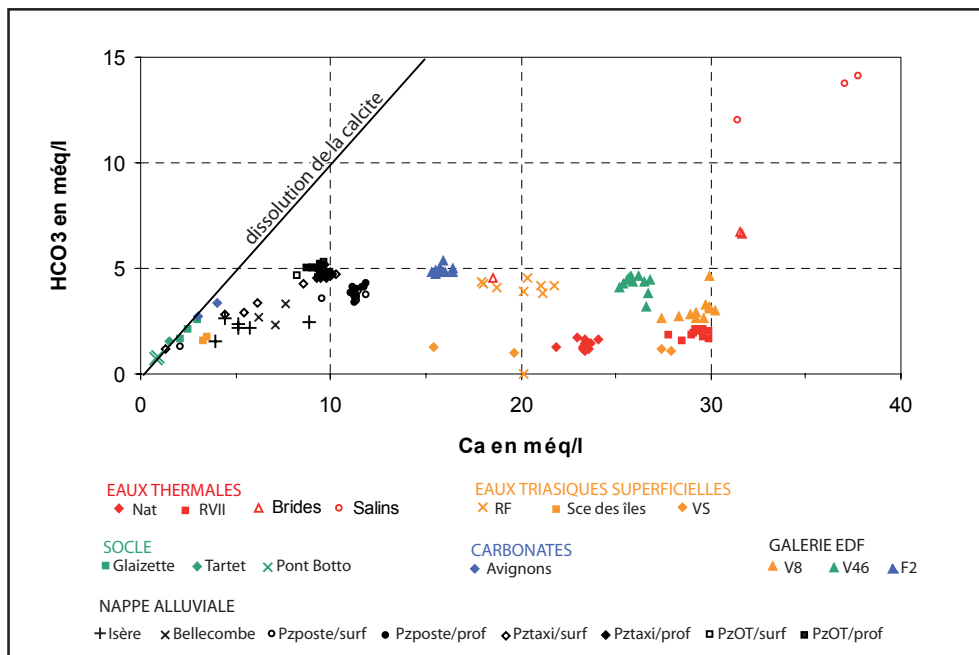


Figure IV.16 : Diagramme HCO₃ en fonction de Ca des eaux des différents aquifères du site de la Léchère ainsi que des eaux thermales de Brides et Salins (Siméon, 1980)

Les eaux issues des carbonates, du socle et de la nappe alluviale s’alignent sur la droite de dissolution d’un calcaire dolomitique (figure IV.17). Les ETS semblent être des eaux intermédiaires, influencées aussi bien par la dissolution de calcaire dolomitique que par la dissolution des sulfates. Les eaux thermales ainsi que le point VS présentent des teneurs en Mg plus faibles que les autres ETS. Cet appauvrissement en Mg, associé à celui en HCO₃, des eaux thermales confirme que la différenciation entre eaux triasiques superficielles et eaux thermales s’explique par la présence ou non de dolomie et schistes carbonatés le long du contact.

Pour ces deux derniers graphiques, les eaux de Brides et Salins ne se différencient pas des eaux triasiques superficielles, elles restent donc vraisemblablement en contact avec des calcaires et dolomies.

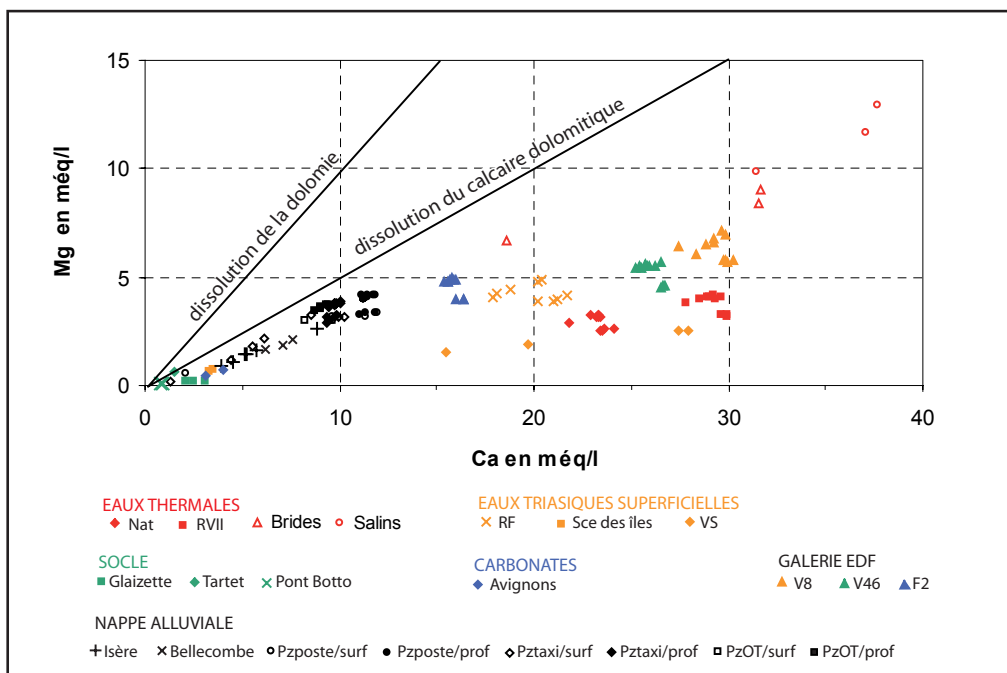


Figure IV.17 : Diagramme Mg en fonction de Ca des eaux des différents aquifères du site de la Léchère ainsi que des eaux thermales de Brides et Salins (Siméon, 1980)

Conclusion partielle

Certaines interactions entre les eaux thermales et les roches encaissantes ont été mises en évidence. Ainsi, les eaux thermales dissolvent des sulfates (gypse) tout au long de leur parcours et se chargent progressivement en Ca et SO_4 . En profondeur, la géométrie du contact varie et la présence de dolomies n'est pas continue. Ainsi, les eaux thermales ne peuvent plus se charger en HCO_3 et Mg, contrairement aux ETS. Toujours en profondeur, les argiles des MFI sont le siège d'un échange entre Ca et Na. Les eaux de Brides et Salins ne présentent pas les mêmes caractéristiques. Tout d'abord, elles sont toutes deux majoritairement marquées par des échanges avec de la halite et restent en contact avec des calcaires et dolomies pendant leur parcours.

1.1.7) Evaluation des phénomènes de mélange dans la zone d'émergence

Le remplissage quaternaire est supposé être le siège d'un mélange entre trois pôles : les eaux thermales, les ETS et les eaux de la nappe alluviale (Lemahieu, 1986 et SOGREAH, 1999). La première ACP réalisée sur l'ensemble des points prélevés peut être reprise ici afin d'évaluer qualitativement ces phénomènes de mélange (figure IV.18). En effet, les deux axes de l'ACP peuvent être utilisés comme des macro-paramètres, permettant de prendre en compte toutes les variables en même temps. Sur ce diagramme, les eaux mélangées (RVII et les piézomètres) se trouvent globalement à l'intérieur du triangle défini par les trois pôles : le pôle thermal (Nat), le pôle triasique (V8) et le pôle alluvial (Bellecombe). Le forage RVII résulte d'un mélange entre le pôle thermal et le pôle triasique sans être influencé par le pôle alluvial. De même, les piézomètres sont marqués par une très faible contribution du pôle thermal (quelques %) et les contributions des pôles triasique et alluvial semblent à peu près équivalentes.

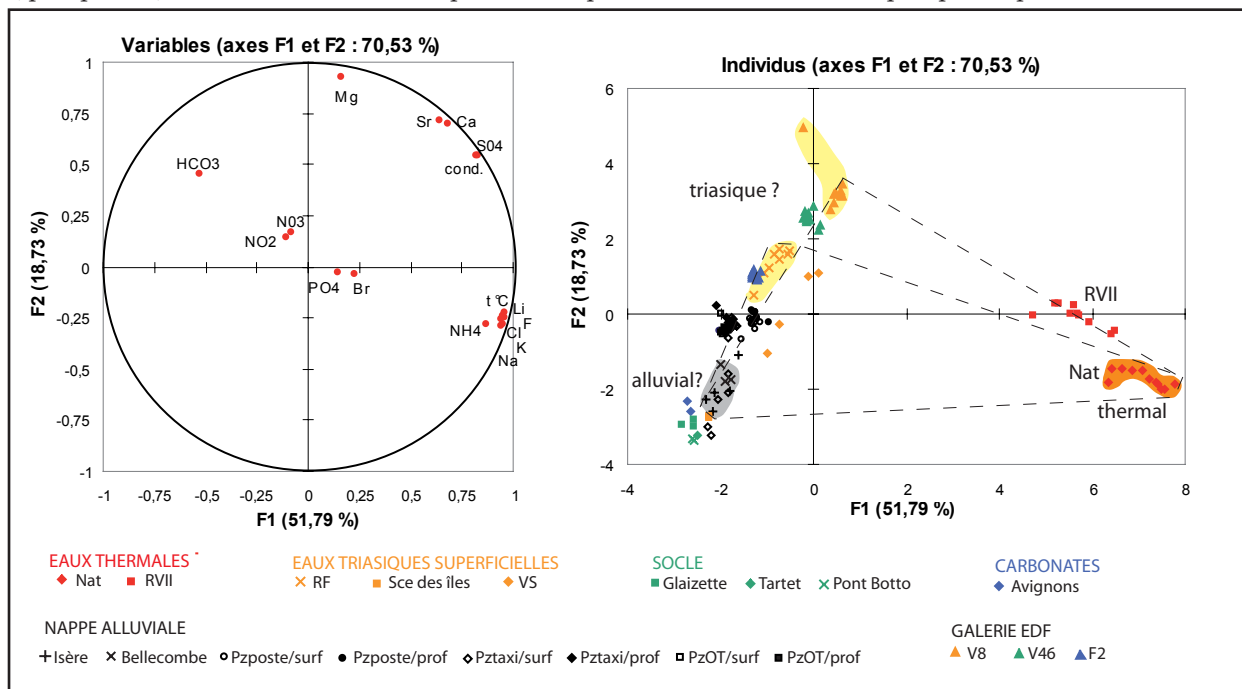


Figure IV.18 : Evaluation des phénomènes de mélange à partir de l'ACP réalisée sur l'ensemble des échantillons prélevés durant la campagne 2005-2006

Dans le détail, les piézomètres s'écartent légèrement du triangle défini par les trois pôles. De plus, on devrait plutôt considérer la source RF comme représentative du pôle triasique. En effet, les ETS, susceptibles de rejoindre la zone d'émergence, sont nécessairement des eaux résultant d'un mélange entre les trois types d'eau prélevés dans la galerie EDF. La source RF en est un exemple. Ainsi, si l'on prend comme pôle triasique cette source RF, le forage RVII ne se trouve plus à l'intérieur du triangle. Il semblerait alors qu'au moins un des pôles ne soit pas bien représenté par les échantillons prélevés. Tout d'abord, l'échantillon Bellecombe a été prélevé dans un puits situé entre les alluvions de l'Isère et le cône de déjection du Morel. Il n'est vraisemblablement pas un bon représentant de la nappe alluviale. De plus,

la différence de minéralisation entre Natacha et RVII (2900 et 3100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement) est restée jusque là sans explication. Deux hypothèses peuvent être avancées :

- 1) Les eaux du forage RVII ont un parcours différent de celles du forage Natacha. En effet, elles doivent remonter le long de l'accident jusqu'au fond de la vallée glaciaire puis circuler dans l'écroulement ancien. Ce parcours final permettrait alors aux eaux du forage RVII d'acquérir une minéralisation plus importante.
- 2) Le pôle triasique superficiel est plus minéralisé que les points observés et dépasse la conductivité de Natacha. En effet, le forage RVII, résultant d'un mélange avec le pôle triasique, est enrichi en éléments du pôle triasique superficiel (Mg, Ca, Sr, SO_4) (figure IV.4) par rapport à Natacha. La plus forte minéralisation de RVII serait alors due à un mélange avec des ETS plus minéralisées que celles que l'on a pu prélever. Cette hypothèse est appuyée par le fait que les émergences des ETS sont marquées par des dépôts carbonatés, impliquant que la minéralisation des ETS n'est pas la même avant leur émergence.

Pour conclure, seul le pôle thermal semble défini de manière sûre et des doutes existent sur les deux autres pôles. Pour définir le pôle alluvial, la seule solution réside dans la réalisation d'un forage à l'amont de la zone d'émergence. Une meilleure définition du pôle triasique superficiel semble difficile puisque l'ensemble des points accessibles a été prélevé.

1.2. Données acquises sur les forages thermaux (depuis 1949)

A la lumière de ces résultats sur l'ensemble des aquifères du secteur, les anciennes données sur les forages sont réinterprétées. Chaque forage thermal réalisé sur le site de la Léchère capte un horizon différent :

- les forages anciens RI, RII, RIII, RIV et RV traversent uniquement les alluvions ;
- les forages RVI, RVII et RX captent les eaux dans l'écroulement ancien ;
- les forages RVIII et RIX accèdent uniquement à des eaux superficielles issues du socle ;
- seul le forage Natacha capte directement les eaux dans l'aquifère thermal, à 200m de profondeur, soit 100m sous le fond de la vallée glaciaire.

1.2.1) Données disponibles

Depuis la réalisation de chacun des forages thermaux, la physico-chimie est suivie de manière plus ou moins régulière par des laboratoires différents (annexe 8). A partir de 1965, des analyses bactériologiques sont effectuées sur les forages RI, RII, RIII et RIV. Ces analyses s'accompagnent d'une mesure systématique de la température, de la résistivité ainsi que des teneurs en HCO_3^- , Cl et occasionnelle en SO_4 . Nous disposons donc d'un suivi relativement régulier de ces 5 paramètres. Les autres éléments majeurs sont analysés de façon mensuelle, trimestrielle ou annuelle suivant les périodes et suivant les forages. Un suivi régulier des teneurs en éléments majeurs existe depuis 1997 sur RII (trimestriel), RVII et Natacha (mensuel). Le forage RII a été cimenté en 2006.

1.2.2) Les faciès chimiques des différents forages

La plupart des forages thermaux réalisés sur le site de la Léchère présentent des faciès sulfatés calciques et sodiques relativement proches (tableau IV.3 et figure IV.19). Seuls les deux forages qui captent de l'eau froide (RVIII et RIX) ont des faciès sulfatés calciques et magnésiens, comparables à ceux des ETS. Au début de son exploitation, RI est le forage qui présente la minéralisation la plus proche du forage Natacha.

	Ca	Mg	K	Na	Cl	SO4	HCO3	t°C
RI 25/04/1952	539	44	20	275	154	1771	105	54
RII 13/10/1949	508	48	35	210	119	1709	45	47,7
RII 25/07/2002	386	48	8	92	48	1067	220	28,7
RIII 13/10/1949	495	46	33	215	115	1658	50	51
RIII 21/04/1986	527	53	11	160	75	1640	133	42,6
RIV 01/01/1953	536	48	35	211	122	1762	90	51
RIV 17/01/1991	570	46	17	235	129	1909	97	?
RV 12/01/1984	420	45	15	239	100	1450	116	47
RV 17/01/1991	550	46	16	225	118	1785	106	?
RVI 01/01/1987	510	50	11	202	92	1650	128	45,2
RVI 06/05/1992	521	55	13	168	80	1625	141	43
RVII 1987	535	38	15	263	125	1800	97	57,9
RVII 29/12/2004	580	47	14	195	91	1791	117	47,3
RVIII 1994	557	73	4	22	2	1456	138	15
RIX 1994	514	60	1	2	1	1272	240	22
RX 12/03/1997	580	44	17	225	105	1740	107	54
Natacha 23/09/1998	437	33	19	282	136	1670	77	63
Olod 10/12/1984	422	48	14	174	86	1331	171	44

Tableau IV.3 : Tableau des analyses des différents forages thermaux pour chaque forage : analyse la plus ancienne et la plus récente, souligné en rouge : concentration maximale, souligné en gris : concentration minimale

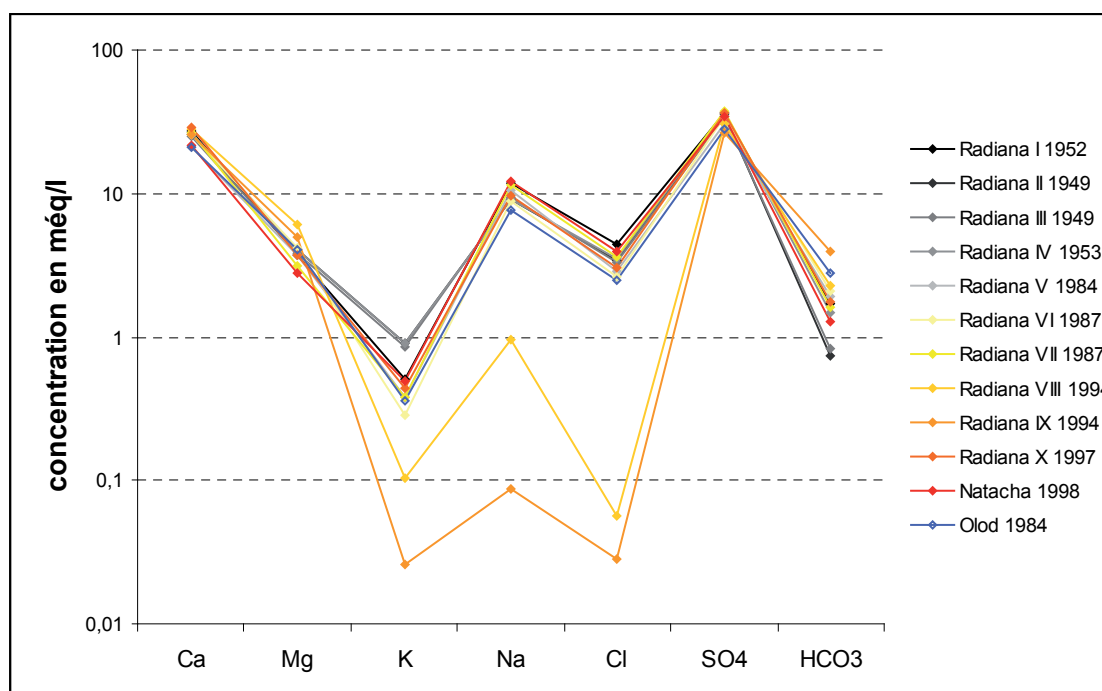


Figure IV.19 : Diagrammes de Schoeller-Berkalov des eaux des forages thermaux de la Léchère seules les analyses les plus anciennes ont été représentées pour chaque forage

1.2.3) ACP des analyses physico-chimiques des forages thermaux

Une ACP a été réalisée sur les analyses physico-chimiques des différents forages (figure IV.20). Les axes F1 et F2 expriment 87,47% de la variance. L'axe F1 (68,8%) est défini par les éléments Na, K, Cl, SO₄ et la température du côté positif et par les éléments Mg et HCO₃ du côté négatif. L'axe F2 (18,67%) est défini par l'élément Ca. Les forages RVIII et RIX se différencient de tous les autres forages. Ceux-ci sont marqués par les éléments du pôle triasique (Mg et HCO₃) et peuvent être considérés comme des eaux triasiques superficielles, au même titre que les eaux de la galerie EDF. Tous les autres forages thermaux se situent du côté positif de l'axe F1 avec quelques petites variations. Ainsi, Olod et RVI sont légèrement marqués par le pôle superficiel. L'axe 2 permet de différencier les forages RI, RII, RIII, RIV, RVII et RX du forage Natacha par une plus forte teneur en Ca.

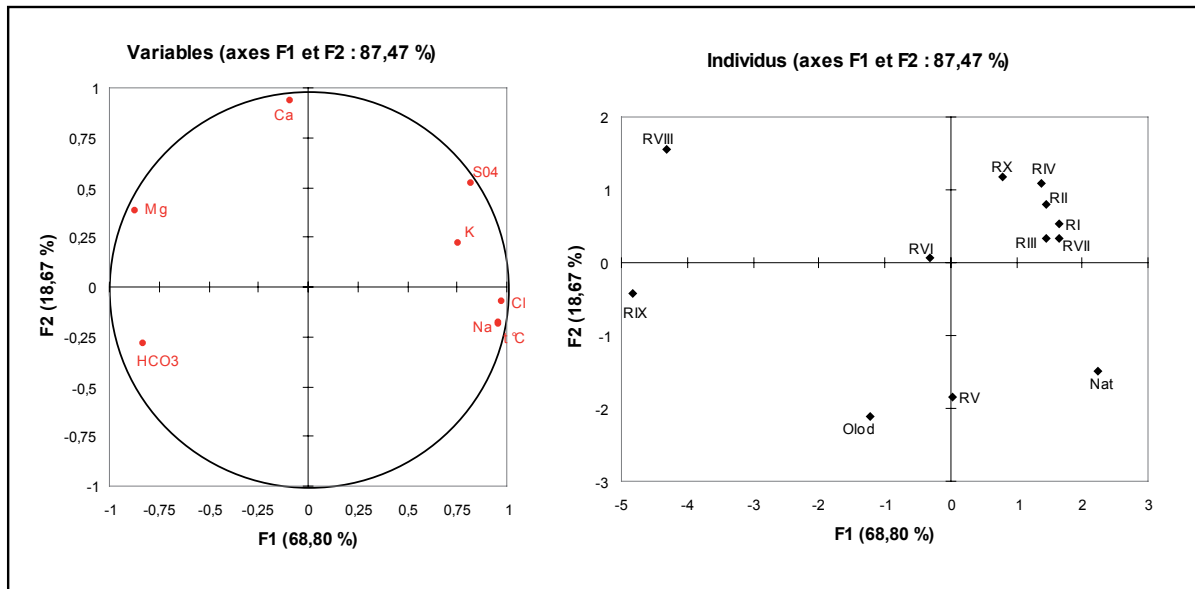


Figure IV.20 : ACP réalisée sur les analyses physico-chimiques des forages thermaux de la Léchère (analyses les plus anciennes)

Tous les forages thermaux réalisés avant Natacha captent les eaux au sein du remplissage quaternaire. Bien que les trois pôles ne soient pas bien définis et que leur composition soit variable dans le temps, les analyses des forages thermaux ont été intégrées à l'ACP réalisée sur les points de la campagne 2005-2006 (figure IV.21) pour tenter d'évaluer les proportions de mélange. La définition des axes de cette ACP a été décrite au §II.1.1.4.

Ainsi, au début de leur exploitation, les forages RI, RII, RIII, RIV et RVII (groupe 1) ne résultent pas d'un mélange avec de l'eau superficielle mais représentent plutôt une variabilité de la composition du pôle thermal. A l'inverse, les forages RV, RVI et RX (groupe 2) semblent contenir de l'eau superficielle dès le début de leur exploitation. Entre 1987 et 2005, les eaux du forage RVII ont évolué vers un mélange entre eau thermique et ETS (figure IV.22). De même, entre 1949 et 2002, les eaux du forage RII ont évolué vers un mélange constitué majoritairement d'eau superficielle, comparable aux eaux des piézomètres mais avec une proportion d'eau thermique un peu plus importante.

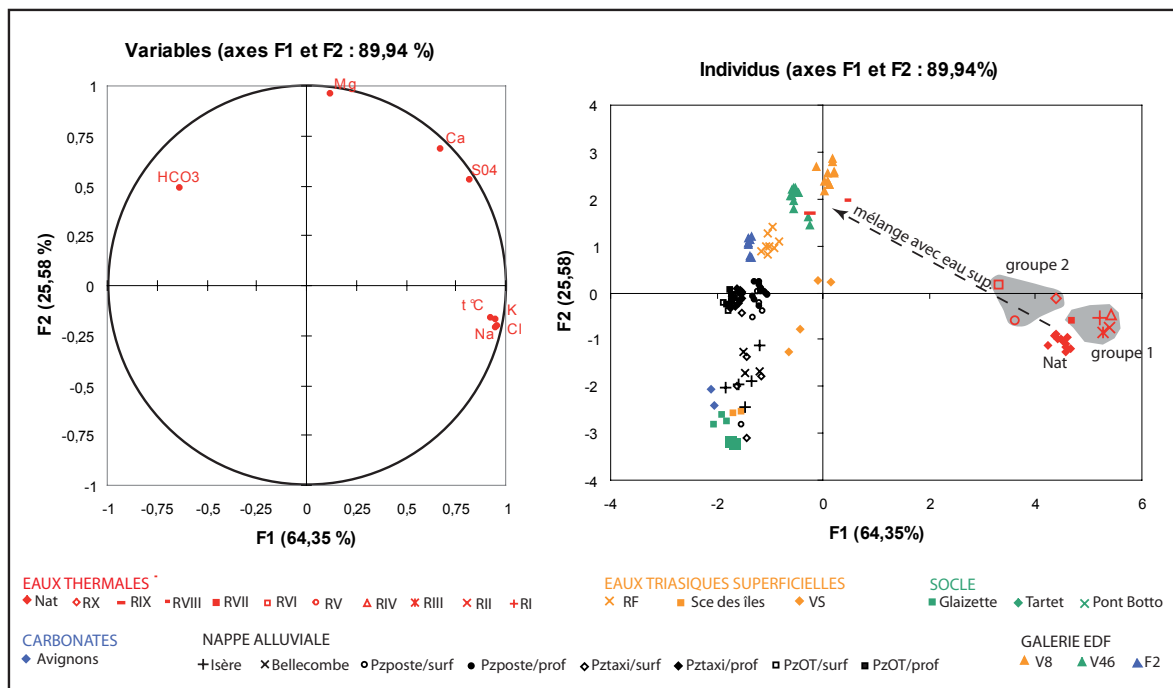


Figure IV.21 : Evaluation des proportions de mélange dans les forages thermaux à partir de l'ACP réalisée sur l'ensemble des échantillons prélevés durant la campagne 2005-2006 associé au analyses des forages thermaux (analyses les plus anciennes)

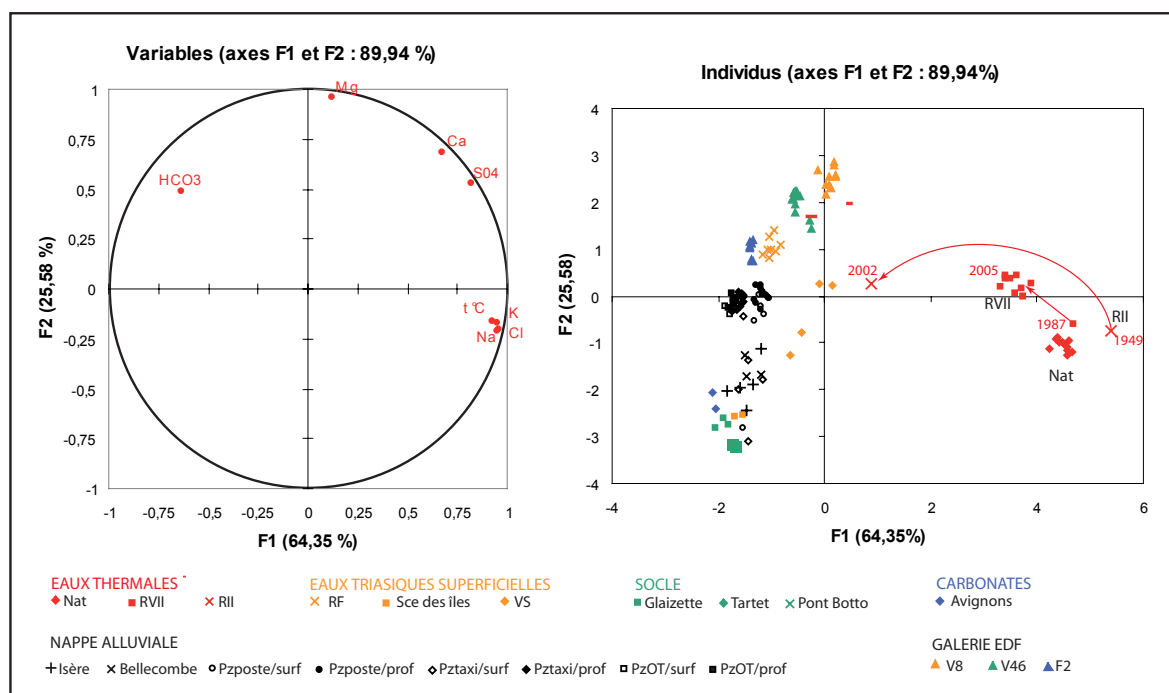


Figure IV.22 : Evolution des eaux des forages RII et RVII entre le début de leur exploitation et aujourd'hui

1.2.4) Evolution temporelle des paramètres physico-chimiques

Le forage RII, suivi depuis 1949, est marqué par une diminution progressive des marqueurs du pôle thermique ($t^{\circ}\text{C}$, SiO_2 , Na, K et Cl) et une augmentation des marqueurs du pôle triasique superficiel (Mg et HCO_3) (figure IV.23). Il semble que de 1975 à 1998 l'augmentation progressive de la contribution du pôle superficiel soit due à la fois à l'évolution de l'exploitation thermique et à la diminution de la pluviométrie (figure I.14). D'une part, l'augmentation de l'exploitation thermique mobilise les eaux superficielles en créant un flux descendant et d'autre part, la diminution de la pluviométrie mène à la diminution du niveau piézométrique de l'aquifère thermique. En revanche, il est clair que la modification très brutale de tous les paramètres de RVII est uniquement due aux pompages réalisés sur RX en 1997 puis sur Natacha en 1998.

Le forage RVII, suivi depuis 1987, montre les mêmes tendances à la diminution des marqueurs du pôle thermique et à l'augmentation des marqueurs du pôle triasique superficiel (figure IV.24). Là aussi l'essai par pompage du forage Natacha a eu un fort impact sur la qualité physico-chimique de RVII. Il a notamment provoqué de fortes fluctuations de la température, vraisemblablement responsables de la prolifération des légionelles (figure I.29). Depuis la mise en exploitation régulière de Natacha, les paramètres du forage RVII restent stables.

Le forage Natacha présente des caractéristiques physico-chimiques relativement stables depuis 1999 (figure IV.25) où les fluctuations restent inférieures à 15%. Cette stabilité des paramètres indiquent bien que le forage Natacha n'évolue pas vers un mélange avec des eaux superficielles. Au moment de sa mise en exploitation (entre septembre 1998 et mars 1999), la température, la conductivité et les teneurs en SiO_2 , Cl et HCO_3 présentent une nette augmentation suivie d'une diminution avant de se stabiliser. Les variations des autres éléments restent dans la fourchette des 15%. Il semblerait que la mise en exploitation mobilise des eaux qui étaient stagnantes sous le bouchon semi-perméable du remplissage quaternaire. Le système s'est équilibré en quelques mois.

Conclusion partielle

Depuis 1949, les mises en exploitation des différents forages ont fait diminuer de façon importante la contribution du pôle thermique dans les forages RII et RVII. Notamment, la mise en exploitation du forage Natacha est responsable de la diminution du débit d'eau thermique rejoignant le remplissage quaternaire et de l'évolution du forage RII vers un mélange constitué majoritairement d'eaux superficielles.

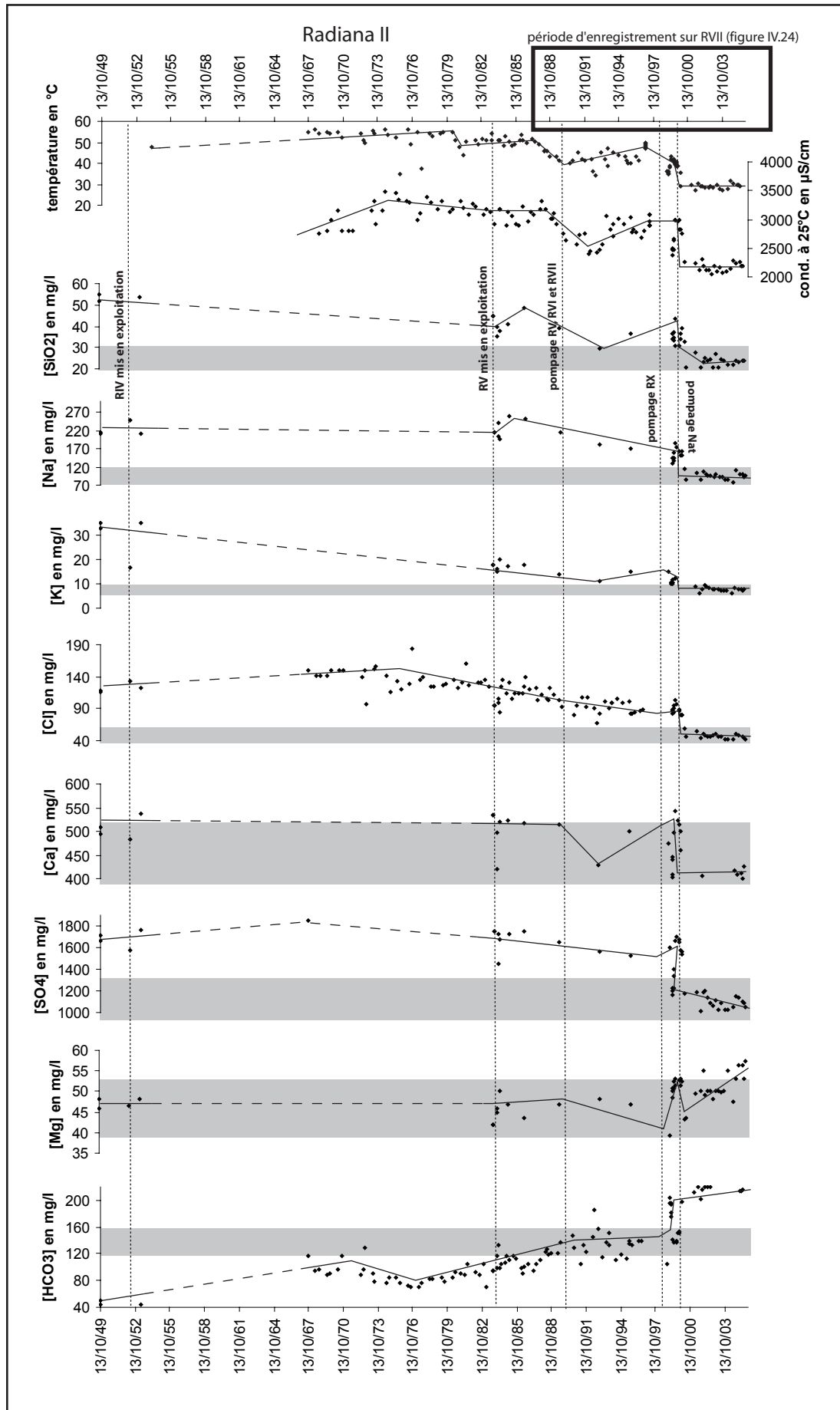


Figure IV.23 : Evolution des paramètres physico-chimiques du forage RII de 1949 à 2003
 cadre gris : +/- 15% de la moyenne, traits pleins et tiretés : tendance générale

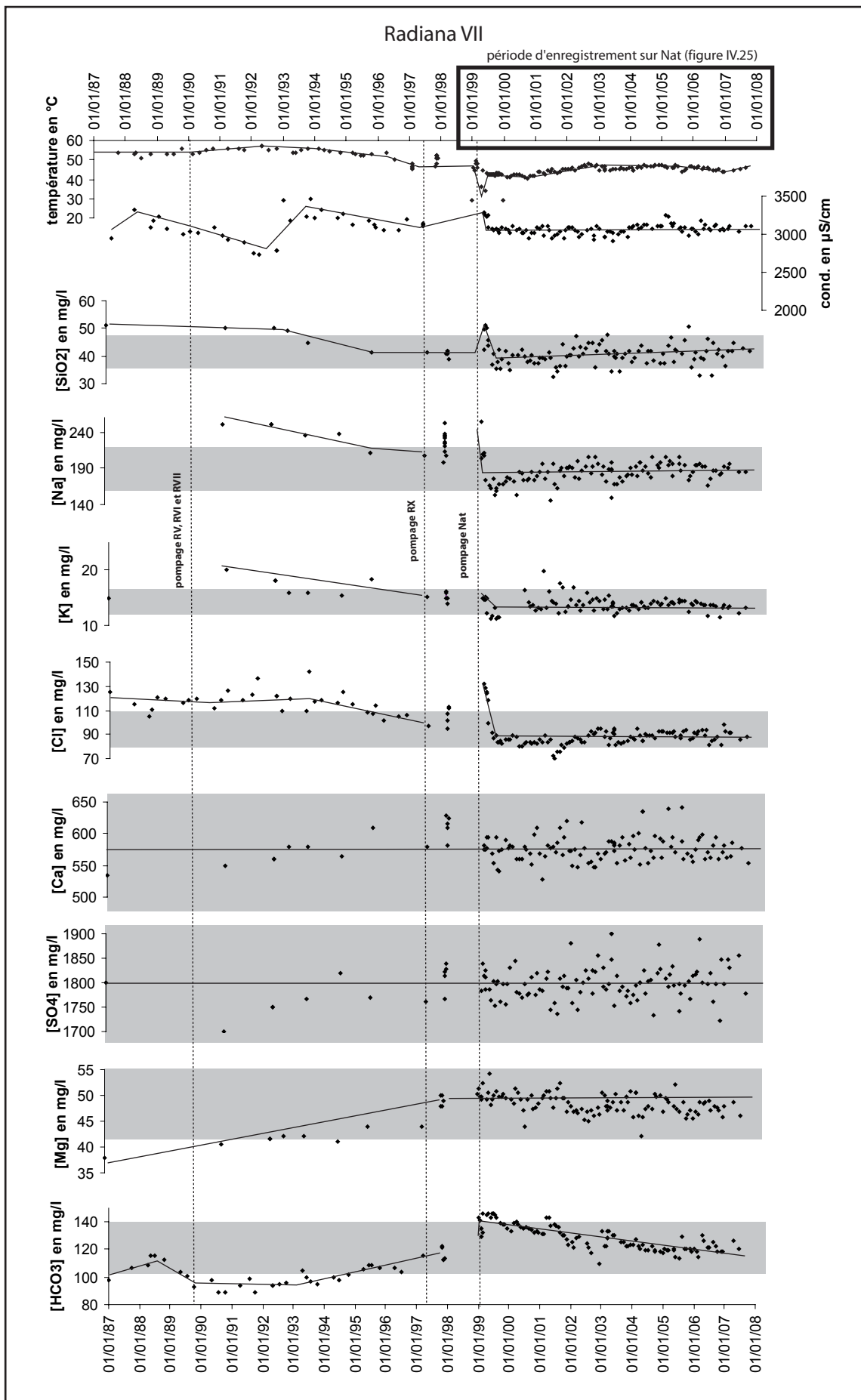


Figure IV.24 : Evolution des paramètres physico-chimiques du forage RVII de 1987 à 2004
cadre gris : +/- 15% de la moyenne, traits pleins et tiretés : tendance générale

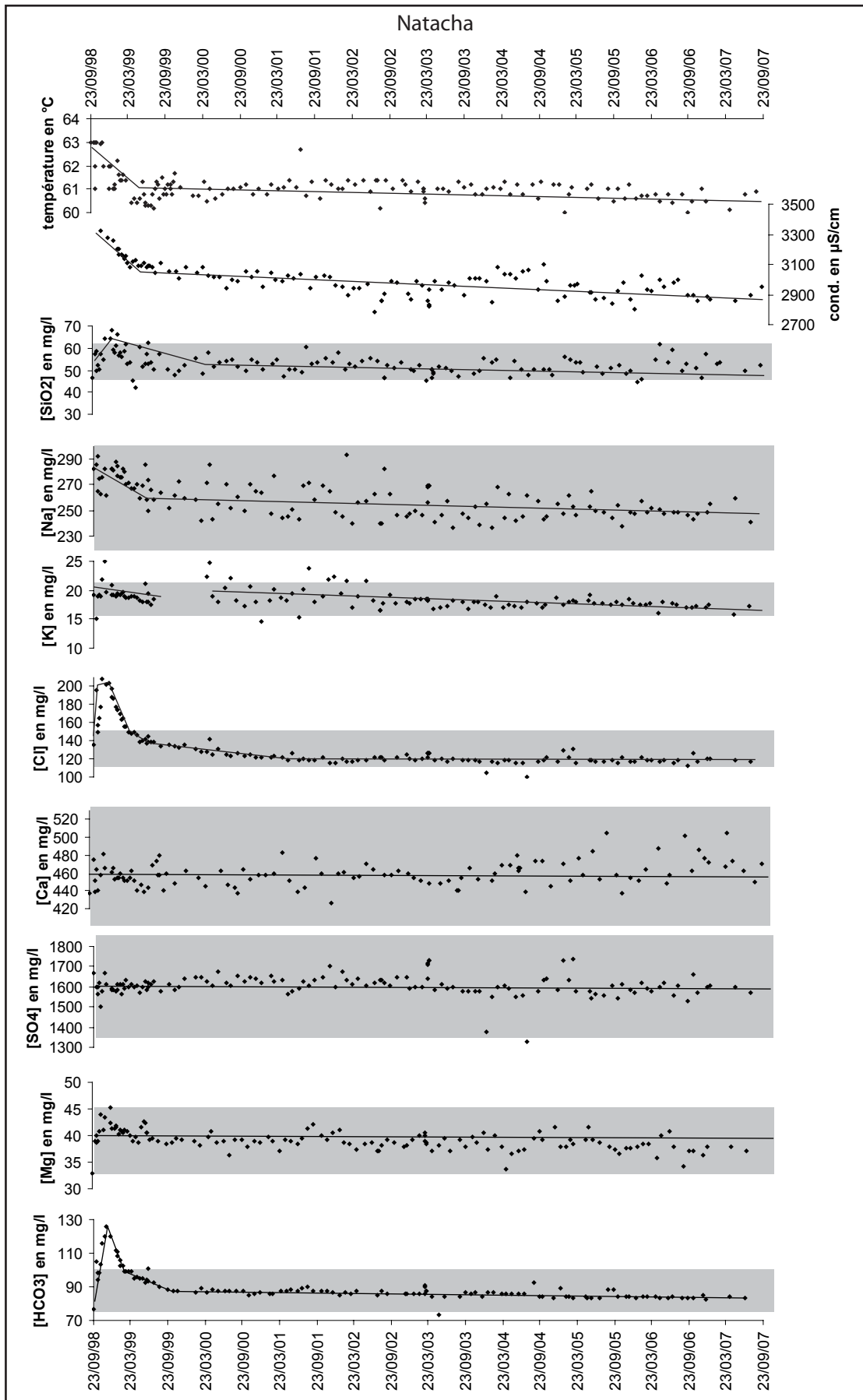


Figure IV.25 : Evolution des paramètres physico-chimiques du forage Natacha de 1998 à 2005
cadre gris : +/- 15% de la moyenne, traits pleins et tiretés : tendance générale

2. Acquisition d'une minéralisation spécifique au contact des roches

Les analyses des paramètres physico-chimiques et des éléments majeurs des eaux ont permis de mettre en évidence, de manière générale, les interactions fluide-roche. Les analyses des roches du secteur étudié (éléments majeurs et traces) vont permettre de confirmer et d'affiner ces premières conclusions.

2.1. Echantillonnage des roches

Afin de mieux évaluer l'origine de la minéralisation des eaux, les différents faciès des roches, potentiellement aquifères, ont été prélevés puis analysés (éléments majeurs et traces). Parmi les 29 prélèvements, localisés sur la figure II.11, on distingue :

- les roches cristallines (12 échantillons) : MFI, granite de ND de Briançon, granite de la Lauzière ;
- les roches permo-carbonifères (9 échantillons) : conglomérats, grès et schistes bitumineux ;
- les roches triasiques (5 échantillons) : quartzites, gypses, dolomies et cargneules ;
- les roches carbonatées du Jurassique (3 échantillons) : Hettangien-Carixien, Domérien-Toarcien et Aalénien.

Après broyage, les échantillons ont été analysés par ICP-AES (spectromètre d'émission Jobin-Yvon® JY 70) pour les éléments majeurs et par ICP-MS (spectromètre de masse Perkin-Elmer® 5000) pour les éléments traces, au Service d'Analyse des Roches et des Minéraux (SARM) du Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG) de Nancy. Les résultats complets des analyses sont présentés en annexe 9. Parmi les éléments traces analysés (tableau IV.4), les eaux thermales se sont révélées riches en B, Br et Li. De ce fait, les analyses des roches ont été complétées par la détermination de la concentration en ces trois éléments au service central d'analyse du CNRS de Lyon sur les évaporites (dolomies et gypse) et sur le socle (MFI et granite de la Lauzière) (annexe 9).

2.2. Echantillonnage des eaux

Les quelques analyses anciennes sur les forages thermaux sont disparates et incomplètes (annexe 10). Le tableau IV.5 synthétise les fourchettes des teneurs en éléments traces mesurées sur les eaux des différents forages ; une seule valeur est donnée lorsqu'une seule analyse est à disposition. Pour compléter ces données éparses, il a été choisi de réaliser des analyses complètes sur un échantillon des eaux de chaque aquifère du secteur (Glaizette, Bellecombe, V46, V8, F2, RF et Natacha) (tableau IV.6). Les échantillons ont été analysés par HR-ICP-MS au GEOLEP (Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) (Bensimon *et al.*, 1991 et Bensimon *et al.*, 1994 in Hesske, 1995).

Dans les conditions de cette étude, certains éléments traces ne constituent pas de bons marqueurs. Les anciens forages (RII, RIII, RIV, RV et RVI) ainsi que les points de la galerie EDF et les points Bellecombe et RF sont caractérisés par des teneurs relativement élevées et variables en Fe et Pb ; ces teneurs anormales provenant probablement des différents tuyaux de captage de ces points. De même, les concentrations en Al et Zn dépendent fortement des conditions d'analyse (filtration de l'échantillon, contact avec l'atmosphère,...). Ces éléments ne pourront donc pas être utilisés comme marqueurs. La présence de l'élément U dans les eaux dépend de leur potentiel redox : en milieu oxydant, l'U sera présent tandis qu'il précipitera en milieu réducteur. Les eaux thermales étant réductrices, l'U ne pourra pas non plus être utilisé comme marqueur. Cependant, tous les autres éléments, présentant un nombre suffisant d'analyses (As, B, Ba, Br, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mn, Mo, Ni, Rb, Sb, Sr, Th, V) pourront être utilisés comme marqueurs des différents aquifères, soit 17 marqueurs dont 13 en commun avec les analyses des roches.

Eléments	Al	As	Ba	Br	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Ga	Ge	Hf	Li	Mn	Mo	Nb	Ni	Pb	Rb	Sb	Sm	Sr	Ta	Th	U	V	W	Zn	Zr
Roches	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Eaux	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tableau IV.4 : Tableau synthétique des éléments traces analysés sur les roches et les eaux du secteur en grisé, éléments présentant une concentration importante dans les eaux thermales et analysés par la suite dans certains échantillons de roches (annexe 9)

	Eléments traces en µg/l																													
	Ag	Al	As	B	Ba	Br	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fa	Fe	I	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sn	Sr	Th	U	V	W	Zn		
RII	<LD	<LD - 30	<LD	660-1600	18	700	<LD	0	0	<LD	<LD - 4	150-3500	20-3100	500-1000	80-100	0	0	0	5-120	0	0	0	8500-12600			0	0	<LD - 72		
RIII	<LD	35-168	<LD - 288	910-1740	56	300	<LD	0	264	<LD - 160	<LD - 40	20-3100		600	100-116	0	5888	<LD - 168		176	664	9400-11900			0	0	720	8424		
RIV	0,9	<LD - 12	<LD	900-1800	28-32	200	<LD	0	0	<LD	<LD - 8	<LD - 2400	330	700-800	112-400	0	0-264	<LD - 2	111	0	0	9100-10800			0	0	0	72-432		
RV	<LD	<LD - 50	<LD	970-1740	36-40	300	<LD	0	0	<LD	<LD - 6	<LD - 200		650-800	50-300	0	0	<LD - 3		0	0	8600-10570			0	0	0	<LD - 168		
RVII	<LD	<LD									<LD	<LD - 100		50-100															<LD	
RVIII				54		0					<LD	<LD - 100		650-800	30-50								8930-13300						<LD - 650	
RIX				58								<LD - 80		60	50								13100							
RX														690-820	30-150								10600							
Nat		11-14	<LD	<LD - 1300	20-35	0-1100				<LD	<LD	7-62		650-1100	60-95		<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	7900-1100						<LD	

Tableau IV.5 : Intervalles de variation des analyses des éléments traces réalisées sur les forages thermaux de la Léchère LD : limite de détection ; en grisé les éléments traces analysés sur les roches (résultats complets en annexe 10)

	Eléments traces en µg/l																											
	Ag	Al	As	B	Ba	Br	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fa	Fe	I	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sn	Sr	Th	U	V	W	Zn
14/05/97 PB	5	115	1	6	0	0	0	0	0	1	0	5	0	0	1	0	1	0	0	1	1	152			3	1	0	1
23/01/07 GI	49,7	2,1	0,3	14,2	9	0,1			0	0,1	3,1	71,8		1,1	3,7	0,5	2,6	0,6	0,6	1	0,1	256,6			2,1	0	<0,2	10,2
23/01/07 Bell.	120,6	0,2	8,5	88,8	7,5	0,2	0	0	1,3	6,9	253,8			7,7	6,2	1,6	4	0,8	0,7	0,3	223,6			2,2	0	0	71,6	
23/01/07 V46	51,8	0,1	3	29,9	5,1	0,4	0	0	1,3	4,7	158,2			11,5	2	1,2	3	2,3	5,8	0,5	992,7			4,5	<0,2	0	15,5	
23/01/07 V8	20,3	<0,2	3,1	9,3	6,2	0,3	<0,2	0	<0,2	0,4	2,2	441,3		13,6	1	2	2,8	0,3	9,9	0,1	11040,6			4,8	<0,2	0	6,2	
23/01/07 F2	56,7	4,1	6,7	13	6,3	0,3	0	0	0,6	3,2	682,4			12,5	41,9	1,2	6,1	1,1	2,1	0,1	5605,6			3	<0,2	0	9	
31/03/06 RF	1,6	ND	6,2	10		ND				0,7				10,5	0,8	1	0,2	2,9	2,9	0,2	8000,4			3	<0,2	0	0,4	
23/01/07 RF	30,6	0	12,8	13,4	7,4	0,2	<0,2	0,9	1,1	190				12,6	9,5	1	1,6	0,1	2,6	0,2	6960			3,1	<0,2	0	2,7	
31/03/06 Nat	ND	ND	1568	35,5		ND			ND					1037	67,2	0	ND		157,1			11017			2,4	ND	0	ND
23/01/07 Nat	200,6	2,6	1513,2	34	863,7	0,1	<0,2	0,4	20,3	152,1	959,6	56,9	0,6	1,2	0,2	122,3	0,3	8664	0,2	<0,2	0,2	8664			0,2	<0,2	1,7	

Tableau IV.6 : Tableau des analyses des éléments traces réalisées sur les eaux des différents aquifères du secteur de la Léchère, en grisé, les éléments traces analysés sur les roches (résultats complets en annexe 10), pour la source Pont Botto (PB) : analyse inédite M. Dzirkowski

2.3. ACP des éléments traces

Une ACP a été réalisée sur les teneurs en éléments traces des eaux (figure IV.26a). Les axes F1 et F2 expriment 68,32% de la variance. Sur le diagramme des variables, l'axe F1 (48,39%) est défini par les éléments B, Br, Li, Mn et Rb. L'axe F2 (19,93%) est défini par l'élément As. Sur le diagramme des individus, les eaux thermales sont marquées par les éléments B, Br, Li, Mn et Rb. Les eaux du socle (Pont Botto et Glaizette) ont des teneurs en As importantes. Ce phénomène est bien connu dans le secteur où il pose d'ailleurs un problème pour l'alimentation en eau potable dans les zones où affleurent les gneiss de Pussy-Plan du Col (Garnier et Dumas, 2000). Les eaux de la source du Pont Botto (115 ppb d'As) sont issues de ces gneiss tandis que la source de Glaizette, issue des MFI, présente des teneurs beaucoup plus faibles (2,1 ppb d'As) mais tout de même plus élevées que les autres eaux du secteur. Les eaux superficielles circulant au niveau du contact tectonique de la Léchère comme les eaux thermales sont caractérisées par des teneurs élevées en Ba, Cu et Sr (figure IV.26a).

Une autre ACP a été réalisée sur les mêmes éléments traces (sauf B, Br et Li) pour les roches (figure IV.26b, analyses complètes en annexe 9). Les axes F1 et F2 expriment 58,12% de la variance. Sur le diagramme des variables, l'axe F1 (34,95%) est défini par les éléments Ni, Cu et Cr. L'axe F2 (23,17%) est défini par les éléments Cd et As. Sur le diagramme des individus, les cargneules (B76) se distinguent des autres points par ses fortes teneurs en As, Cd et Mn. Les micaschistes de la galerie EDF (B75) sont marqués par le Ba et le Rb. Ce sont les dolomies et le gypse qui contiennent le plus de Sr. Les éléments Cu, Ni et Cr semblent caractériser les gneiss de Pussy ainsi que certains faciès des conglomérats permo-carbonifères. La couverture carbonatée ne contient aucun élément trace en concentration remarquable.

Comme les eaux thermales présentent une teneur élevée en B, Br et Li, non analysés en routine par le CRPG, quelques échantillons de roches, représentatifs du contact évaporitique et du socle, ont été analysés pour ces éléments (annexe 9). Pour tous ces échantillons, le B comme le Br présentent une concentration inférieure à la limite de détection. En ce qui concerne le Li, il est peu présent dans les gypses, dolomies et granite mais en quantité relativement importante dans les calcaires de la couverture dauphinoise mais surtout dans les MFI.

La présence des éléments traces dans les eaux et les roches du secteur sont synthétisées dans le tableau IV.7a. D'après ces résultats, il apparaît que les eaux thermales de la Léchère sont marquées par les cargneules (Mn), les dolomies et gypses (Sr) et les MFI (Ba, Li et Rb). L'As observé dans les sources issues des gneiss provient vraisemblablement des minéralisations présentes dans les veines alpines (arsénopyrite par exemple). Bien qu'il soit présent dans les cargneules, on ne le retrouve ni dans les eaux thermales ni dans les ETS. Cependant, l'origine d'un élément trace ne peut pas être attribuée, de manière univoque, à la roche du secteur contenant la plus grande concentration en cet élément. En effet, celui-ci peut également provenir d'une roche légèrement moins riche, mais en contact avec l'eau dans des conditions physico-chimiques (température, pH, potentiel redox,...) favorables à la mise en solution de l'élément trace. De ce fait, ces premiers résultats nécessitent d'être confrontés à des données bibliographiques (cf. § suivant et tableau IV.7).

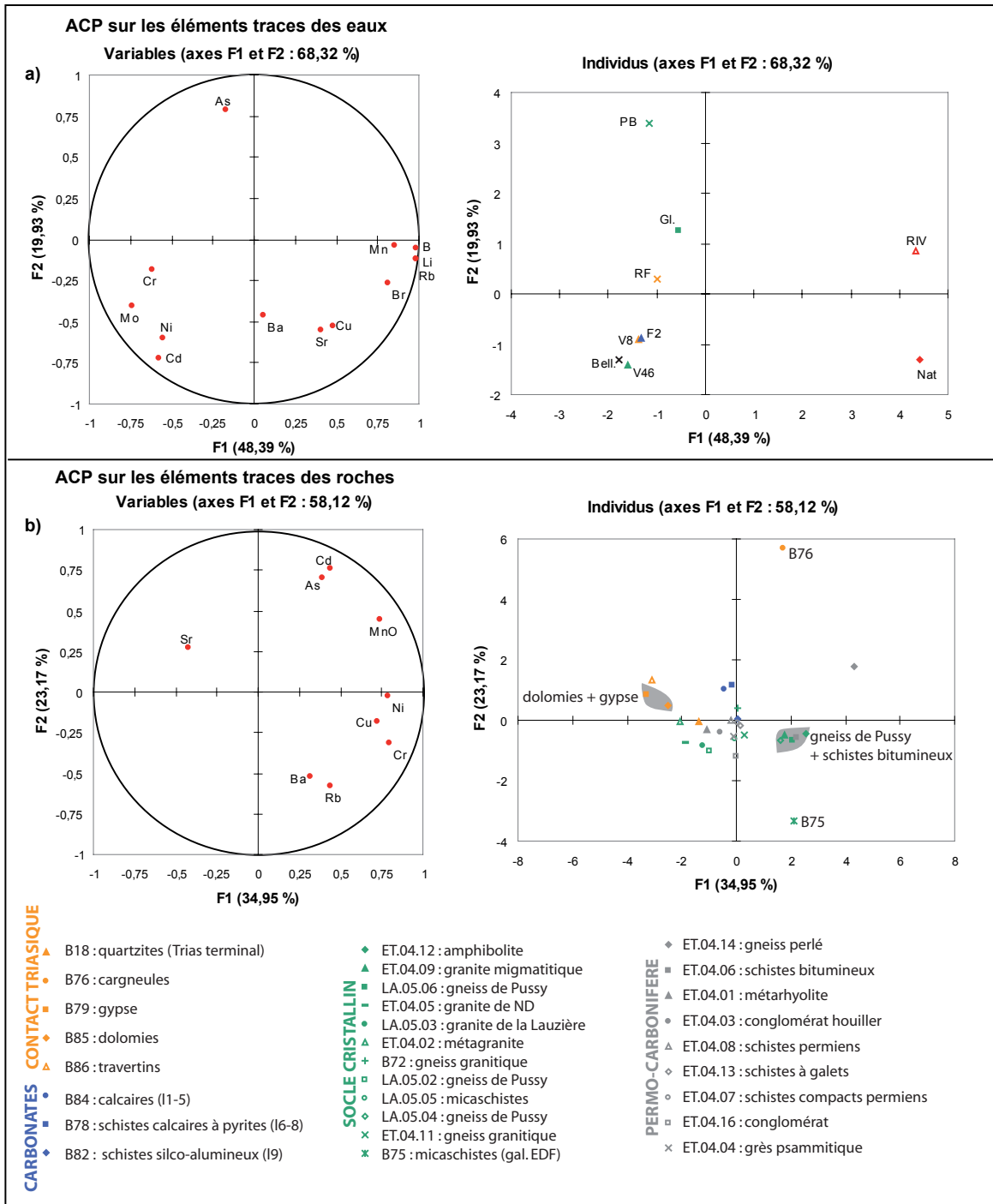


Figure IV.26 : ACP réalisées sur les teneurs en éléments traces des eaux (a) et des roches (b) du secteur étudié en grisé : échantillons cités dans le texte

a) Secteur de la Léchère		As	B	Ba	Br	Cd	Cr	Cu	Li	Mn	Ni	Rb	Sr
EAUX	eaux thermales		X	X	X			X	X	X		X	X
	ETS socle carbonates	X		X				X					X
ROCHES	cagneules	X				X				X			
	dolomies												X
	gypse												X
	micaschistes			X					X			X	
	gneiss						X	X			X		
permo-carbonifère						X	X			X			

b) Données bibliographiques		As	B	Ba	Br	Cd	Cr	Cu	Li	Mn	Ni	Rb	Sr
AQUIFERE (Kilchman et al., 2004)	évaporitique cristallin	X		X		X		X	X	X	X	X	X
	carbonaté molassique			X			X						
ROCHES (Muralt, 1999 et André, 2002)	évaporites		X		X								X
	roches magmatiques argiles		X	X					X			X	

Tableau IV.7 : Eléments traces présents dans les eaux et les roches

a) sur le secteur de la Léchère, b) d'après les données bibliographiques

2.4. Discussion et conclusion

A partir des travaux de Basabe (1993), Dubois, J.D. (1993), Mandia (1993), De Matteis (1995) et Hesske (1995), Kilchmann (2001) et Kilchmann *et al.* (2004) ont défini les faciès chimiques associés à la teneur en éléments traces d'eaux issues de cinq types d'aquifères : cristallin, carbonaté, évaporitique, molassique et sableux. De même, Muralt (1999) et André (2002) ont défini les roches constituant les "réservoirs" de ces éléments traces. Ces deux observations (tableau IV.7b) sont concordantes pour les éléments Ba et Sr attribués respectivement aux aquifères cristallins et évaporitiques, tandis qu'elles se contredisent entre origine cristalline et évaporitique pour les éléments Li et Rb. Bien que les eaux de la Léchère ne soient vraisemblablement pas issues d'un aquifère simple, ces observations peuvent servir de références que l'on peut comparer aux teneurs observées sur le site de la Léchère (tableau IV.8). Ainsi, la teneur en Ba et Sr du forage Natacha, du même ordre de grandeur que celles des eaux de faible profondeur analysées par Kilchman *et al.* (2004), indiquerait une circulation au sein des aquifères cristallin (Ba) et évaporitique (Sr). Quant aux éléments Cu, Li, Mn et Rb, ils dépassent les teneurs observées par Kilchman *et al.* (2004). La forte température ainsi que le long temps de séjour des eaux thermales (cf. chapitre IV, § IV.1.3.2) expliquent vraisemblablement cette plus forte minéralisation en ces éléments traces. Parmi ceux-ci, le Mn provient de manière sûre des évaporites mais, du fait d'observations non concordantes entre les roches et les eaux, le Rb et le Li ne peuvent pas être attribués aux roches cristallines ou aux évaporites. Enfin, les éléments As, Cd, Mn, Mo et Ni sont présents en trop faible quantité dans le forage Natacha pour être considérés comme des marqueurs fiables.

D'après la confrontation à ces données bibliographiques, les eaux de la Léchère seraient soumises à des interactions avec les évaporites (B, Br, Cu, Mn et Sr) et avec les roches cristallines (Ba).

	Ba	Cd	Cr	Cu	Li	Mn	Ni	Rb	Sr
aquifère évaporitique		0-0,9		0-14	5-114	0-31	0-36	1-50	1000-17000
aquifère cristallin	0-40		0,4						
Natacha	35	0,1	0,4	20	1000	60	1	150	10000
V8	9	0,3	0,4	2	14	1	3	10	10000
V46	30	0,4	1,3	5	11	2	3	6	10000
F2	13	0,3	0,6	3	12	42	6	2	5500

Tableau IV.8 : Comparaison des teneurs en éléments traces des eaux du forage Natacha et de la galerie EDF avec les teneurs observées par Kilchmann *et al.* (2004) dans les aquifères évaporitiques et cristallins en grisé : valeurs des eaux du site de la Léchère supérieures aux valeurs observées par Kilchmann

En confrontant les données acquises sur le secteur d'étude avec les données bibliographiques (tableau IV.9), les interactions des eaux thermales avec les évaporites (B, Br, Mn) et les roches du socle (Ba) sont clairement établies. A l'inverse, cette même confrontation ne permet pas d'attribuer de manière sûre les éléments Cu, Li et Rb aux évaporites ou au socle. Par contre, la contribution des roches permo-carbonifères

et des roches carbonatées à la minéralisation des eaux thermales n'est pas mise en évidence par les analyses des éléments traces.

Elément	Origine	Confirmé par :
B	évaporites	Muralt, 1999 et André, 2002 (roches)
Ba	micaschistes	Muralt, 1999 et André, 2002 (roches) / Kilchman et al., 2004 (eaux) / analyses des roches du secteur
Br	évaporites	Muralt, 1999 et André, 2002 (roches)
Cu	gneiss évaporites	analyses des roches du secteur Kilchman et al., 2004 (eaux) / analyses des eaux triasiques superficielles du secteur
Mn	cargneules	Kilchman et al., 2004 (eaux) / analyses des roches du secteur
Li	socle évaporites	Muralt, 1999 et André, 2002 (roches) / analyses des roches du secteur Kilchman et al., 2004 (eaux)
Rb	micaschistes évaporites	Muralt, 1999 et André, 2002 (roches) / analyses des roches du secteur Kilchman et al., 2004 (eaux)

Tableau IV.9 : Tableau synthétique définissant l'origine des éléments traces contenues dans les eaux du forage Natacha en grisé : éléments dont l'origine est confirmée par toutes les observations, en blanc : éléments dont l'origine reste incertaine

III. Analyse de la phase gazeuse des eaux thermales de la Léchère

L'analyse de la phase gazeuse des eaux thermales de la Léchère, et plus particulièrement des sulfures, des composés carbonés et du radon, est utilisée pour mettre en évidence l'importance des échanges avec la matière organique mais également avec les granites et gneiss.

1. Données disponibles et méthodologie

1.1. Données antérieures à cette étude

Parmi les données internes du site de la Léchère, les données sur la phase gazeuse des eaux thermales de la Léchère sont beaucoup moins nombreuses que les analyses physico-chimiques. Les qualités radioactives des eaux thermales étant recherchées dans les années 1950, quelques analyses de ^{222}Rn et de ^{226}Ra ont été réalisées sur les quatre premiers forages et une seule analyse sur Natacha en 1999 (tableau IV.10). Une analyse des gaz dissous du forage Natacha a également été effectuée en 1999, ne donnant qu'une indication sur les proportions de chaque espèce gazeuse (tableau IV.11). Pour toutes ces analyses, les précisions sur les méthodologies ne sont pas ou plus accessibles. Les teneurs en espèces soufrées (S^{2-} uniquement) n'ont été analysées que deux fois en 2004 et uniquement sur le forage Natacha (tableau IV.14).

1.2. Données acquises pour cette étude

Les données existantes sur la phase gazeuse ont été complétées, pour le forage Natacha uniquement, par un suivi de la teneur en espèces soufrées ainsi que par des nouvelles analyses du ^{222}Rn et du ^{226}Ra et des concentrations en gaz dissous du forage Natacha.

Le suivi des teneurs en espèces soufrées ont été réalisées par dosage iodométrique (Rodier, 1984) (tableau IV.12). Les espèces soufrées HS^- et S^{2-} ont également été analysées par le laboratoire Hydroisotop (Schweitenkirchen, Allemagne) par spectrométrie de masse (IRMS) (tableau IV.14).

Les analyses de ^{222}Rn et de ^{226}Ra (tableau IV.10) et de gaz (tableau IV.13) ont également été effectuées au laboratoire Hydroisotop respectivement par spectrométrie γ après extraction et chromatographie gazeuse (GC-WLD). Pour ces deux analyses, les échantillons ont été prélevés en respectant le protocole communiqué par le laboratoire d'analyse (cf. figure IV.27). Le radon a été analysé trois jours après le prélèvement.

		²²² Rn en mBq/l	²²⁶ Ra en mBq/l
RI	1925	63,2	
	1954	103,0	
RII	1954	64,1	64,1
	1964		116,2
RIII	1954	136,5	126,8
		126,8	
		115,7	
RIV	1954	111,9	111,9
	1964		27,0
Nat	1998	<29000	
	2007	9000	120

Tableau IV.10 : Tableau d'analyses du ²²²Rn et du ²²⁶Ra sur les eaux des forages thermaux de la Léchère (données internes CCVA)

HYDROCARBURES C1-C8 (ppm vol)		INCONDENSABLES (% v/v)	
Méthane (CH4)	5070	H2	<0,05
Ethane (C2H6)	12,3	O2+Ar	2,53
Ethylène (C2H4)	<0,5	N2	31,5
Propane (C3H8)	1	CH4	0,507
Propylène (C3H6)	<0,1	CO	<0,005
Acétylène (C2H2)	<0,1	titre CO2	67,2
Méthyl Propane (C4H10)	0,1		
Butane (C4H10)	0,2		
Cyclopentane (C3H6)	<0,1		
Méthylbutane (C5H12)	0,1		
Pentane (C5H12)	<0,1		
Cyclohexane (C6H12)	0,1		
Hexane (C6H14)	0,2		
Hexène 1 (C6H14)	<0,1		
Autres C8	0,2		
Diméthyl 2,4 Pentane (C7H16)	<0,1		
Heptane (C7H16)	<0,1		
Méthylhexane (C7H16)	<0,1		
Heptène 1	<0,1		
Autres C7	<0,1		
Isooctane (C8H18)	<0,1		
Octane (C8H18)	<0,1		
Autres C8	0,7		

Tableau IV.11 : Analyse des gaz dissous des eaux du forage Natacha (1999)

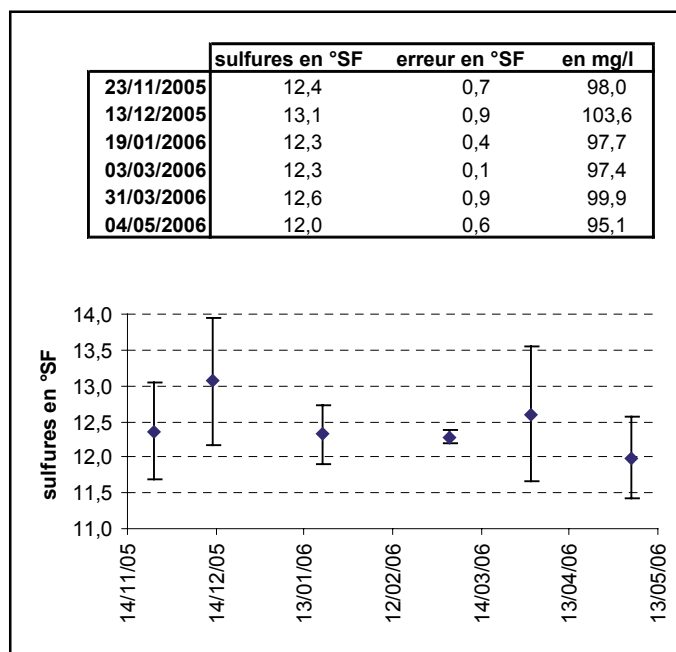


Tableau IV.12 : Suivi des teneurs en sulfures par dosage iodométrique, en degré sulfhydrométrique (°SF) des eaux du forage Natacha (du 23/11/05 au 04/05/06)

	Natacha (2007)		Allevard (1985)		Atmosphère
	en ml/kg	en %	en ml/kg	en %	en %
Hydrogène (H ₂)	<0,01	0,0	<0,01	0,0	
Nitrogène (N ₂)	15,3	73,2	35,8	92,2	78
Oxygène (O ₂)	<0,01	0,0	0,2	0,5	21
Carbon dioxide (CO ₂)	4,75	22,7	1,6	4,1	0,033
Méthane (CH ₄)	0,43	2,1	0,62	1,6	
Ethane (C ₂ H ₆)	0,001	0,0	0,008	0,0	
Propane (C ₃ H ₈)	0,001	0,0			
Butane (C ₄ H ₁₀)	<0,001	0,0			
Hélium (He)	0,1	0,5	0,1	0,3	
Argon (Ar)	0,32	1,5	0,49	1,3	0,93

Tableau IV.13 : Analyse des gaz dissous des eaux du forage Natacha (2007) comparée à celle des eaux thermales d'Allevard (1985) (Courtois et Vigouroux, 2005a) et à celle de l'atmosphère

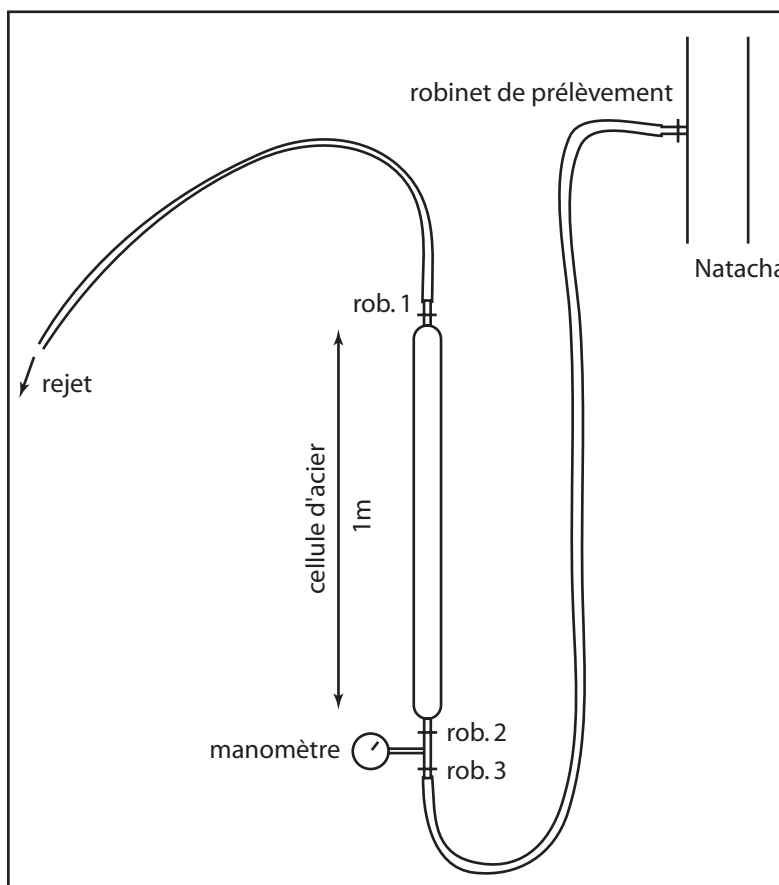


Figure IV.27 : Protocole de prélèvement de l'eau du forage Natacha pour les analyses de ²²²Rn et de gaz dissous

1) Laisser circuler l'eau dans l'ensemble du système de prélèvement pour rincer la cellule et chasser les bulles présentes sur les parois de la cellule. 2) Fermer le robinet 1 puis lorsque la pression augmente, fermer le robinet 2. 3) Récupérer la cellule remplie d'eau

date	analyse	espèces analysées	concentration en mg/l
2004	donnée interne CCVA	S ²⁻	0,5
2005	suiti iodométrique	H ₂ S, S ₂ O ₃ ⁻ , SO ₃ ⁻ , S _n ²⁻	97
2006	IRMS (Hydroisotop)	HS ⁻ , S ²⁻	0,97

Tableau IV.14 : Tableau synthétique des analyses des teneurs en espèces sulfurées

2. Résultats

2.1. Les espèces soufrées (sulfures s.l.)

Les espèces soufrées ou sulfures au sens large regroupent l'ion sulfure (S^{2-}), l'ion hydrosulfure (HS^-), le dihydrogène sulfuré (H_2S), l'ion sulfate (SO_4^{2-}), l'ion sulfite (SO_3^{2-}), l'ion thiosulfate ($S_2O_3^{2-}$), les ions polysulfures (S_n^{2-}) et le soufre élémentaire (S). Différents composés ont été analysés (tableau IV.14). L'analyse de 2004 dose uniquement le S^{2-} . Le suivi par la méthode iodométrique permet de doser la somme des espèces H_2S , $S_2O_3^{2-}$, SO_3^{2-} et S_n^{2-} tandis que l'analyse par IRMS du laboratoire Hydroisotop permet d'avoir la teneur totale en HS^- et S_2^{2-} .

Les teneurs en espèces soufrées du forage Natacha (12°SF) sont très proches de celles du forage Ariana des thermes de Marlioz (12,5°SF, Gallino, 2007). Bien qu'Ariana soit le forage le moins sulfuré du site thermal d'Aix-les-Bains, ses eaux sont exploitées pour leur caractère sulfuré dans le traitement des voies respiratoires. La teneur en espèces soufrées des eaux du forage Natacha n'est donc pas négligeable et pourrait présenter un intérêt thérapeutique. Le suivi réalisé du 23/11/05 au 04/05/06 montre que les teneurs du forage Natacha restent constantes (tableau IV.12). Le dosage iodométrique des espèces soufrées dans le forage RVII s'est révélé nul. En effet, sachant que les eaux du forage RVII circulent dans le remplissage quaternaire avant d'être captées, le H_2S contenu dans les eaux thermales a dégazé dans le remplissage.

Les espèces soufrées peuvent provenir soit (i) de la réduction des sulfates par les bactéries en présence de matière organique (MO) (figure IV.28) soit (ii) de l'altération de la pyrite (FeS_2). Les deux réservoirs de H_2S sont présents dans les roches encaissantes du secteur étudié. En effet, les conglomérats et schistes permo-carbonifères contiennent de la MO et, bien que non observée sur notre secteur, la MO peut être présente dans les évaporites (Blanc-Valleron *et al.*, 2001). Ces deux formations sont impliquées dans le parcours souterrain des eaux thermales. De plus, les pyrites sont présentes aussi bien dans les schistes carbonatés (Hettangien-Carixien 11-5 et Callovo-Oxfordien j3-6) que dans les fentes alpines du socle (tableau II.1). Les schistes carbonatés ne sont vraisemblablement pas le siège des circulations thermales mais les fentes alpines constituent l'une des discontinuités par lesquelles les eaux circulent avant de rejoindre le pôle profond. Comme le contexte géologique ne permet pas de rejeter l'une des hypothèses, seules les analyses isotopiques du S vont permettre de préciser l'origine de ces sulfures (cf. chapitre IV, § IV.2.1).

Réduction bactérienne des sulfates en présence de MO :

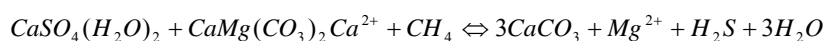
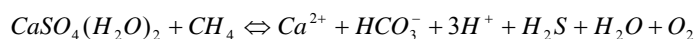


Figure IV.28 : Equations de la réduction bactérienne des sulfates (Clark *et al.*, 1995)

2.2. Le radon

Le ^{222}Rn (gaz rare) et le ^{226}Ra (métal alcalino-terreux) font partie de la chaîne de désintégration de ^{238}U (figure IV.29) qui est, avec le ^{234}Th , un élément constitutif des roches de la croûte terrestre. Sur le secteur étudié, ces éléments pères sont présents de façon relativement importante dans les granites de la Lauzière et les MFI (avec des valeurs de 5 à 8ppm d' ^{238}U et de 20 à 40ppm de ^{234}Th , annexe 9). Le ^{222}Rn , une fois libéré par les roches encaissantes, va migrer sous forme gazeuse ou sous forme dissoute par les pores, fissures et failles au même titre que les eaux (Bonijoli, 2006). Quant au ^{226}Ra , il ne pourra circuler

que sous forme dissoute. Les teneurs en ^{222}Rn mesurées dans le forage Natacha sont relativement faibles (9Bq/l) par rapport à d'autres eaux thermales internationales ou nationales (tableau IV.15). Seules les eaux de Chaudes Aigues présentent des teneurs comparables. Les eaux de Salins-les-Bains et Aix-les-Bains, dans un contexte géologique comparable, présentent des valeurs légèrement plus élevées. Les eaux du forage Natacha ont donc bien circulé à proximité des granites et micaschistes, constituant les "réservoirs" de ^{222}Rn , mais sans que cela ne les marque de façon très significative. Les teneurs mesurées dans les autres forages (tableau IV.10) sont beaucoup plus faibles (0,06 à 0,13 Bq/l) du fait de la probable diffusion du $\text{Rn}_{(g)}$ dans le remplissage quaternaire, avant le captage des eaux.

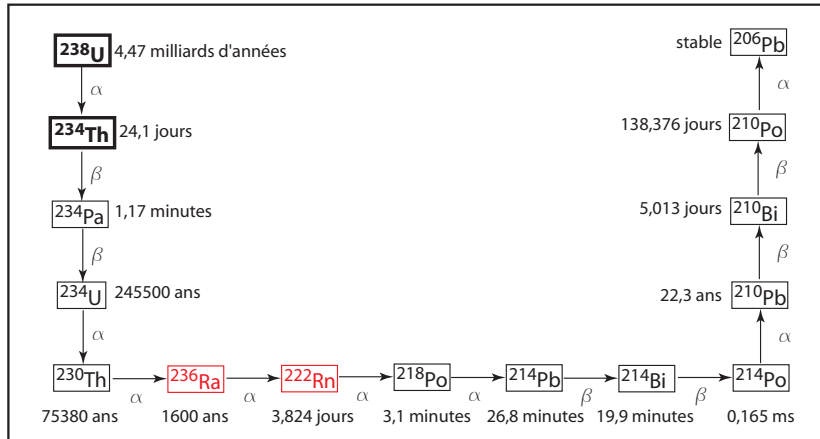


Figure IV.29 : Chaîne de désintégration radioactive de l' ^{238}U avec les temps de demi-vie de chaque élément en gras : éléments présents dans les roches, en rouge : éléments analysés dans les eaux thermales

référence	lieu	Rn en Bq/l
Voronov (2004)	Russie	>8000
Radolic et al. (2005)	Croatie	4500
Horvath et al. (2000)	Venezuela	560 +/- 16
Vogiannis (2004)	Grèce	10 à 304
Al Kazwini et Hasan (2004)	Jordanie	63 à 81
Curt et Lamotte (2005)	Aix-les-Bains, Raphy-St-Simon	37
Blaise et Vigouroux (2005)	Brides-les-Bains	19
Bérard et al.(2002)	Chaudes-Aigues	9
	La Léchère	9 +/- 0,7

Tableau IV.15 : Quelques exemples internationaux et français de teneurs en ^{222}Rn dans les eaux thermales

2.3. Les autres gaz

Les teneurs en gaz dissous du forage Natacha sont comparées à (i) la composition de l'atmosphère et (ii) à celles des eaux thermales d'Allevard, situé dans un contexte géologique comparable à celui de la Léchère et pour lequel nous disposons de données (tableau IV.13). Le nitrogène (N_2), majoritaire dans les deux eaux thermales, est d'origine atmosphérique. L'eau de la Léchère comme celle d'Allevard, contient du CH_4 et du CO_2 en quantité plus importante que dans l'atmosphère. Le CO_2 peut être soit d'origine profonde, soit, comme le CH_4 , provenir de la dégradation de la MO présente dans les roches encaissantes. L'analyse des signatures isotopiques du C va permettre d'amener des éléments de réponse (cf. chapitre IV, § IV.1.3.2). L'absence d' O_2 dans les eaux thermales est due à la circulation des eaux profondes dans un milieu isolé de l'atmosphère. L'hélium est formé par désintégration radioactive soit du Li pour former le ^3He , soit de l'U et du Th pour former le ^4He (Muralt, 1999). Etant donné que les gneiss et granites sont les roches, du secteur étudié, contenant la plus grande concentration en U et Th, la présence d'He dans les eaux thermales est vraisemblablement un marqueur des circulations à proximité de ces roches du socle.

IV. Analyses isotopiques des eaux et des roches du secteur étudié

Les analyses des compositions isotopiques des eaux et des roches du secteur vont permettre de définir les altitudes d'infiltration ($\delta^{18}\text{O}$ et δD), de préciser les interactions fluides-roches ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ et $\delta^{34}\text{S}$) et de proposer une évaluation des temps de séjour des eaux (^3H et ^{14}C).

1. Analyses isotopiques des eaux

1.1. Echantillonnage et méthodologie

Le Centre de Recherches Géodynamiques (CRG) de Thonon a suivi de façon mensuelle les $\delta^{18}\text{O}$ et δD de 1999 à 2002 sur les eaux des forages RII, RVII et Natacha ainsi que dans la galerie EDF durant l'année 2002. Afin de réaliser des gradients isotopiques altitudinaux, une campagne de prélèvement a été réalisée en 1999 et 2000 sur les deux versants encadrant l'Isère (Dray, 2003) (annexe 11). Le $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ de Natacha a été mesuré une fois en 1999 et une fois en 2002.

Durant la campagne de prélèvement 2005-2006, les $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ ont été mesurés 4 fois et le δD une seule fois sur les mêmes échantillons que ceux prélevés pour les éléments majeurs. Les analyses ont été faites au laboratoire Transferts lithosphériques de Saint Etienne (UMR-CNRS 6524) par Emilie Thiébaud et Stéphanie Gallino, sous la responsabilité de Christophe Renac et Viviane Berthon. La méthodologie employée et les résultats obtenus sont présentés en annexe 12. Les erreurs sur les mesures sont de 0,1‰ pour $\delta^{18}\text{O}$, 1‰ pour δD et 0,2‰ pour $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$.

Des problèmes analytiques sont apparus sur les analyses du $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ des eaux du forage Natacha. En effet, les valeurs obtenues (-14 à -21‰ vs PDB) ne correspondaient pas du tout à celles mesurées précédemment par le CRG de Thonon (Dray, 2003) (tableau IV.16). D'autres analyses de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ ont alors été effectuées au laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon ainsi qu'au laboratoire Hydroisotop et se sont révélées identiques aux données de Thonon (tableau IV.16). Ces écarts entre les résultats obtenus à St-Etienne et ceux des autres laboratoires proviennent de la présence massive de sulfates et/ou de la présence de méthane dans les eaux thermales (cf. explications en annexe 12).

Ainsi, les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ de Natacha et des eaux superficielles sulfatées obtenues au laboratoire de St-Etienne (annexe 12) ne seront pas prises en compte dans la suite de ce travail.

laboratoire	méthodologie	date	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ vs SMOW)	^{14}C (pcm)
CRG (Thonon)	précipité réactifs pour SO_4 et HCO_3	1999	-6,6	12,5
		2002	-6,3	12,4
St Etienne	précipité réactifs pour HCO_3	20.01.06	-18,1	
		02.03.06	-17,6	
		31.03.06	-14,3	
		31.05.06	-14	
		30.08.06	-20,9	
Avignon	attaque acide	2006	-7,4	
Hydroisotop	attaque acide	2006	-7,0	6,6

Tableau IV.16 : Analyses du $\delta^{13}\text{C}$ et du ^{14}C des eaux du forage Natacha par différents laboratoires détails des méthodologies en annexe 12

1.2. Aire d'alimentation

1.2.1) La relation à la droite météorique

Pour chaque secteur géographique, une relation existe entre les rapports $\delta^{18}\text{O}$ et δD des pluies : on parle de droite météorique. Cette droite a été déterminée à l'échelle mondiale (Craig, 1961) et à l'échelle de notre région d'étude par le CRG de Thonon (Dray, 2000) (figure IV.30). Si les signatures des eaux prélevées s'alignent sur cette droite, on considère qu'il s'agit d'eaux d'origine météorique dont la composition isotopique n'a pas été modifiée par évaporation, interaction eau-roche, exsolution de H_2S ou de CO_2 ou encore par hydratation de silicates (figure IV.30).

Dans le cadre de notre étude, deux points (RF et Pztaxi/prof) présentent vraisemblablement un problème analytique et/ou une évaporation due à un problème de conditionnement. A partir des autres points, une droite météorique locale, très proche de la droite régionale établie à Thonon, est définie. La signature isotopique de toutes les eaux prélevées, incluant les eaux thermales, n'a subi aucune modification par les processus détaillés dans le paragraphe précédent.

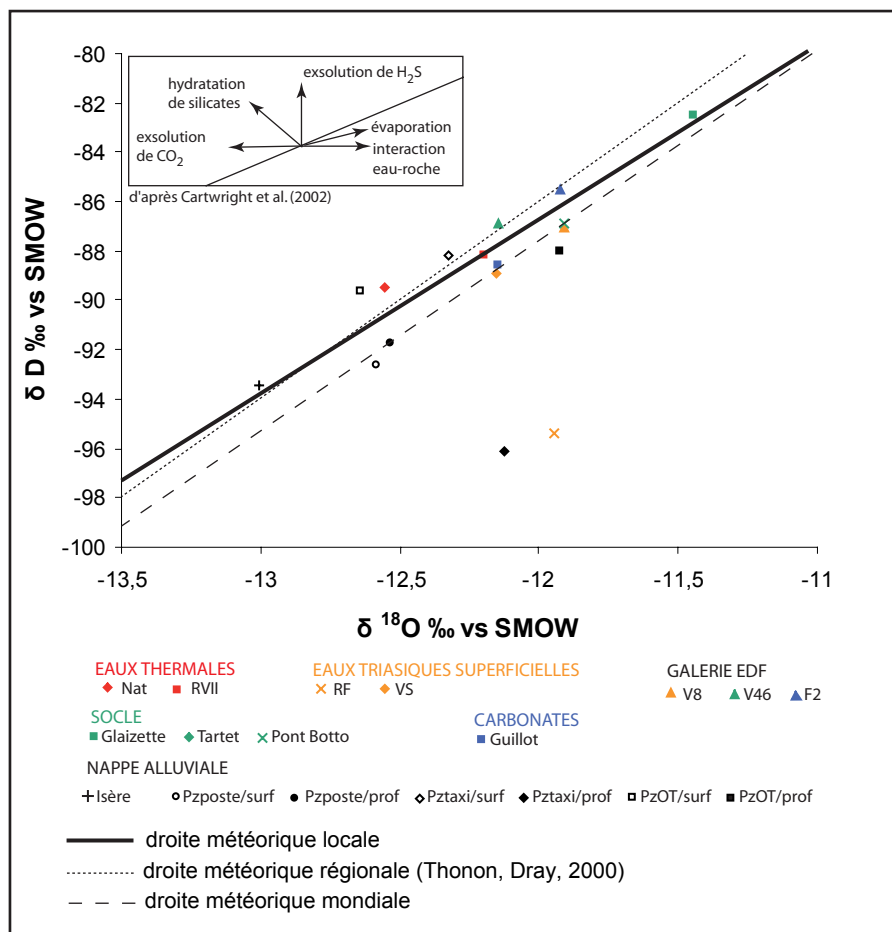


Figure IV.30 : Relation δD en fonction de $\delta^{18}\text{O}$, campagne 2005-2006

1.2.2) Les gradients altitudinaux

Des gradients isotopiques ont tenté d'être établis par Dray (2003) sur les deux rives de l'Isère (figure IV.31). Les barres d'erreur sont fixées en prenant comme altitude minimale celle du prélèvement et comme altitude maximale celle du sommet le plus proche. En rive droite, le gradient a pu être correctement établi contrairement à la rive gauche. Sur cette dernière rive, le glacier de Celliers est présent à une altitude de 2700 m. Sachant que les eaux de la rive gauche ont été prélevées en août 2000, les eaux provenant de la fonte de ce glacier pouvaient alors être présentes dans les sources prélevées. D'après Clark et Fritz (1997), la fonte des glaces crée une signature en $\delta^{18}\text{O}$ moins négative. La réalisation d'un gradient isotopique sur cette rive ne serait donc possible qu'en période hivernale.

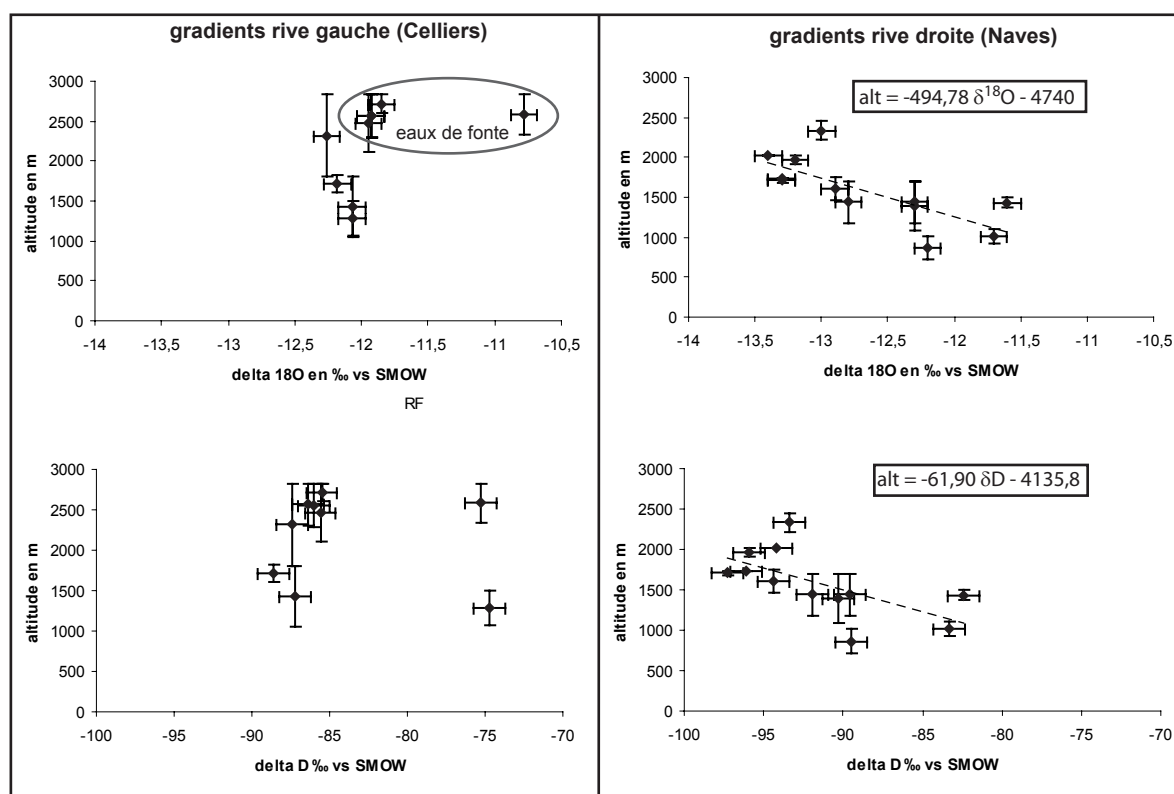


Figure IV.31 : Gradients isotopiques en rive droite et rive gauche de l'Isère

données : Dray 2003. Les barres d'erreur sont fixées en prenant comme altitude minimale celle du prélèvement et comme altitude maximale celle du sommet le plus proche

1.2.3) Détermination des altitudes moyennes des aires d'infiltration

En faisant l'approximation que le gradient est le même en rive gauche qu'en rive droite, les altitudes moyennes des aires d'infiltration de chaque point prélevé peuvent être calculées à partir des gradients définis précédemment (tableau IV.17). Cependant, comme il s'agit d'une altitude moyenne de l'aire d'infiltration, il n'est pas exclu que les eaux prélevées puissent également s'infiltrer à une altitude supérieure et inférieure à l'altitude calculée.

Pour les eaux thermales (Natacha et RVII), l'altitude moyenne d'infiltration est de 1400 à 1600m. Cependant, sachant que les temps de séjour des eaux thermales sont de l'ordre de plusieurs milliers d'années, les conditions climatiques, au moment de leur infiltration, n'étaient probablement pas les mêmes que les conditions actuelles. Dans ce cas, le $\delta^{18}\text{O}$ des eaux thermales, plus négatif que celui des ETS (tableau IV.17), pourrait s'expliquer uniquement par des conditions climatiques plus froides, comme il a pu en régner durant la dernière glaciation du Würm (de -70000 à -10000 ans).

Parmi les eaux superficielles, les points VS, Glazette, Pont Botto et les Avignons ont une aire d'alimentation proche de leur point de prélèvement. A l'inverse, l'aire d'alimentation de la source RF et des eaux de la galerie EDF, prélevées à environ 450m d'altitude, se situe à une altitude moyenne comprise entre 1100 et 1500m. Parmi les points de la galerie EDF, le point V46 semble être alimenté par une aire d'infiltration plus élevée que les points V8 et F2. En effet, sur le versant de Celliers, le contact tectonique se situe au niveau de la vallée de l'Eau Rousse tandis que les MFI affleurent dans les zones hautes. Ceci plaide encore une fois pour l'hypothèse du drainage des eaux des MFI vers l'accident tectonique de la Léchère.

Les eaux de la nappe alluviale (Isère et Bellecombe) présentent une signature isotopique correspondant à une valeur moyenne de l'ensemble du bassin versant de l'Isère. Les signatures isotopiques des piézomètres sont très dispersées car ces eaux résultent d'un mélange, en proportion variable, entre les eaux thermales (quelques pourcentages) et les eaux superficielles triasiques et alluviales.

Echantillon	altitude de prélèvement	date	$\delta^{18}\text{O} \text{‰ vs SMOW}$	altitude calculée à partir du gradient $\delta^{18}\text{O} \text{‰}$	$\delta\text{D} \text{‰ vs SMOW}$	altitude calculée à partir du gradient $\delta\text{D} \text{‰}$	altitude moyenne d'infiltration en m
Natacha	437m	13/09/2005	-12,8	1585	-90	1405	1400-1600
		02/03/2006	-12,6	1471			
		31/05/2006	-12,5	1454			
		moyenne	-12,6	1503			
RVII	437m	13/09/2005	-12,6	1489	-88	1322	1300-1600
		02/03/2006	-12,2	1295			
		31/05/2006	-12,8	1604			
		moyenne	-12,5	1463			
RF	680m	13/09/2005	-12,4	1378			1150-1400
		02/03/2006	-11,9	1169			
		31/05/2006	-12,0	1207			
		moyenne	-12,1	1252			
V8	450m	13/09/2005	-12,2	1288	-87	1253	1120-1300
		02/03/2006	-11,9	1151			
		31/05/2006	-11,8	1120			
		moyenne	-12,0	1187			
V46	450m	13/09/2005	-12,5	1435	-87	1243	1250-1480
		02/03/2006	-12,1	1271			
		31/05/2006	-12,6	1483			
		moyenne	-12,4	1396			
F2	450m	13/09/2005	-12,3	1365	-85	1155	1150-1350
		02/03/2006	-11,9	1160			
		31/05/2006	-12,3	1337			
		moyenne	-12,2	1287			
VS	1400m	13/09/2005	-12,7	1520	-89	1366	1270-1520
		02/03/2006	-12,2	1274			
		31/05/2006	-12,3	1328			
		moyenne	-12,4	1374			
Scé des îles	700m	31/05/2006	-12,0	1190			1200
Glaizette	830m	13/09/2005	-11,0	684	-82	970	700-950
		02/03/2006	-11,4	922			
		31/05/2006	-11,3	868			
		moyenne	-11,2	825			
Pont Botto	1500m	13/09/2005	-12,3	1366	-87	1241	1150-1450
		02/03/2006	-11,9	1152			
		31/05/2006	-12,5	1453			
		moyenne	-12,3	1324			
Avignons	1600m	13/09/2005	-12,8	1596			1450-1600
		31/05/2006	-12,5	1461			
		moyenne	-12,7	1529			
Isère	437m	02/03/2006	-13,0	1695	-93	1647	1600-1700
		31/05/2006	-12,8	1605			
Bellecombe	445m	31/05/2006	-13,0	1691			1700
Pz poste/surf	437m	02/03/2006	-12,6	1487	-93	1597	1500-1600
		31/05/2006	-12,8	1615			
Pz poste/pof	437m	02/03/2006	-12,5	1460	-92	1542	1450-1800
		31/05/2006	-13,2	1812			
Pz taxi/surf	437m	02/03/2006	-12,3	1359	-88	1325	1300-1350
		31/05/2006	-12,3	1343			
Pz Taxi/prof	437m	31/05/2006	-12,2	1290			1300
Pz OT/prof	437m	02/03/2006	-11,9	1161	-88	1312	1150-1300
		31/05/2006	-12,1	1253			

Tableau IV.17 : Calcul des altitudes moyennes des aires d'infiltration des points prélevés lors de la campagne 2005-2006 (voir texte pour la méthode de calcul)

1.3. Temps de séjour des eaux

Les teneurs en ^3H et CFC permettent d'identifier les eaux à court temps de séjour tandis que le ^{14}C va permettre de préciser les âges des eaux à long temps de séjour, après corrections des échanges avec le C "mort" de différentes origines.

1.3.1) Tritium et CFC

Le tritium (^3H) a été rejeté dans l'atmosphère pendant les essais thermonucléaires aériens qui ont eu lieu de 1952 à 1980. Les teneurs en ^3H des précipitations de Thonon ont atteint 3000 UT en 1963 (figure IV.32). Les teneurs en ^3H ont été mesurées sur les forages thermaux à trois périodes : 1978 (Siméon, 1980), 1985 (Poul et Iundt, 1985) et les années 2000 (Dray, 2003) (tableau IV.18).

En 1978, les teneurs en ^3H des eaux de pluie est de 100 UT. Seules les eaux des forages RI et RIV ont été prélevées à la même période. On peut conclure uniquement que le forage RIV (21 UT) contient vraisemblablement plus d'eau superficielle que le forage RI (17 UT).

En 1985, la signature des eaux de pluie est de 25 UT. Les eaux de la galerie EDF ont une teneur en ^3H de 47 UT et se seraient donc infiltrées en 1979 si l'on tient compte de la désintégration radioactive, soit un temps de séjour de 6 ans. Olod, avec une teneur en tritium plus faible que les précipitations (17UT), résulte

d'un mélange entre des eaux superficielles majoritaires et des eaux profondes (<3UT). Les forages RII et RV présentent des teneurs en ^3H proches du seuil de détection (<3 UT). Ceci semble indiquer que ces eaux ne sont pas ou très peu mélangées avec des eaux superficielles.

Dans les années 2000, la signature des eaux de pluie n'est plus que de 9 UT. L'utilisation de la teneur en ^3H pour mettre en évidence les phénomènes de mélange avec des eaux superficielles est maintenant délicate. En effet, une faible proportion d'eau superficielle ne changera que très peu la teneur en ^3H de l'échantillon. On constate tout de même que le forage RII contient plus d'eau superficielle que le forage RVII (respectivement environ 75 et 50%). Natacha présente une teneur proche du seuil de détection ; les eaux se sont donc infiltrées avant les années 1950 (Ravailleau, 2001). Si une contribution d'eau superficielle est présente, elle est trop faible pour être détectée par cette méthode. En tenant compte de la désintégration radioactive, les eaux de la galerie EDF semblent s'être infiltrées en 1993, soit un temps de séjour de 9 ans.

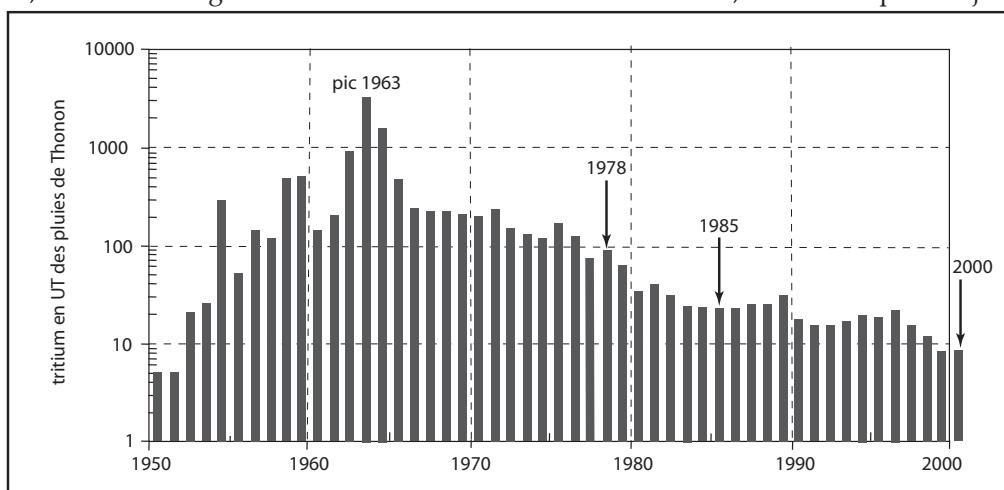


Figure IV.32 : Teneurs moyennes annuelles en ^3H à la station de Thonon à partir des concentrations mensuelles pondérées par la hauteur des précipitations, Ravailleau (2001), modifié

point prélevé	période de prélèvement	nombre d'analyses	3H en UT	moyenne 3H en UT
RI	mai-78	1	17	
RI	octobre-78	1	9	
RIII	février-79	1	15	
RIV	mai-78	1	21	
galerie EDF	juin-85	1	47	
Olod	décembre-85	1	17	
RII	décembre-85	1	<3	
RV	décembre-85	1	<3	
pluies	mars 1999 à novembre 2000	20		9
Isère	juin 2000 à juin 2002	25		8,5
galerie EDF	août-02 (6 échantillons)	1		9
RII	avril 1999 à avril 2004	33		7
RVII	avril 1999 à octobre 2002	37		5
Natacha	février 1999 à novembre 2002	39		2,5

Tableau IV.18 : Tableau des analyses de ^3H réalisées sur les eaux du site de la Léchère (Siméon, 1980, Poul et Iundt, 1985 et Dray, 2003)

En ce qui concerne les chlorofluorocarbones (CFC), ils ont été rejetés vers l'atmosphère dans les années 1980-1990, essentiellement par l'intermédiaire des réfrigérateurs usagés. Ce polluant peut être utilisé comme marqueur au même titre que le tritium. Les eaux du forage Natacha présente des teneurs en CFC nulles (Dray communication personnelle), confirmant que le forage Natacha ne contient pas d'eaux récentes d'un âge inférieur à 20 ans.

Pour conclure, les analyses de ^3H et CFC ont permis de confirmer que le forage RII a évolué d'une eau profonde peu mélangée en 1985 vers une eau composée essentiellement d'eau superficielle en 2000. De plus, le temps de séjour des eaux de la galerie EDF est vraisemblablement de quelques années (entre 5 et 10 ans). Pour finir, les eaux du forage Natacha ne sont pas mélangées avec de l'eau superficielle récente et l'eau profonde qui le compose s'est infiltrée il y a plus de 50 ans (Ravailleau, 2001).

1.3.2) Carbone

La détermination des temps de séjour des eaux grâce au ^{14}C nécessite de comprendre les échanges calco-carboniques qui ont eu lieu pendant le parcours souterrain. Les signatures du $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ permettent d'évaluer la nature de ces échanges.

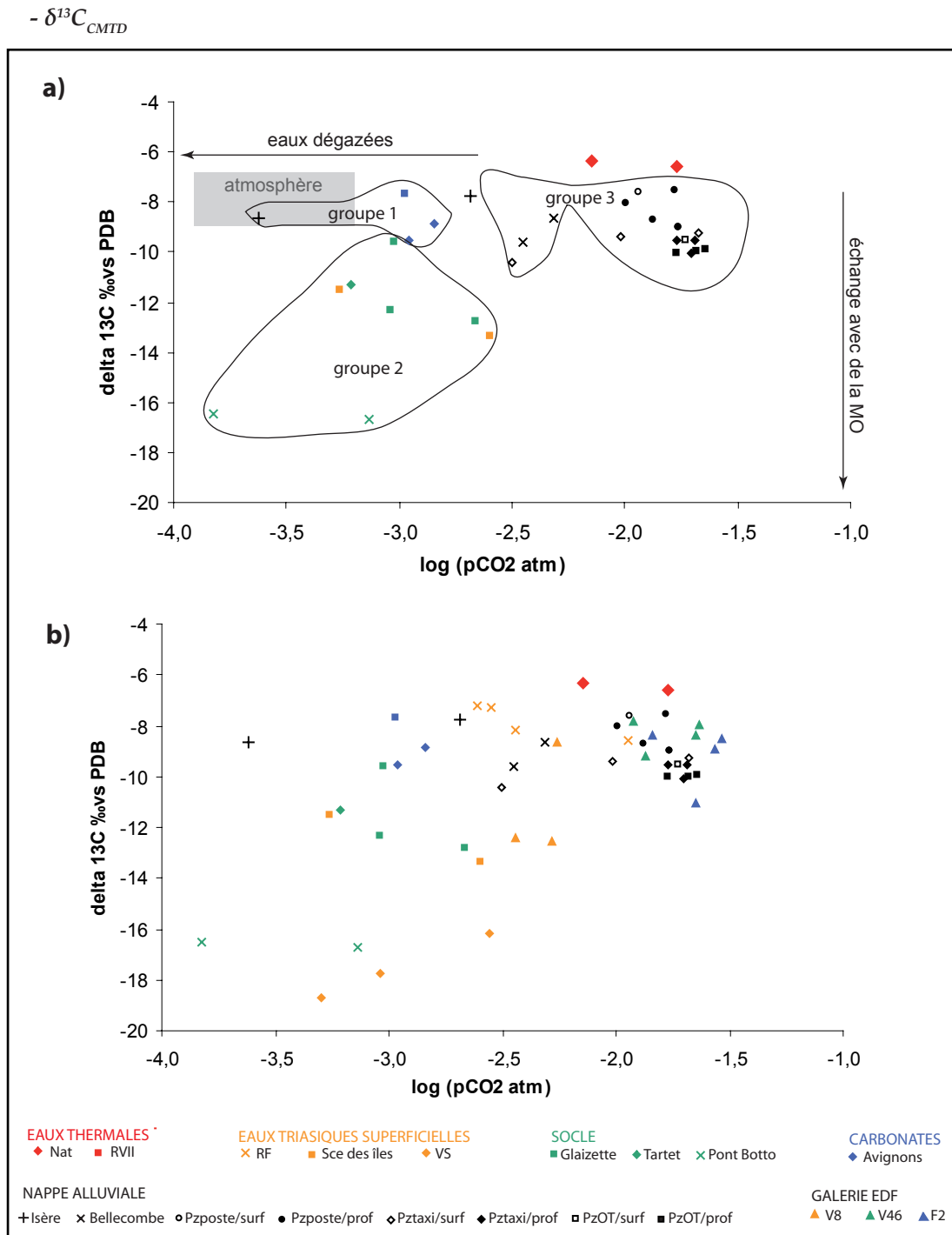


Figure IV.33 : Relation $\delta^{13}\text{C}$ en fonction de $\log(p\text{CO}_2)$ pour les eaux du secteur étudié
a) Sans les valeurs des eaux sulfatées et b) Avec les valeurs des eaux sulfatées

Parmi les eaux superficielles analysées, on peut distinguer trois groupes grâce à leur signature isotopique du carbone et leur $p\text{CO}_2$ (figure IV.33a). Le premier groupe intègre les eaux de surface qui ont dégazé avant leur prélèvement (Isère, Avignons et Guillot). Le deuxième groupe (Tartet, Glaizette, Source des îles et Pont Botto) se distingue du premier par, en plus du dégazage, des échanges importants avec de la MO et plus particulièrement pour la source Pont Botto. Ce point de prélèvement est vraisemblablement marqué par la circulation des eaux à proximité des conglomérats et schistes permo-carbonifères, riches

en matière organique. Le dernier ensemble regroupe les piézomètres résultant d'un mélange entre eaux superficielles et eaux profondes.

Bien que potentiellement erronées par la présence de sulfates (annexe 12), les analyses de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ des eaux sulfatées superficielles restent dans des ordres de grandeur cohérents avec leur contexte géologique (figure IV.33b). En effet, le prélèvement VS, situé à proximité des roches permo-carbonifères, présente un $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ appauvri et les autres points présentent un $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ du même ordre de grandeur que les autres eaux superficielles.

Les eaux du forage Natacha présentent une valeur de $p\text{CO}_2$ plus importante que les eaux superficielles. L'interprétation de leur signature isotopique ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ de -6,5 à -7,5 ‰) nécessite une analyse plus approfondie.

En effet, la composition isotopique du C ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ et ^{14}C) d'une eau résulte d'une succession de réactions chimiques ayant lieu tout au long de son parcours. Dans un premier temps, les eaux infiltrées ont la même signature que le C du sol (figure IV.34). Celle-ci est ensuite modifiée par la dissolution des carbonates. L'eau souterraine acquiert alors une signature intermédiaire entre celle des sols et celle des carbonates fossiles, compte tenu des coefficients de fractionnement liés à la dissolution. Cependant, la composition isotopique du C d'une eau souterraine peut s'écarter de ce modèle simple si elle est soumise, en plus, à des échanges plus complexes avec de la matière organique fossile, du CO_2 d'origine profonde ou encore avec l'atmosphère.

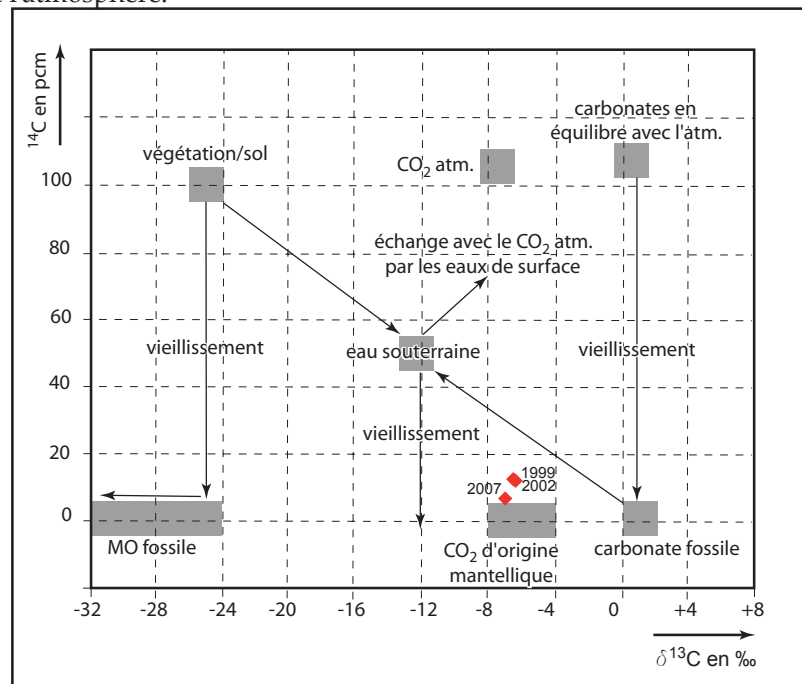


Figure IV.34 : Comparaison des signatures en ^{14}C et en $\delta^{13}\text{C}$ des eaux du forage Natacha par rapport à celles des différents réservoirs de C

en rouge : eaux du forage Natacha et en grisé : réservoirs de C d'après Mook, 1976 et Blavoux, 1982

Les eaux thermales de la Léchère sont réductrices et ne sont donc pas soumises à des échanges avec l'atmosphère. En revanche, la présence d'une quantité non négligeable de CH_4 dans les gaz dissous (0,43ml/kg) indique qu'un échange avec de la matière organique a eu lieu au contact probable avec les roches permo-carbonifères. Bien que la $p\text{CO}_2$ des eaux thermales soit faible (0,01atm), l'hypothèse d'un échange avec du CO_2 profond ne peut pas être écartée.

Les compositions isotopiques de trois pôles sont calculées à partir des équations d'équilibration et des coefficients de fractionnement thermodépendants (figure IV.35) (Simler, 2007). Chacun de ces pôles représente l'équilibration complète des eaux, à une température de 90°C , avec le C ayant pour origine : (i) sol et matrice carbonatée, (ii) CO_2 profond et (iii) matière organique fossile (figure IV.36a). Le rapport $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ des eaux du forage Natacha semble bien résulter d'échanges avec le C des trois origines possibles (figure IV.36b). La signature des eaux thermales est influencée en majorité par le CO_2 profond (75%) et très peu par la matière organique fossile (5%).

$[CMTD] = [H_2CO_3] + [HCO_3^-] + [CO_2^-] \quad (7)$

à pH < 8,3 :

$[CMTD] = [H_2CO_3] + [HCO_3^-] \quad (8)$

$\delta^{13}C_{CMTD} [CMTD] = \delta^{13}C_{H_2CO_3} [H_2CO_3] + \delta^{13}C_{HCO_3} [HCO_3^-] \quad (9)$

En système ouvert sur le CO₂ :

$\delta^{13}C_{CMTD} [CMTD] = \delta^{13}C_{CO_2-\varepsilon(CO_{2g}/H_2CO_3)} [H_2CO_3] + \delta^{13}C_{CO_2-\varepsilon(CO_{2g}/HCO_3^-)} [HCO_3^-] \quad (10)$

En système fermé sur le CO₂ :

$\delta^{13}C_{CMTD} [CMTD] = \delta^{13}C_{CO_2-\varepsilon(CO_{2g}/H_2CO_3)} [H_2CO_3] + \delta^{13}C_{CO_2-\varepsilon(CO_{2g}/HCO_3^-)} \times \frac{1}{2} [HCO_3^-] + \delta^{13}C_{mat-\varepsilon(mat/HCO_3^-)} \times \frac{1}{2} [HCO_3^-] \quad (11)$

Figure IV.35 : Formules d'équilibration du $\delta^{13}C_{CMTD}$ en systèmes ouvert et fermé sur le CO₂

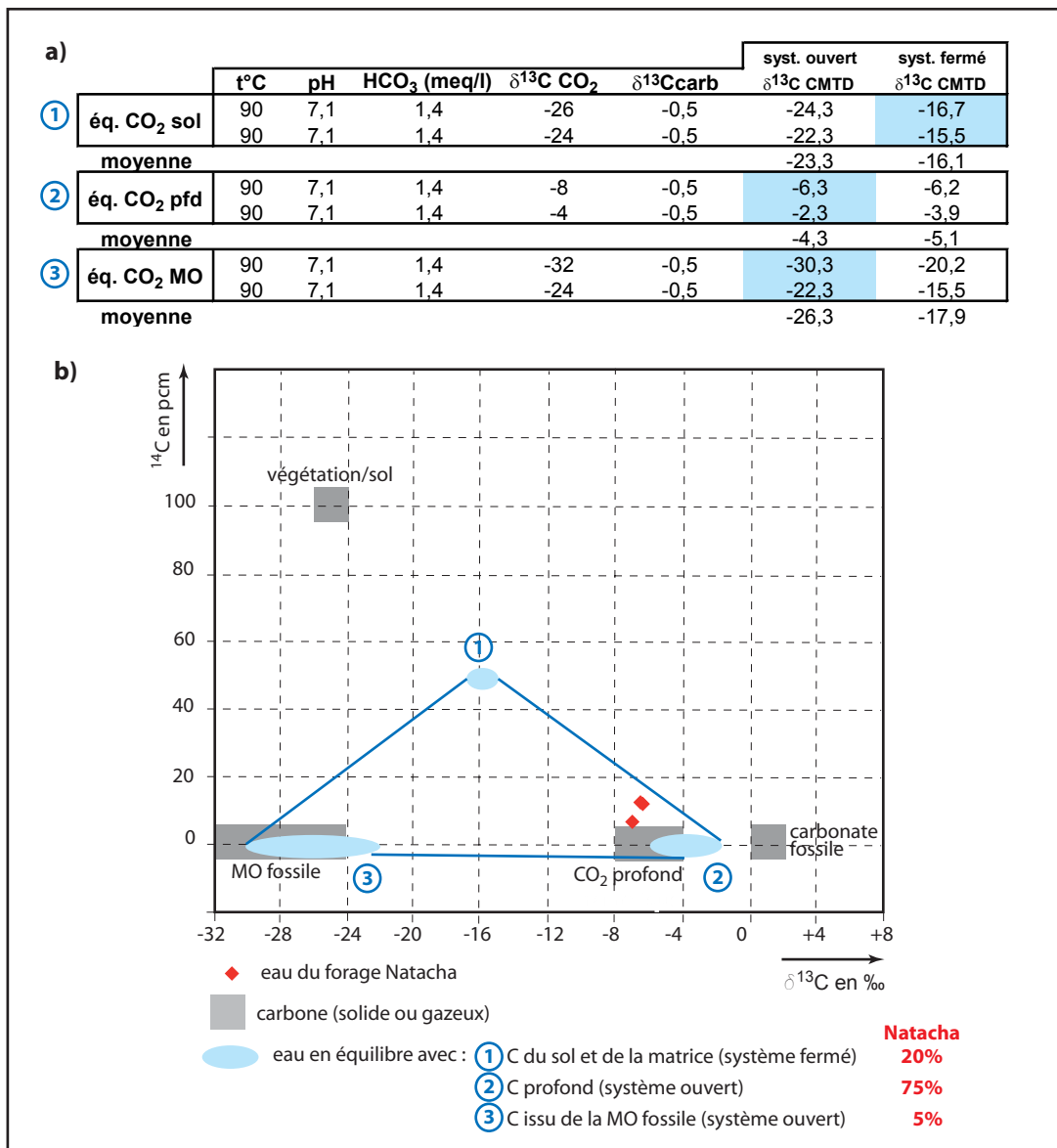


Figure IV.36 : Contributions des trois origines de C dans les eaux du forage Natacha
 a) Calcul de la composition isotopique des eaux en équilibre complet avec le C de chaque origine (logiciel Diagrammes, Simler, 2007)
 b) Evaluation de l'influence de chaque pôle

- ¹⁴C

Deux analyses du ¹⁴C ont été réalisées sur les eaux du forage Natacha par le CRG de Thonon en 1999 et 2002, donnant toutes deux une valeur de 12,5 pcm. Dans le cadre de cette étude, une troisième analyse a été réalisée en 2006 au laboratoire Hydroisotop (Schweitenkirchen, Allemagne) et a donné une valeur de 6,6 pcm.

Les modèles d'âge classiques ne prennent en compte que la dissolution des carbonates (Tamers, 1960, Pearson et Hanshaw, 1970, Mook, 1976, Fontes et Garnier, 1979, Salem *et al.* 1980, Eichinger, 1983, Olive, 1999 in Simler, 2007) (figure IV.37). L'application directe de ces modèles donne des âges compris entre 4700 et 12400 ans pour le prélèvement de 1999 et entre 10800 et 18100 ans pour celui de 2006.

Paramètres utilisés											
	Natacha						CO ₂		carbonates		
	t°C	pH	TAC	¹⁴ C	erreur	δ ¹³ C	δ ¹³ C	¹⁴ C	δ ¹³ C	¹⁴ C	
06/07/1999	60,3	7,4	1,51	12,5	1,5	-6,50	-25	100	0	0	
oct. 2006	60,3	7,4	1,51	6,6	1,5	-6,95	-25	100	0	0	

Calculs des âges											
	brut	Tamers	Pearson	Mook	F & G	F & G eq	AIEA	Evans	Eichinger	Olive	
06/07/1999	17200	12000	6100	10900	5100	11200	7700	3100	2900	10000	
oct. 2006	22500	17300	11900	16500	11000	16800	13500	9200	9200	15200	

Figure IV.37 : Application des modèles d'âge classiques (Tamers, 1960, Pearson et Hanshaw, 1970, Mook, 1976, Fontes et Garnier, 1979, Salem *et al.*, 1980, Eichinger, 1983, Olive, 1999 in Simler, 2007)

Cependant, il a été établi précédemment que trois phénomènes sont responsables de la dilution du C "jeune" par du C "mort" dans les eaux thermales de la Léchère : la dissolution des carbonates, des arrivées de CO₂ profond et la dégradation de MO fossile. L'application directe des modèles de correction de la dissolution des carbonates ne suffit donc pas. Bajjali *et al.* (1997) et Kattan (2002) proposent des modèles permettant de prendre en compte les trois phénomènes à la fois. Ces auteurs évaluent la dilution par la dissolution des carbonates de manière moins précise que les modèles classiques évoqués précédemment. De ce fait, seuls les facteurs de dilution par la réduction des sulfates et par l'arrivée de CO₂ profond, calculés grâce aux équations de la figure IV.38, sont pris en compte dans notre application sur les eaux thermales de la Léchère. On obtient alors une valeur de ¹⁴C initiale, corrigée de ces deux effets (figure IV.39).

Dilution par la réduction des sulfates en présence de MO :	Dilution par l'arrivée de CO ₂ du manteau :
$f_{rs} = \frac{mCID_{mes}}{mCID_{mes} + mH_2S} \quad (12)$ <p>avec :</p> <p>f_{rs} : facteur de dilution par la réduction des sulfates mCID_{mes} : molalité du carbone inorganique dissous mesuré mH₂S : molalité du gaz H₂S</p>	$f_{ma} = \frac{\delta^{13}C_{mes} - \delta^{13}C_{ma}}{\delta^{13}C_{rs}} \quad (14)$ <p>avec :</p> <p>f_{ma} : facteur de dilution par l'arrivée de CO₂ du manteau δ¹³C_{mes} : valeur du δ¹³C mesuré δ¹³C_{ma} : valeur du δ¹³C du CO₂ mantellique (-4 à -8‰ vs PDB) δ¹³C_{rs} : valeur du δ¹³C corrigé de l'effet de la réduction des sulfates</p>
$\delta^{13}C_{rs} = \frac{\delta^{13}C_{rech} \times mCID_{rech} + \delta^{13}C_{org} \times mH_2S}{mCID_{mes} + mH_2S} \quad (13)$ <p>avec :</p> <p>δ¹³C_{rs} : valeur du δ¹³C corrigé de l'effet de la réduction des sulfates δ¹³C_{rech} : valeur du δ¹³C des eaux de l'aire de recharge mCID_{rech} : molalité du carbone inorganique des eaux de l'aire de recharge δ¹³C_{org} : valeur du δ¹³C de la MO (-25 à -30‰ vs PDB) mH₂S : molalité du gaz H₂S mCID_{mes} : molalité du carbone inorganique dissous mesuré</p>	$mCO_{2ma} = \frac{mDIC_{mes} \times \delta^{13}C_{mes} - mCID_{mes} \times \delta^{13}C_{rs}}{\delta^{13}C_{ma} - \delta^{13}C_{rs}} \quad (15)$ <p>avec :</p> <p>mCID_{mes} : molalité du carbone inorganique dissous mesuré δ¹³C_{mes} : valeur du δ¹³C mesuré δ¹³C_{rs} : valeur du δ¹³C corrigé de l'effet de la réduction des sulfates δ¹³C_{ma} : valeur du δ¹³C du CO₂ mantellique (-4 à -8‰ vs PDB)</p>
$^{14}C_{corr} = f_{rs} \times f_{ma} \times ^{14}C_{mes} \quad (16)$ <p>avec :</p> <p>¹⁴C_{corr} : activité ¹⁴C corrigée de la dilution par la réduction des sulfates et l'arrivée de CO₂ du manteau ¹⁴C_{mes} : activité ¹⁴C mesurée f_{rs} : facteur de dilution par la réduction des sulfates f_{ma} : facteur de dilution par l'arrivée de CO₂ du manteau</p>	

Figure IV.38 : Formules de calcul des facteurs de dilutions du ¹⁴C par la réduction des sulfates et l'arrivée de CO₂ mantellique, d'après Kattan (2002)

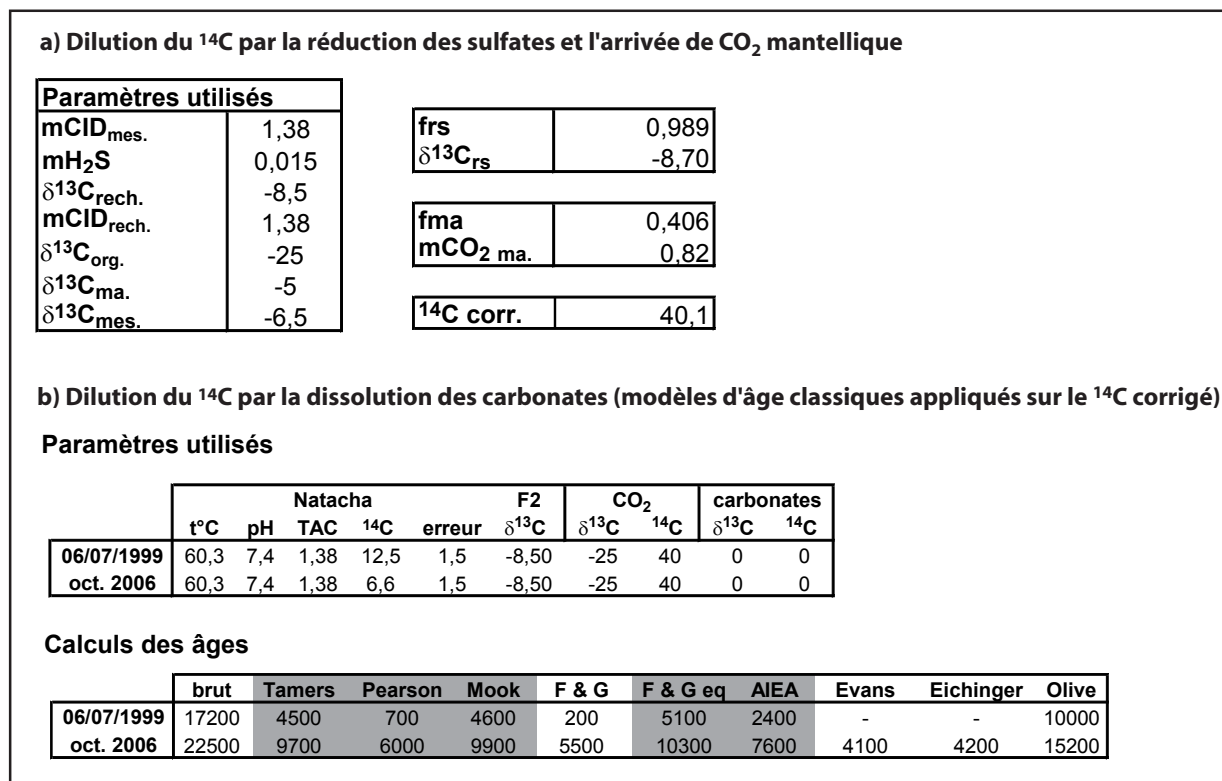


Figure IV.39 : a) Calcul des facteurs de dilution du ^{14}C par la réduction des sulfates et l'arrivée de CO_2 profond
 b) Application des modèles d'âge classiques à partir de la valeur de ^{14}C initiale ainsi corrigée
 en grisé : modèles d'âge retenus pour le contexte de la Léchère

Pour calculer le $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ corrigé de l'effet de la réduction des sulfates, la teneur en HCO_3 et le $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ des eaux de l'aire de recharge sont nécessaires. Les eaux triasiques superficielles correspondent aux eaux de l'aire de recharge. Bien que les analyses de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ des eaux sulfatées soient potentiellement perturbées par la présence de sulfates, le point F2, le moins sulfaté, est choisi pour représenter les eaux de l'aire de recharge. L'idéal aurait été d'avoir une valeur correcte de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ pour les eaux sulfatées superficielles. Par contre, comme les eaux profondes échangent peu avec des carbonates, la teneur en HCO_3 de l'aire de recharge est considérée comme égale à celle des eaux de Natacha.

Par cette approche, on observe une nouvelle fois que la dilution par le CO_2 profond est plus importante que celle par la réduction des sulfates (figure IV.39a).

A partir de la valeur de ^{14}C corrigée, on peut appliquer les modèles classiques de correction de la dilution par les carbonates (figure IV.39b). Par approximation, il a été choisi de considérer que le $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ des eaux thermales, non modifié par les processus de réduction bactérienne et par les échanges avec le CO_2 mantellique, est égal au $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ du point F2.

Certains modèles ne sont pas adaptés à notre contexte (Fontes, 1976 et Huneau, 2000). Celui d'Evans est valable pour des températures inférieures à 25°C et pour un échange avec une matrice carbonatée infinie. Le modèle de Eichinger (1983) nécessite un temps de séjour long avec la matrice carbonatée. Le modèle de Fontes et Garnier équilibrant est plus précis que le Fontes et Garnier simple (1979). En ne retenant que les modèles adaptés au contexte de la Léchère (en grisé sur la figure IV.39b), la première valeur, obtenue en juillet 1999, donne des âges compris entre 700 et 5100 ans et la dernière valeur, obtenue en octobre 2006, donne des âges compris entre 6000 et 10300 ans. Une interprétation de la différence entre ces deux valeurs est proposée à l'issue de la modélisation numérique (cf. chapitre V, §III.1.3).

Malgré ces corrections, intégrant au mieux tous les phénomènes de dilution du C "jeune", on reste dans des ordres de grandeur de plusieurs milliers d'années. Il semble que les eaux thermales, captées actuellement, se soient infiltrées après la dernière glaciation. Les rapports $\delta^{18}\text{O}$ des eaux thermales ne seraient donc pas perturbés par des variations climatiques et les altitudes d'infiltration calculées peuvent être considérées comme correctes (cf. chapitre IV, § IV.1.2.3).

À l'issue de ces calculs des temps de séjour, une précision nécessite d'être apportée. En effet, la quantité de CO_2 profond échangeant avec les eaux thermales, calculée avec les formules de Kattan (figure IV.38) est de 0,8 mol/l. Or, la quantité de CO_2 analysée dans les eaux de Natacha est de 4,75 ml/kg soit seulement 0,2 mmol/l. L'échange avec du CO_2 profond, mis en évidence par le $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMD}}$ et la très faible quantité de CO_2 présent dans les eaux thermales semblent contradictoires. Seule une précipitation de calcite pendant la remontée des eaux vers la surface pourrait être responsable de la consommation de CO_2 et expliquer cette contradiction. Ce phénomène de précipitation n'a pas été pris en compte dans la correction des âges ^{14}C .

2. Apport des analyses isotopiques des roches

2.1. Origine des sulfates et des sulfures dans les eaux thermales

Afin de mieux comprendre les phénomènes responsables de la présence de sulfates et sulfures dans les eaux thermales de la Léchère, des analyses isotopiques ont été réalisées sur les sulfates et sulfures des eaux et des roches évaporitiques.

2.1.1) Description des données

Afin d'avoir un aperçu régional des signatures isotopiques des évaporites, plusieurs échantillons de gypse ont été prélevés au niveau des contacts triasiques : SG6 pour l'accident de la Léchère, SG7 pour le contact occidental entre massif de Belledonne et couverture dauphinoise et SG8 pour l'accident médian (cf. localisation des prélèvements figure II.3). Sur l'ensemble de ces échantillons d'évaporites, ont été analysés les rapports $\delta^{34}\text{S}$ et $\delta^{18}\text{O}$ (tableau IV.19). De plus, les échantillons SG7 et SG8, prélevés dans la galerie Arc-Isère par Gasquet (1979), non soumis à l'altération de surface, ont révélé la présence relativement importante de pyrites. Le $\delta^{34}\text{S}$ des pyrites de l'accident médian (SG11) a donc également été analysé (tableau IV.19). Toutes les analyses ont été effectuées par IRMS au laboratoire Hydroisotop.

Les rapports $\delta^{34}\text{S}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des sulfates et le $\delta^{34}\text{S}$ des sulfures ont également été analysés sur les eaux thermales de la Léchère (tableau IV.19).

	$\delta^{34}\text{S}$ (SO ₄)	$\delta^{18}\text{O}$ (SO ₄)	$\delta^{34}\text{S}$ (H ₂ S)	$\delta^{34}\text{S}$ (S ²⁻)
ROCHES				
SG6 (gypse gal. EDF la Léchère)	14,8	13,3		
SG7 (gypse gal. Arc-Isère)	14,7	11,6		
SG8 (gypse gal. Arc-Isère)	15,8	16,9		
SG11 (pyrites gal. Arc-Isère)				-0,8
EAUX				
Natacha	19,7	16,3	9,4	

Tableau IV.19 : Analyses des rapports $\delta^{34}\text{S}$ (SO₄), $\delta^{18}\text{O}$ (SO₄), $\delta^{34}\text{S}$ (H₂S) et $\delta^{34}\text{S}$ (S²⁻) des eaux thermales de la Léchère et des évaporites

(localisation des échantillons d'évaporites sur la figure II.3)

2.1.2) Résultats

Les quatre évaporites analysées ont des signatures isotopiques relativement proches : de 14,7 à 15,8‰ pour le $\delta^{34}\text{S}$ et de 11,6 à 16,9‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$. Quant aux pyrites de l'accident médian, elles présentent un $\delta^{34}\text{S}$ de -0,8‰. Les sulfates des eaux thermales présentent des rapports isotopiques plus enrichis que les évaporites (19,7‰ pour le $\delta^{34}\text{S}$ et 16,3‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$). À l'inverse, les sulfures présentent un $\delta^{34}\text{S}$ appauvri par rapport aux gypses. Il semble donc que les eaux thermales de la Léchère soient marquées par des phénomènes de réduction bactérienne des sulfates en sulfures. En effet, les phénomènes de réduction des sulfates en sulfures sont responsables de la concentration de l'isotope lourd dans les sulfates résiduels (Smejkal, 1979 in Mook, 2000).

Le soufre contenu dans les eaux thermales de la Léchère provient donc de la réduction bactérienne des sulfates en sulfures et en aucun cas de la dissolution de la pyrite.

2.2. Température de dépôt des travertins de la route de la Forêt

Le secteur qui s'étend de la Route de la Forêt jusqu'aux thermes est recouvert de travertins (cf. carte géologique de la planche hors texte n°1). Ces travertins constituent un enregistrement des conditions de dépôt. Les analyses de leur composition isotopique vont permettre de savoir si des eaux thermales ont, un jour, circulé dans ce secteur.

2.2.1) Description des données

Trois carottes ont été prélevées sur le terrain (annexe 3) :

- le forage I (échantillons trav. Ia et trav. Ib) réalisé au bout de la route de la forêt à environ 680 m d'altitude, sur une parcelle terrassée ;
- le forage II (échantillons trav. IIa et trav IIb) réalisé juste en contrehaut des thermes à environ 450 m d'altitude ;
- le forage III (échantillons trav. IIIa, trav. IIIb, trav. IIIc et trav. IIId) réalisé juste en dessous du forage II et qui devrait logiquement être la base du forage II.

Les rapports $\delta^{18}\text{O}$ ont été analysés sur les différents échantillons de ces carottes et les résultats sont présentés sur le tableau IV. 20.

	profondeur en cm	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ vs SMOW ($\pm 0,1$)	t°C
trav Ia	5	21,4	
trav Ib	20	21,4	
trav IIa	5	20,5	
trav IIb	25	20,6	
trav IIIa	5	20,3	
trav IIIb	30	20,3	
trav IIIc	82	20,9	
trav IIId	95	20,6	
RF (moyenne)		-12,1	10
Nat (moyenne)		-12,5	60

Tableau IV.20 : Analyses du $\delta^{18}\text{O}$ des échantillons de travertins et des eaux du forage Natacha et de la source RF

2.2.2) Résultats

A partir des équations de fractionnement qui régissent la réaction de précipitation de la calcite (Friedman et O'Neil, 1977), il est possible de savoir à quelle température ces travertins ont pu se déposer (figure IV.40). Les signatures isotopiques des travertins analysés sont relativement proches, ce qui indique que l'ensemble des dépôts s'est formé à la même température. Des tests sont réalisés entre l'échantillon III.e et les eaux de la source RF puis celles du forage Natacha. A partir des rapports $\delta^{18}\text{O}$, il apparaît que les travertins ont pu être déposés par les eaux de la source RF pour une température de 10°C, correspondant justement à la température moyenne d'émergence. Ils ne pourraient être déposés par les eaux du forage Natacha qu'à une température de 2°C. Pour conclure, les signatures isotopiques des travertins tendent à montrer qu'ils ont été déposés par le même type d'eau superficielle froide que celle qui circule actuellement dans le secteur.

$\delta^{18}\text{O}$: Fractionnement calcite-eau (Friedman et O'Neil, 1977)

$$10 \ln \alpha = (\delta^{18}\text{O}_c - \delta^{18}\text{O}_w) = \frac{2780000}{(t^\circ\text{C} + 273)^2}$$

$\delta^{18}\text{O}_c$: $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates précipités
 $\delta^{18}\text{O}_w$: $\delta^{18}\text{O}$ des eaux

Figure IV.40 : Equations de fractionnement calcite-eau et calcite- HCO_3

V. Conclusion

Afin de définir les interactions fluide-roche, les différents faciès de roches et d'eaux, présents sur le secteur étudié, ont été analysés, aussi bien en ce qui concerne les éléments majeurs que les éléments traces. A l'issue de ce chapitre, on peut définir les roches "réservoirs", à l'origine de la minéralisation de chaque faciès d'eau (figure IV.41).

Ainsi, **les eaux issues des carbonates et des Micaschistes de Feissons-sur-Isère (MFI)** acquièrent un faciès bicarbonaté calcique (Ca-HCO_3), très peu minéralisé (300 à $400\mu\text{S/cm}$). Du fait de leur court temps de séjour, elles ne sont marquées que par les éléments facilement mobilisables des roches qu'elles traversent.

Les eaux triasiques superficielles (ETS) regroupent toutes les eaux superficielles issues des formations triasiques (cargneules, dolomies et gypses). Les contacts tectoniques, jalonnés d'évaporites, drainent les eaux circulant dans les fissures et fractures des MFI du socle mais aussi, dans une moindre proportion, celles des carbonates de la couverture. Les ETS sont donc marquées majoritairement par les gypses et les dolomies du contact tectonique qui leur confèrent un faciès sulfaté calcique magnésien légèrement bicarbonaté ($\text{Ca-Mg-SO}_4 + \text{HCO}_3$), enrichi par la présence des éléments B, Br, Mn et Sr. L'implication des carbonates et des MFI permet aux ETS de se charger respectivement en Ca et HCO_3 , d'une part, et en Ba, d'autre part. Ces ETS se retrouvent en système fermé par rapport à l'atmosphère et précipitent de la calcite à leur émergence. Les eaux se sont infiltrées à une altitude moyenne comprise entre 1100 et 1500m et leur temps de séjour est de quelques années (moins de 10ans).

Les eaux thermales de la Léchère, comme les ETS, regroupent les eaux drainées par les accidents tectoniques, mais cette fois à grande profondeur. La différenciation entre ETS et eaux thermales est uniquement due à cet étagement des écoulements. Tout d'abord, la géométrie des contacts tectoniques est très variable et correspond à des échelons discontinus. En profondeur, les eaux thermales ne sont alors plus (ou peu) en contact avec les dolomies et les carbonates. Par contre, elles atteignent la halite qui est généralement présente en profondeur, le long des chevauchements alpins (Razack et Dazy, 1990). Deuxièmement, la température élevée des eaux et leur temps de séjour de plusieurs milliers d'années (moins de 10000 ans) facilite les possibilités d'échanges entre Ca et Na sur les argiles des MFI et l'acquisition de la silice des roches métamorphiques (MFI, gneiss et granites). Les eaux thermales ont donc un faciès sulfaté calcique et sodique, avec également un peu de Cl, K et Si. Troisièmement, les eaux thermales sont marquées par des échanges avec de la matière organique, présente dans les roches permo-carbonifères, comme en atteste la présence de NH_4 et CH_4 dans les eaux du forage Natacha. Cet échange avec de la MO rend alors possible la réduction bactérienne des sulfates en sulfures. Pour finir, les eaux thermales se chargent en Rn et en CO_2 en profondeur.

En contact avec des roches du socle et du contact tectonique, les eaux thermales acquièrent un faciès sulfaté calcique et sodique, enrichi par la présence de nombreux éléments (SiO_2 , K, F, Cl, NH_4 , B, Ba, Br, F, Mn et Sr) ainsi que de gaz dissous (CO_2 , CH_4 , H_2S et Rn). En remontant à la surface où elles sont captées par le forage Natacha, les eaux thermales passent de 90°C à 60°C et précipitent probablement de la calcite. Si l'on considère que les eaux se sont infiltrées après la dernière glaciation, l'altitude moyenne de l'aire d'alimentation est comprise entre 1400 et 1600m.

Dans la zone d'émergence, le remplissage quaternaire est le siège d'un mélange entre les eaux thermales, les eaux de la nappe alluviale et des eaux correspondant aux ETS avant qu'elles ne précipitent de la calcite. Ainsi, les forages RVI et RVII captent les eaux présentes dans l'écroulement ancien résultant d'un mélange entre pôle thermal et pôle triasique. A l'inverse, les forages anciens, moins profonds, le lac et les piézomètres résultent d'un mélange entre les trois faciès, en proportion variable.

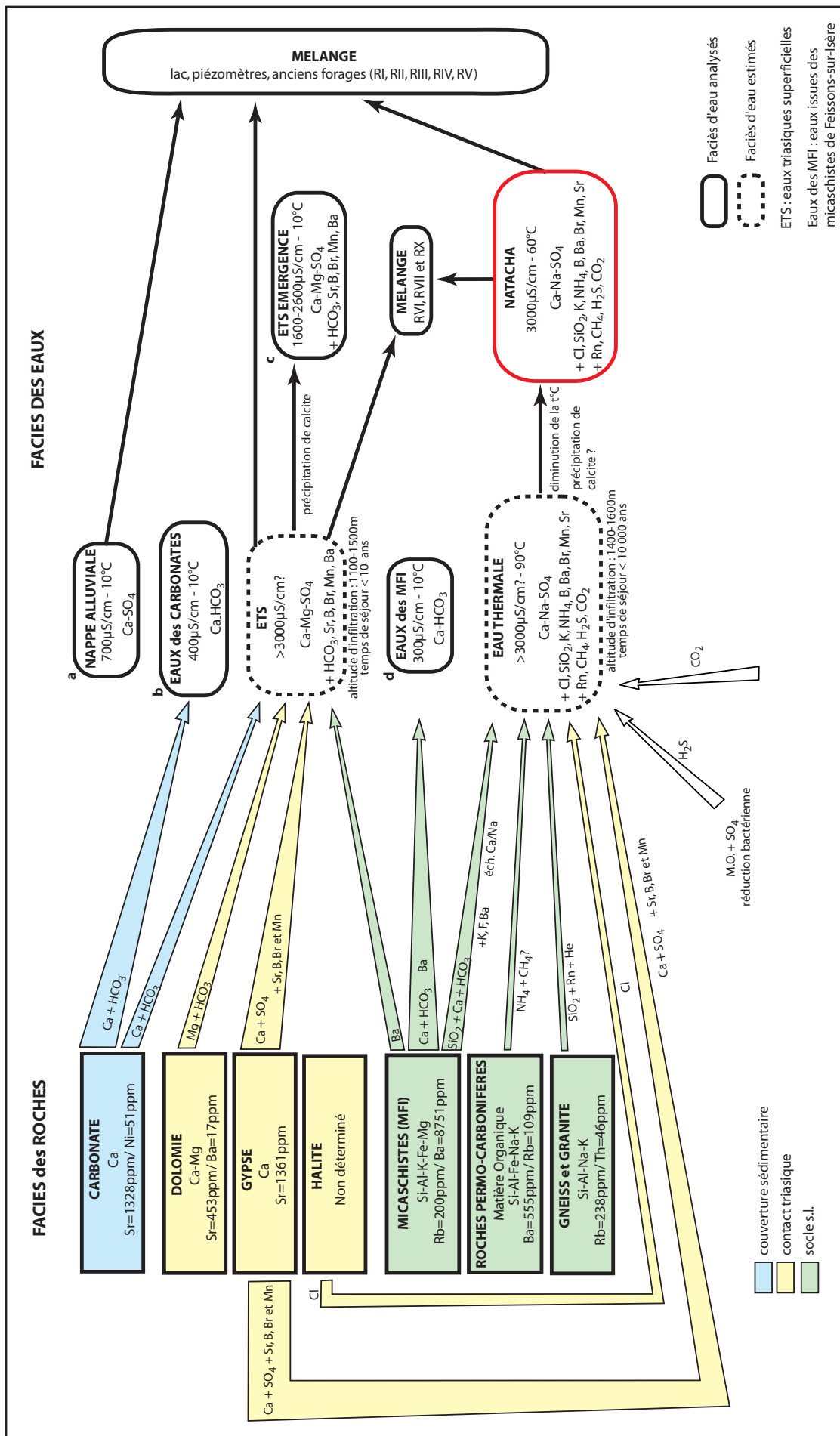


Figure IV.41 : Acquisition de la minéralisation des eaux du site de la Léchère pour les roches, seuls sont indiqués les cations et les éléments traces dominants, pour les eaux sont indiqués les faciès chimiques et les éléments majeurs et traces de forte concentration ; faciès a : Isère et Bellecombe, faciès b : Avignons et Guilloles, faciès c : RE, VS, F2, V8 et V46, faciès d : Glaitzette, Source des îles et Tartet, RI à RX : forages thermaux anciens

Chapitre V : Modélisation numérique couplée hydrodynamique / thermique

Le chapitre V rend compte des résultats de la modélisation numérique couplée hydrodynamique et thermique, basée sur un modèle conceptuel construit à partir des informations des chapitres précédents.

Chapitre V : Modélisation numérique couplée hydrodynamique / thermique

A l'issue de chacune des études géologique, hydrodynamique et hydrogéochimique du système thermal de la Léchère, un schéma conceptuel a été proposé. Les phénomènes thermiques du système de la Léchère, en lien avec les conditions hydrodynamiques, vont maintenant être étudiés grâce à une modélisation numérique couplée hydrodynamique / thermique.

I. Introduction

1. Concepts fondamentaux de la modélisation couplée hydrodynamique / thermique

Les équations fondamentales régissant les aspects hydrodynamiques sont détaillées en figure V.1. La loi de Darcy (équations 17 et 18) associée à la loi de continuité (équation 19) permet de définir les écoulements en régime permanent, par l'équation de Laplace (20) et, en régime transitoire, par l'équation de diffusivité (21). La répartition des charges hydrauliques dépend alors des conditions aux limites fixées au départ et des conductivités hydrauliques de l'encaissant (De Marsily *et al.*, 1999). Dans notre cas, nous avons procédé à la résolution du problème de manière directe. Les conditions aux limites sont connues et les charges hydrauliques observées sont calées en fixant le champ de conductivités hydrauliques par essai-erreur. Les conductivités hydrauliques obtenues doivent rester dans un ordre de grandeur correspondant à celles des formations géologiques.

HYDRODYNAMIQUE	
<p>Loi de Darcy :</p> $Q = K.A. \frac{\Delta h}{L} \quad (17)$ <p>en 3 dimensions :</p> $Q = \frac{\partial}{\partial x} \left(Kx \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Ky \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(Kz \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (18)$	<ul style="list-style-type: none"> - Q : débit en m³/s - Δh/L : gradient hydraulique, sans unité - K : conductivité hydraulique en m/s - A : section d'écoulement en m²
<p>Loi de continuité :</p> $-\left[\frac{\partial(\rho_w q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w q_z)}{\partial z} \right] = \frac{\partial(\rho_w n)}{\partial t} \quad (19)$	<ul style="list-style-type: none"> - ρ_w : masse volumique de l'eau en kg/m³ - n : porosité, sans unité - Q : débit en m³/s
<p>Equation de Laplace :</p> <p>en régime permanent :</p> $\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (20)$	<p>Equation de diffusivité :</p> <p>en régime transitoire :</p> $\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (21)$ <p>S_s : emmagasinement spécifique en l⁻¹</p>

Figure V.1 : Equations fondamentales régissant les écoulements

Les équations fondamentales régissant les flux de chaleur sont détaillées en figure V.2. La chaleur se transmet par trois processus : la conduction, la convection (ou advection) libre et la convection (ou advection) forcée (Domenico et Schwartz, 1998). Le transfert par conduction est régi par la loi de Fourier (équations 22 et 23), équivalente à la loi de Darcy. Au même titre que les écoulements, la conduction est définie par une loi de continuité (équation 24). La convection est le transfert de chaleur par l'eau en mouvement. On parle de convection libre lorsque le mouvement de l'eau est dû uniquement aux différences de densité du fluide et de convection forcée lorsque l'eau circule sous l'effet d'un gradient hydraulique. Le flux de chaleur convectif est défini par l'équation (25). Lorsque la conduction et la convection sont impliquées dans le transfert de chaleur, la loi de continuité s'exprime selon l'équation (26).

Pour le système de la Léchère, les transferts de chaleur par convection libre sont négligeables en comparaison avec les transferts par conduction et par convection forcée.

THERMIQUE	
Conduction	
<p>loi de Fourier :</p> $q = -k \frac{\Delta T}{x} \quad (22)$ <p>en 3 dimensions :</p> $q = - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(kx \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(ky \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(kz \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (23)$	<ul style="list-style-type: none"> - q : flux thermique en J/s/m² ou en W/m² - k : conductivité thermique en W/m/°C - ΔT/x : gradient géothermique en °C/m
Loi de continuité :	
$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (24)$	<ul style="list-style-type: none"> - α : diffusivité thermique en m²/s <li style="text-align: center;">$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c}$ - k : conductivité thermique en W/m/°C (fluide + solide) - ρ : densité en kg/m³ (fluide + solide) - c : capacité thermique en J/m³/°C (fluide + solide)
Convection	
$q_{conv} = Q \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot T \quad (25)$	<ul style="list-style-type: none"> - q_{conv} : flux thermique convectif - Q : flux volumique du fluide en m/s - ρ_f : densité du fluide en kg/m³ - c_f : capacité thermique du fluide en J/kg/°C - T : température du fluide en °C
Conduction + Convection	
$\underbrace{k \nabla^2 T}_{\text{conduction}} - \underbrace{Q \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot \nabla T}_{\text{convection}} = \underbrace{c \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{emmagasinement}} \quad (26)$	

Figure V.2 : Equations fondamentales régissant les flux de chaleur

2. Domaines d'application de la modélisation couplée hydrodynamique/thermique

La modélisation couplée hydrodynamique / thermique est utilisée dans différents domaines d'application : l'exploitation de l'énergie géothermique, le stockage des déchets radioactifs, la réalisation de tunnels, la paléoclimatologie et enfin le thermalisme.

L'exploitation de l'énergie géothermique se fait par des échangeurs thermiques. Ces installations sont constituées de deux forages profonds : l'un dans lequel on injecte un fluide (eau ou air) depuis la surface et l'autre dans lequel on récupère ce fluide, mis en équilibre avec la température du sous-sol lors de son parcours souterrain. Dans ce cadre, la simulation numérique est essentiellement utilisée afin d'évaluer les conditions nécessaires à la viabilité du système d'exploitation géothermique (Signorelli *et al.*, 2006 et Bataillé *et al.*, 2006). Par exemple, pour les échangeurs thermiques exploités en mode double-saison (flux de chaleur émis vers le sous-sol en été et flux de chaleur extrait du sous-sol en hiver), un équilibre entre flux de chaleur entrant et flux de chaleur sortant doit être respecté (Li *et al.*, 2006).

Le stockage de déchets radioactifs en profondeur mène à l'émission d'un flux de chaleur par désintégration radioactive. Le site expérimental de Yucca Mountain (Nevada, USA) est le lieu d'une recherche active depuis plus de deux décennies. Sur ce site, la modélisation numérique a permis, entre autres, d'évaluer la réponse des écoulements de la zone non saturée face à l'augmentation artificielle de la température (Wu *et al.*, 2006). Cette approche s'intègre dans une approche plus globale prenant en compte les flux hydrodynamiques et thermiques mais également le transport (Wu *et al.* 2007).

Dans le cadre de la réalisation de tunnels, la simulation numérique est testée comme outil de prédiction. Ainsi, l'évolution des débits rencontrés par l'ouvrage peut être simulée (Molinero *et al.*, 2002). En couplant cette simulation hydrodynamique aux effets thermiques, l'impact de l'ouvrage sur les écoulements mais aussi sur la répartition des températures peut être évalué (Maréchal *et al.*, 1999).

Les divers changements climatiques, qui ont eu lieu durant le quaternaire, ont fait varier la température de la surface terrestre (TST). Ces modifications de la TST sont enregistrées par la répartition actuelle des températures dans le sous-sol. L'analyse des diagaphies thermiques de forage permettent de reconstituer l'évolution de la TST (Beltrami *et al.* 1997). Dans ce cadre, la simulation numérique permet d'intégrer l'ensemble des paramètres pouvant modifier la répartition des températures dans le sous-sol et notamment la topographie (Kohl, 1999).

La simulation numérique couplée hydrodynamique / thermique est peu utilisée comme outil de compréhension des systèmes thermaux. En France, on peut citer les travaux de Le Fanic (2005) qui ont permis d'évaluer l'impact de nouveaux scénarii d'exploitation sur la ressource thermique de Dax. En ce qui concerne le système thermal de la Léchère, la modélisation va permettre de valider numériquement les hypothèses de circulation des eaux souterraines profondes et superficielles émises dans les premières parties de ce travail.

3. Les écoulements et les flux de chaleur dans les versants montagneux

Le système de la Léchère est caractérisé par des circulations superficielles et profondes de versant montagneux.

Les zones à fort relief présentent une succession de crêtes et de vallées qui va “guider” les écoulements (figure V.3). La surface piézométrique est une “réplique” de la surface topographique. Ainsi, les crêtes constituent des lignes de partage des eaux et les vallées des zones de concentrations des écoulements. La différence d’altitude suffit à créer des circulations d’eau à relativement grande profondeur.

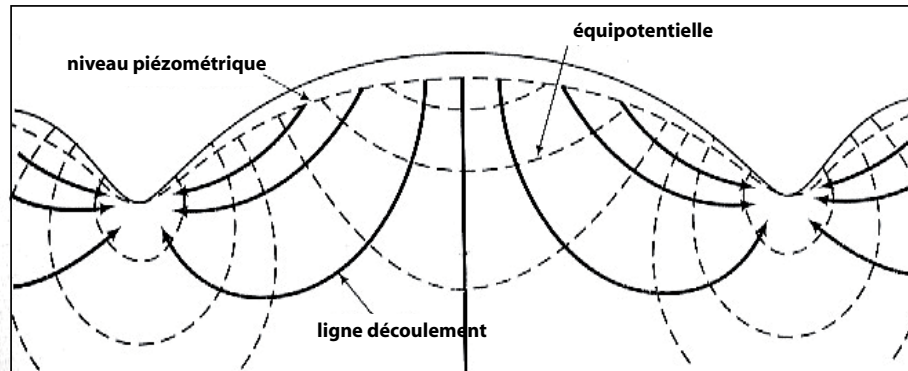


Figure V.3 : Flux contrôlé par la topographie (d’après Hubbert, 1940 in Domenico et Schwartz, 1998)

De nombreux modèles conceptuels des circulations dans les versants montagneux ont été proposés (Bordet, 1971, Cruchet, 1983, Gourgand, 1983, Massonnat, 1981 et Maréchal 1998). Tous s’accordent sur une même conception illustrée par Bordet (1971) (figure V.4). Une zone décomprimée, développée en surface, présente une conductivité hydraulique plus forte qu’en profondeur. Les deux zones constituent un seul aquifère qui déborde par des sources de versant lorsque la surface piézométrique passe au dessus de la surface topographique.

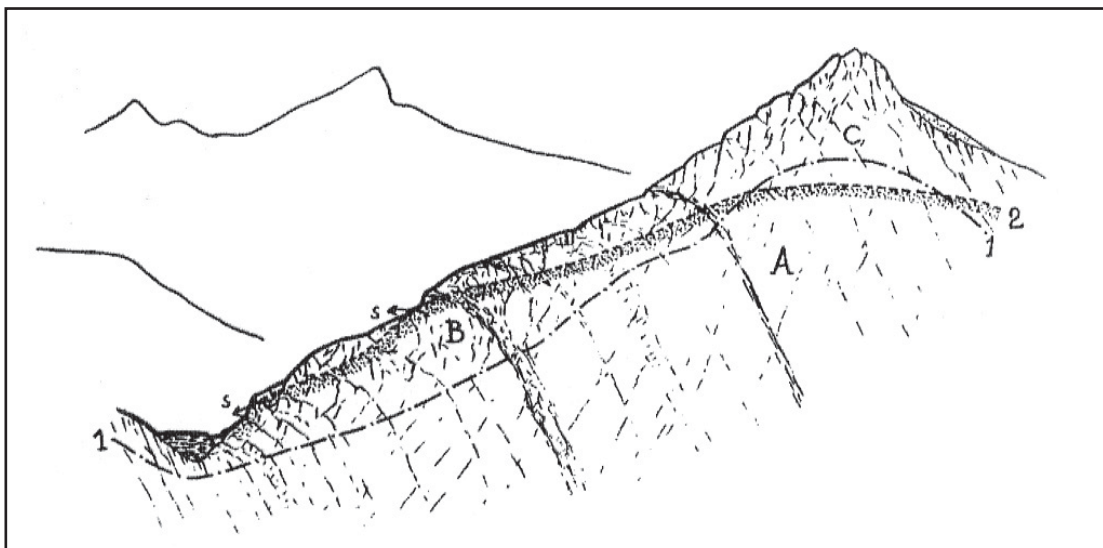


Figure V.4 : Schéma de la fissuration et de la répartition de l’eau dans un versant montagneux (Bordet, 1971)

1 : limite de la zone décomprimée de surface

2 : surface de la nappe de fissure

A : zone profonde à réseaux de fissures imprégnées d’eau

B : zone décomprimée aquifère

C : tranche décomprimée drainée

Dans les versants montagneux, la conduction thermique va également être influencée par la topographie. En effet, la géométrie accidentée du volume de roche encaissante mène à l'établissement d'un gradient plus important sous les vallées que sous les sommets. Ceci va être amplifié par les transferts de chaleur par convection forcée qui, comme on vient de le voir précédemment, amène les flux d'eau réchauffée vers les vallées (Bodri et Rybach, 1998 et Kohl *et al.* 2001) (figure V.5).

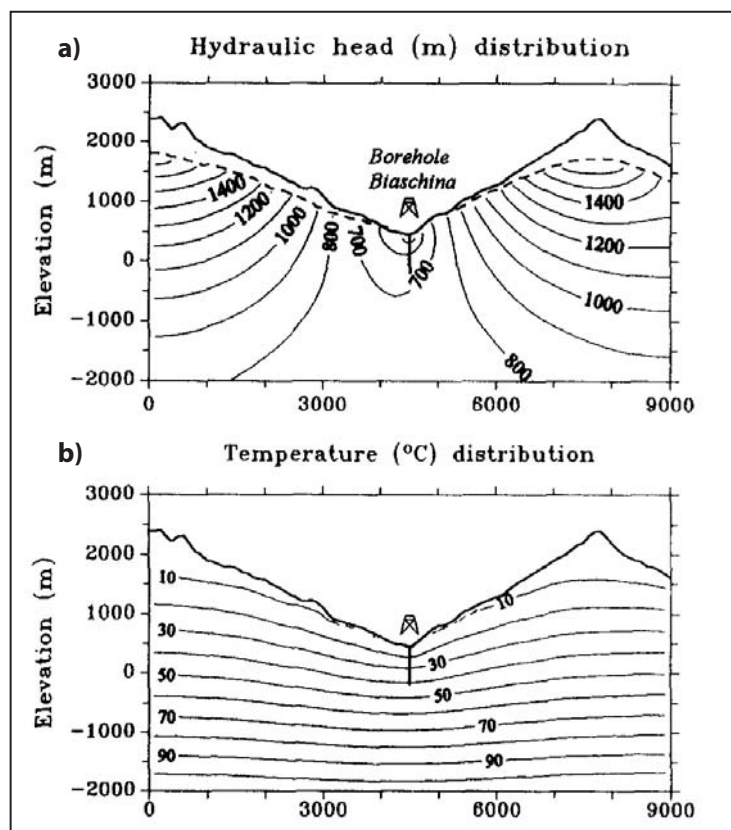


Figure V.5 : Illustration des effets de la topographie sur les écoulements et sur la répartition des températures. Résultats de la modélisation couplée hydrodynamique / thermique sur le site de Biaschina (Suisse) (Bodri et Rybach, 1998)
 a) Distribution des charges hydrauliques (trait plein : surface topographique, pointillé : surface piézométrique)
 b) Distribution des températures calculées

II. Mise en place d'un modèle numérique

1. Objectifs de la modélisation

L'objectif principal de la modélisation numérique est de valider un modèle conceptuel des circulations, impliquant les versants et la vallée, en reproduisant quantitativement les charges, les débits, les temps de transfert et les températures observés (tableau V.1).

Le deuxième objectif de cette modélisation est de comprendre l'évolution temporelle des systèmes thermaux de montagne à une échelle de temps de plusieurs milliers d'années.

points d'observation	charge (en m)	débit (en m ³ /h)	temps de transfert	température (en °C)
galerie EDF	<650	+60	quelques années	10
source RF		<+30	quelques années	10
Natacha	438	+45	plusieurs milliers d'années	60
écroulement	437			40
perte 1 (R ^{au} de la Rave)	<1900	-18		4,6
perte 2 (R ^{au} du Colomaban)	<1030	-90		7,4

Tableau V.1 : Contraintes du modèle : conditions de charge et de débit, temps de transfert, températures observés
 soulignées : conditions imposées, non soulignées : conditions à simuler

2. Modèle conceptuel des écoulements du site de la Léchère

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, les eaux thermales s'infiltrent sur les versants puis sont drainées jusqu'à la vallée de l'Isère par l'accident de la Léchère. Au niveau de la vallée, les eaux remontent le long de ce même accident, penté vers le SE. Les écoulements se font donc selon la direction SW-NE sur les versants puis dans la direction SE-NW au niveau de la zone d'émergence (figure II.39).

Le modèle conceptuel des écoulements du site de la Léchère est représenté en deux dimensions. Ce choix nécessite alors de simplifier la structure géologique. Le contact tectonique de la Léchère est considéré comme vertical et le profil choisi est tracé le long de l'accident, entre l'Homme de Beurre en rive gauche et les Arcochons en rive droite (figure V.6). Nous considérons que le plan ainsi obtenu correspond à la zone de contact entre l'accident triasique et les micaschistes de Feissons-sur-Isère (MFI). La zone ainsi représentée est donc très hétérogène puisque la géométrie du contact tectonique est très variable aussi bien latéralement qu'en profondeur (cf. chapitre II, §III.7).

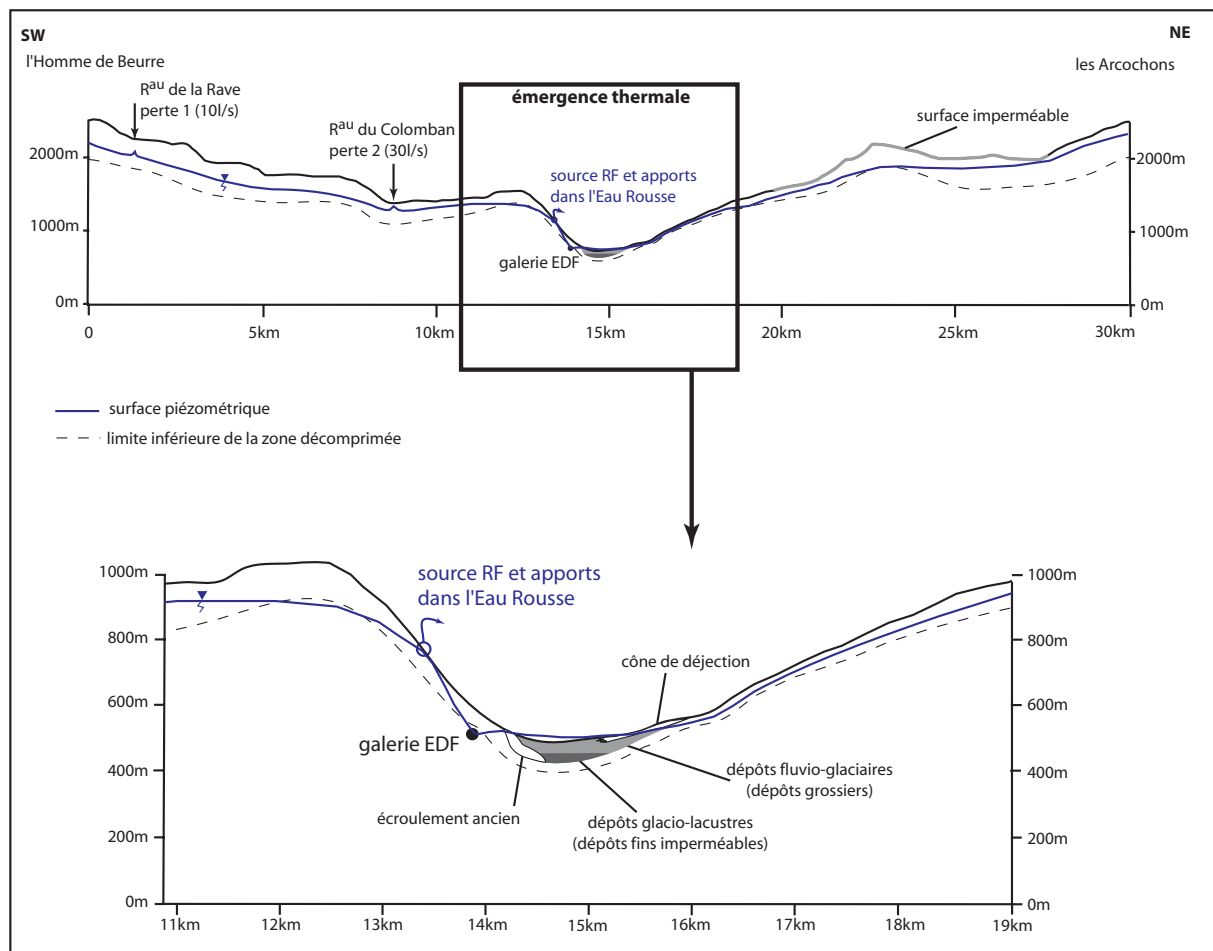


Figure V.6 : Modèle conceptuel du système thermal de la Léchère

Le modèle conceptuel doit respecter l'ensemble des observations et conclusions effectuées dans les parties précédentes (figure V.6).

Tout d'abord, la présence d'une zone décompressée a été prouvée par l'analyse des chroniques hydrodynamiques enregistrées dans le forage Natacha (chapitre III, §II.2.1.2 et figure III.7). L'épaisseur de cette zone décompressée a été définie à 600m sur les sommets (Maréchal, 1998) et inférieure à 100m au niveau de la vallée. En effet, la galerie de reconnaissance EDF, dont les eaux ne présentant pas de dilution rapide lors des recharges, se trouve nécessairement en dehors de cette zone décompressée.

L'alimentation se fait par infiltration sur la surface des deux versants puis l'ensemble des eaux s'écoule vers la vallée. Cependant, en rive droite, la présence de dépôts glacio-lacustres au niveau de Grand Naves

et Ronchat (Anoine *et al.*, 1992) rend cette zone imperméable à toute infiltration. En rive gauche, les deux pertes, identifiées sur le réseau hydrographique, constituent également une entrée du modèle. Celle du ruisseau de la Rave (perte 1) est estimée à 10l/s et celle du Crozat (perte 2) à 30l/s.

La source RF et les apports d'eau observés dans l'Eau Rousse (chapitre III, §I.1.3) constituent des points de sortie du modèle. De même, la galerie EDF draine les eaux du massif et entraîne localement une baisse du niveau piézométrique. Les dépôts fins glacio-lacustres du fond de la vallée glaciaire, recoupés par un écroulement ancien, constituent une barrière semi-perméable qui est responsable du confinement des eaux profondes.

3. Modèle numérique : géométrie du modèle et maillage

Pour réaliser la simulation du système thermal de la Léchère, il a été choisi d'utiliser le logiciel de modélisation en éléments finis FEFLOW® (Diersch, 2002). Ce logiciel permet de coupler la modélisation hydrodynamique à la modélisation thermique.

Le modèle en deux dimensions a été adopté pour tester les phénomènes hydrodynamiques et thermiques observés sur le site thermal de la Léchère.

Le secteur modélisé mesure 30km de long, sa limite inférieure est fixée à 5km sous le niveau de la mer (figure V.7) et la tranche du modèle mesure 1m de large. La surface topographique a été définie par un nombre limité de points (13 points) pour éviter les instabilités numériques, liées à des problèmes de virgule flottante. Ces problèmes sont inhérents à l'utilisation dans un environnement Windows du logiciel FEFLOW®, conçu à l'origine pour un environnement Linux. Le maillage comporte 48 832 éléments triangulaires dont les plus grands mesurent 100m de côté en moyenne et les plus petits, situés dans la zone d'émergence et au niveau des deux zones de perte, mesurent 40m.

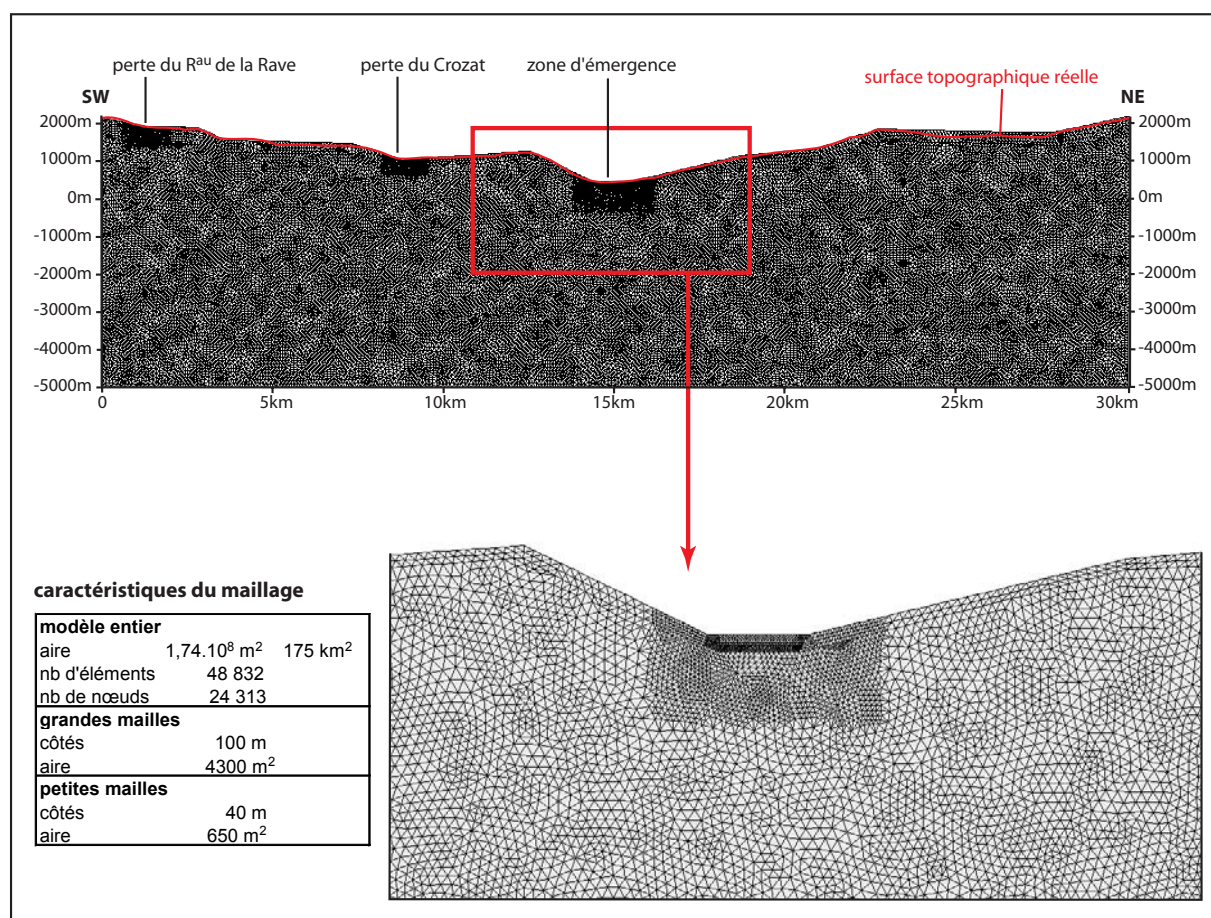


Figure V.7 : Géométrie et maillage du modèle 2D vertical du système de la Léchère

III. La modélisation hydrodynamique

1. Calibration hydrodynamique sur les données actuelles

La calibration hydrodynamique du modèle numérique ne peut être effectuée que sur l'état observé actuellement. Elle consiste à déterminer les conductivités hydrauliques par essai-erreur afin d'obtenir les conditions observées sur le terrain (tableau V.1), en tenant compte des conditions aux limites et en particulier du débit d'exploitation du forage Natacha et du drainage de la galerie EDF.

1.1. Conditions aux limites

L'attribution des conditions aux limites permet de définir les flux entrant et sortant du modèle. La largeur d'affleurement du contact tectonique sur le terrain est estimée à 50 m. La largeur du modèle 2D étant de 1m, les flux, observés sur le terrain et correspondant aux conditions aux limites, sont divisés par 50.

1.1.1) Les entrées

Les entrées dans le modèle regroupent la pluie efficace infiltrée sur les deux versants et les deux pertes identifiées sur le réseau hydrographique en rive gauche de l'Isère (figure V.8).

En ce qui concerne les infiltrations, chaque versant est découpé en trois tranches d'altitude (900-1300m / 1300-1700m / 1700-2100m). A partir des données météorologiques acquises (chapitre III, §I.2), la pluie efficace (Turc mensuel) est calculée pour l'altitude médiane de chaque tranche d'altitude (tableau V.2). Cette valeur d'infiltration est multipliée par 500m, correspondant à la largeur de la bande de MFI drainée par l'accident tectonique de la Léchère. Pour finir, elle est divisée par 50m afin de la reporter à l'échelle du modèle. Aucun flux entrant n'est attribué sur la surface imperméable entre Grand Navas et Ronchat.

Les débits de chacune des pertes (perte 1 : 10l/s et perte 2 : 30l/s) sont divisés par 50 et répartis sur trois puits d'injection.

CELLIERS						
tranche	altitude médiane	Pluie brute calculée	PE (Turc mensuel)	PE(Turc mensuel) x largeur bande drainée (500m)	PE modèle (/50)	en m/jr
900-1300m	1100m	1105	521mm/an	260m ² /an	5,2m/an	1,4.10 ⁻² m/jr
1300-1700m	1500m	1273	699mm/an	350m ² /an	7m/an	1,9.10 ⁻² m/jr
1700-2100m	1900m	1441	879mm/an	439m ² /an	8,8m/an	2,4.10 ⁻² m/jr

NAVES						
tranche	altitude médiane	Pluie brute calculée	PE (Turc mensuel)	PE(Turc mensuel) x largeur bande drainée (500m)	PE modèle (/50)	en m/jr
900-1300m	1100m	1031	443mm/an	221m ² /an	4,4m/an	1,2.10 ⁻² m/jr
1300-1700m	1500m	1143	571mm/an	285m ² /an	5,7m/an	1,6.10 ⁻² m/jr
1700-2100m	1900m	1255	702mm/an	351m ² /an	7m/an	1,9.10 ⁻² m/jr

Tableau V.2 : Calcul des Pluies Efficaces (PE), calculées avec la formule de Turc mensuel et affectées au modèle

1.1.2. Les sorties

Les sorties du modèle, toutes situées au niveau de la vallée, sont constituées par le forage Natacha, la galerie EDF, les sources émergent en bas du versant de la rive gauche (apports observés dans l'Eau Rousse et source RF) et l'Isère qui évacue les eaux présentes dans la nappe alluviale (figure V.8). Le forage Natacha et la galerie EDF sont représentés par des puits de prélèvement. Les sources du bas de versant sont des sources de débordement et sont fixées en imposant une charge égale à la topographie avec une contrainte interdisant tout débit entrant par ces points. Une condition de charge de 437m est fixée au niveau de la nappe de l'Isère.

Les côtés et la base du modèle sont imperméables. En effet, les côtés, fixés au niveau des sommets des bassins versants de l'Eau Rousse et du Grand Nant de Naves, constituent des lignes de partage des eaux et peuvent être assimilés à des limites imperméables. De même, la base du modèle a été fixée à une profondeur suffisamment importante pour pouvoir la considérer comme imperméable.

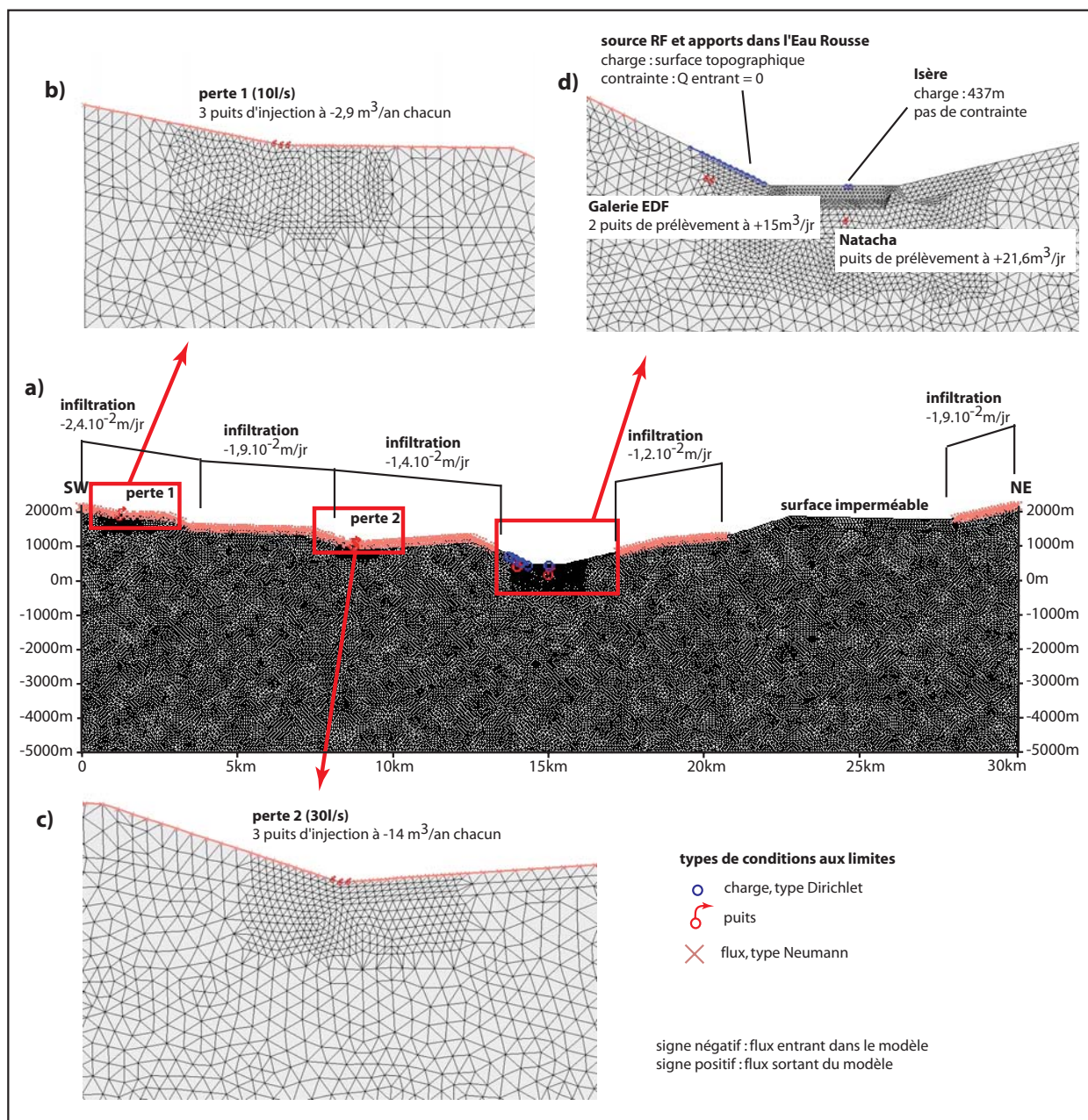


Figure V.8 : Conditions aux limites de la calibration hydrodynamique

a) Infiltrations attribuées au modèle par tranche d'altitude (900-1300m / 1300-1700m / 1700-2100m)

b) Perte 1 (Ruisseau de la Rave à l'Homme de Beurra)

c) Perte 2 (Ruisseau du Colomban au Crozat)

d) Zone d'émergence : galerie EDF, forage Natacha et sources du bas de versant

1.2. Paramètres hydrodynamiques

Les conductivités hydrauliques attribuées au modèle sont contraintes par la géométrie des formations géologiques du modèle conceptuel décrit précédemment. A l'échelle du massif, la zone décompressée de surface doit avoir une conductivité hydraulique supérieure à celle du massif en profondeur. L'épaisseur de cette zone décompressée est d'environ 600m sur les sommets et diminue dans la vallée. Le remplissage quaternaire de la zone d'émergence comporte une couche imperméable de 40m d'épaisseur surmontée par une couche très perméable de 40m d'épaisseur. En rive gauche, ces dépôts scellent un écoulement ancien et en rive droite, un cône de déjection est présent. Les conductivités ont été attribuées par essai-erreur en respectant cette géométrie et en calant les conditions hydrodynamiques observées sur le terrain, concernant les charges ainsi que les temps de transfert (figure V.9 et tableau V.3).

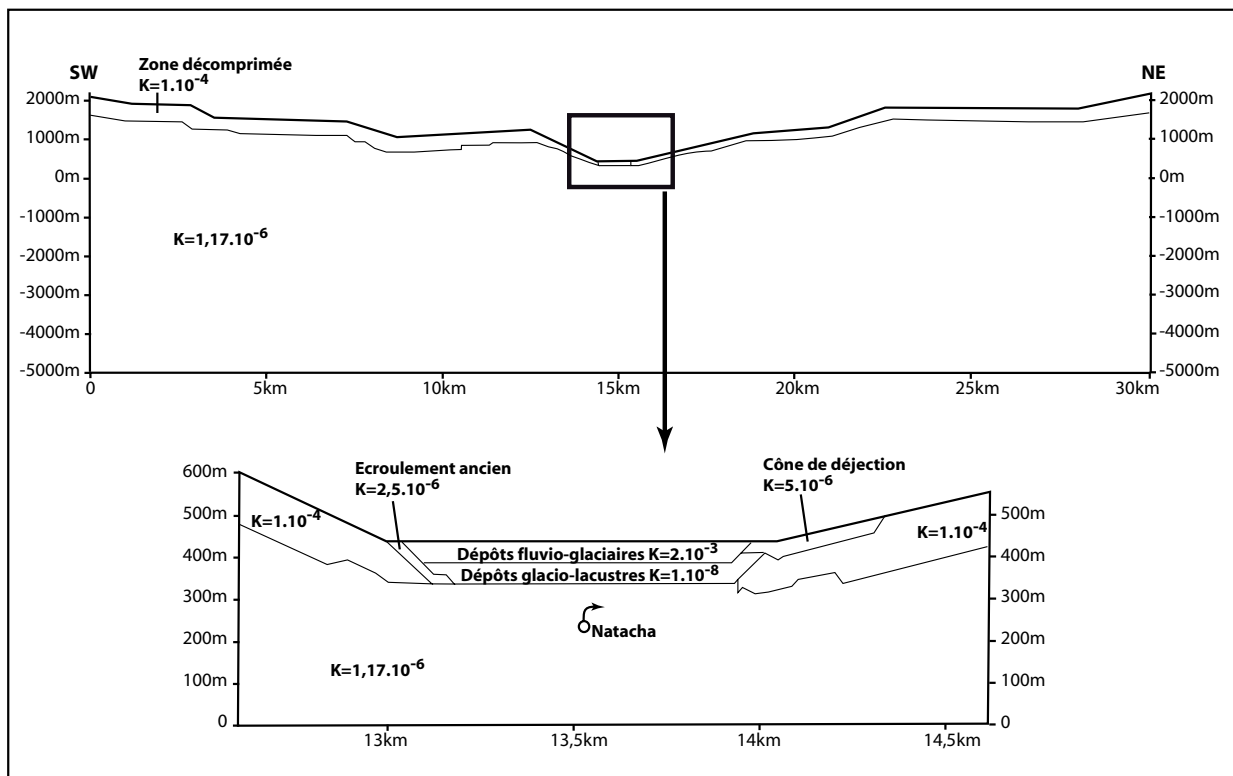


Figure V.9 : Répartition de la conductivité hydraulique K (en m/s) issue de la calibration hydrodynamique

points d'observation	paramètres observés			paramètres simulés		
	charge (en m)	débit (en m3/h)	temps de transfert	charge (en m)	débit (en m3/h)	temps de transfert
galerie EDF	<650	±60	quelques années	500	±60	6ans
source RF		<+30	quelques années		8	
Natacha	438	±45	plusieurs milliers d'années	436	±45	4000 à 12000 ans
écroulement	437			437		
perte 1	<1900	-18		1120	-18	
perte 2	<1030	-90		1015	-90	

Tableau V.3 : Comparaison des paramètres réels et des paramètres obtenus lors de la calibration hydrodynamique soulignées : conditions imposées, non soulignées : conditions à simuler

La conductivité obtenue pour la zone profonde de l'accident tectonique ($1,17 \cdot 10^{-6} \text{m/s}$) est 10 fois plus élevée que les conductivités attribuées par Maréchal (1998) à une zone tectonisée dans les granites (1 à $5 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$). Cependant, le modèle proposé par Maréchal (1998) fixe la charge au niveau de la surface topographique, impliquant une sous-estimation des valeurs de conductivité pour reproduire les débits observés dans le tunnel. La conductivité obtenue pour la zone profonde de l'accident tectonique reste donc dans un ordre de grandeur acceptable.

La zone décomprimée présente une perméabilité 100 fois plus élevée que la zone comprimée. En effet, ce facteur peut atteindre une valeur de 1000 (Maréchal, 1998). Pour obtenir une charge suffisante au forage Natacha, il est nécessaire de supprimer la zone décomprimée sous la vallée de l'Isère. L'érosion glaciaire pourrait être responsable de l'absence de la zone décomprimée sous la vallée.

En ce qui concerne la zone d'émergence, les valeurs de conductivité hydraulique obtenues pour l'écroulement et la nappe alluviale peuvent être comparées à celles estimées à partir des essais par pompage (tableau V.4). Pour la nappe alluviale, la valeur du modèle reste du même ordre de grandeur que celle déterminée par les essais par pompage. Par contre, pour l'écroulement ancien, la valeur du modèle est 10 fois plus faible. Cependant, cet écroulement est vraisemblablement constitué de blocs de tailles diverses, reliés par une matrice plus ou moins fine. Les conductivités hydrauliques sont donc très variables en fonction de la zone considérée. Ainsi, les conductivités estimées par les essais par pompage correspondent à des conductivités représentatives des zones plus perméables tandis que la conductivité déterminée par la calibration du modèle correspond à une moyenne de l'ensemble de l'écroulement.

Une conductivité de $1 \cdot 10^{-8} \text{m/s}$ a été attribuée à la couche imperméable constituée par les dépôts glacio-lacustres.

aquifère	forage	transmissivité en m^2/s	épaisseur de l'aquifère en m	conductivité en m/s	conductivité du modèle en m/s
nappe alluviale	RIV	$2,5 \cdot 10^{-2}$	20	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
	RV	$4,5 \cdot 10^{-2}$	20	$2,25 \cdot 10^{-3}$	
écroulement ancien	RVI	$3 \cdot 10^{-3}$	20	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$
	RVII	$5 \cdot 10^{-4}$	20	$2,5 \cdot 10^{-5}$	

Tableau V.4 : Comparaison des conductivités hydrauliques de la nappe alluviale et de l'écroulement ancien estimées grâce aux essais par pompage et des mêmes conductivités attribuées au modèle

Les conductivités hydrauliques définies par cette calibration restent identiques dans toutes les simulations réalisées par la suite.

1.3. Résultats

Cette approche permet de reproduire les conditions de charge observée sur le terrain (figure V.10 et tableau V.3). La présence de la zone décomprimée crée des écoulements superficiels le long des versants. Les pertes ne participent pas ou peu à l'alimentation du système profond. Seules les infiltrations sur les points hauts des deux versants alimentent le circuit profond après avoir circulé dans la zone décomprimée. Les eaux rejoignant le forage Natacha proviennent aussi bien de la rive gauche que de la rive droite. Une légère dissymétrie des écoulements souterrains existe entre les deux versants due au fait que le flux entrant est moins important en rive droite qu'en rive gauche. Ces eaux ont circulé à des profondeurs et avec des temps de transfert variables (tableau V.3 et figure V.10). Les âges ^{14}C des eaux du forage Natacha correspondent donc vraisemblablement à des valeurs moyennes du mélange ainsi obtenu. Ceci expliquerait la différence entre les deux valeurs de ^{14}C obtenues en 1999 et 2006 (cf. chapitre IV, §IV.1.3.2).

Dans ce modèle, les flux superficiels représentent 90% des écoulements souterrains (70% en rive droite et 20% en rive gauche) et les flux profonds ascendants ne représentent que 10% (soit environ $65 \text{m}^3/\text{h}$).

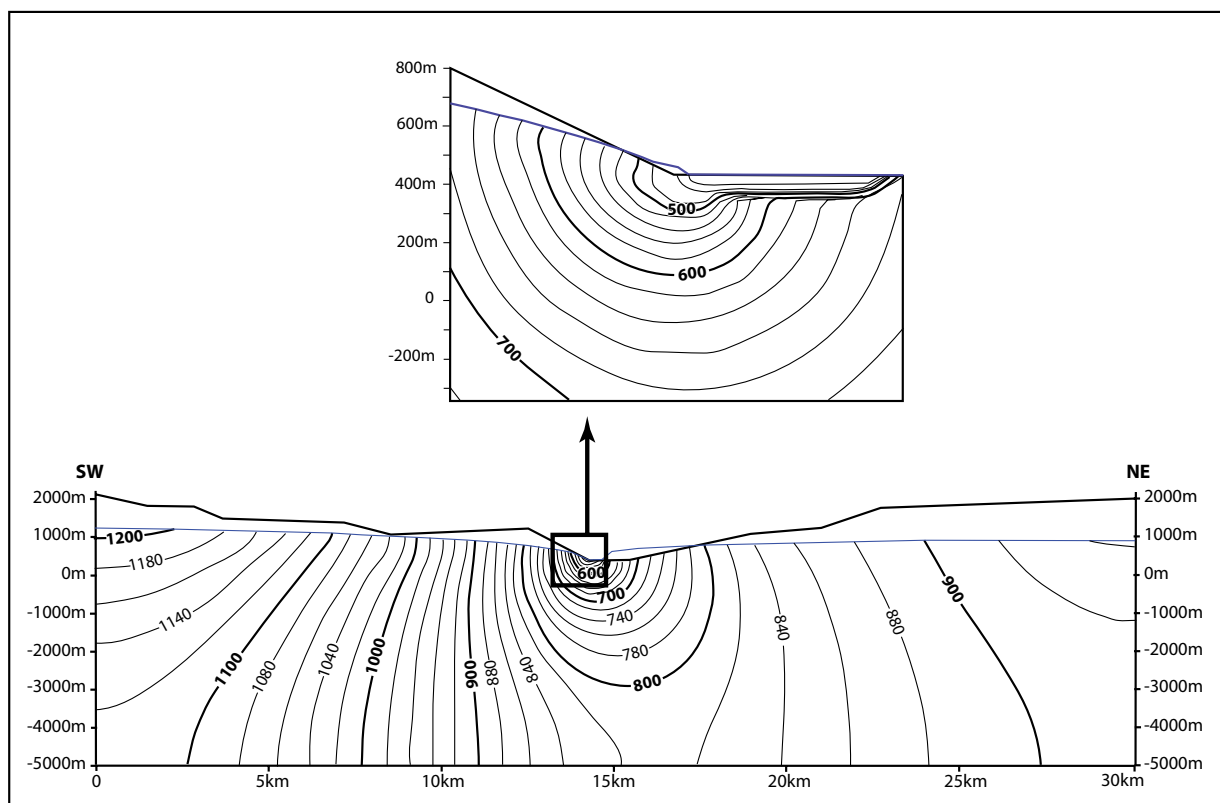


Figure V.11 : Résultats de la simulation hydrodynamique en absence du forage Natacha et de la galerie EDF : répartition des charges dans le massif

IV. La modélisation thermique

1. La démarche adoptée

Afin de modéliser de façon couplée les aspects hydrodynamique et thermique du site de la Léchère, nous avons suivi une démarche, comparable à celle de Maréchal *et al.* (1999), qui consiste à prendre en compte les modifications des écoulements et des températures liées à la fin de la dernière glaciation. Elle comporte les trois étapes suivantes :

- mise en place du gradient géothermique durant la période glaciaire (simulation 1)

Pour cette première simulation thermique, nous considérons que la dernière période glaciaire du Würm (-70000 à -10000 ans BP) bloque les écoulements et permet d'instaurer, au sein des massifs, un gradient géothermique non perturbé par les circulations d'eau.

- perturbation du gradient géothermique par les circulations d'eau (simulation 2)

Pour cette deuxième simulation thermique, les circulations d'eau sont réactivées à la fin de la dernière glaciation (entre -20000 et -10000 ans BP) et perturbent le gradient thermique établi précédemment. Nous considérons que les conditions hydrodynamiques, définies en régime permanent sans les aménagements (cf. chapitre IV, § III.2), ont perduré depuis la fin de la période glaciaire.

- impacts simulés des ouvrages présents au niveau du site thermal (simulation 3)

Cette dernière simulation rend compte des impacts successifs des forages thermaux anciens réalisés dans les années 1900, puis de la galerie EDF dans les années 1950 et enfin du forage profond Natacha en 1998.

Afin de déterminer la valeur du flux géothermique régional, un modèle de la galerie Isère-Arc, dans laquelle ont été relevées les températures du rocher au moment du creusement (figure II.4), a été réalisé avec le logiciel FEFLOW®. Les températures observées ont pu être simulées avec un flux géothermique compris entre 85 et 95 mW/m². Ce résultat est conforme au flux géothermique régional considéré comme supérieur à 80mW/m² par Lucazeau et Vasseur (1988). Nous retenons donc une valeur de 90mW/m² (soit un flux entrant de -7776 J/m²/jr) pour l'ensemble des simulations thermiques réalisées par la suite.

2. Mise en place du gradient géothermique durant la période glaciaire (simulation 1)

Nous considérons que, lors de la dernière période glaciaire, l'absence de circulation d'eau a permis à un gradient géothermique de se mettre en place. Cette simulation est faite en régime permanent aussi bien du point de vue hydrodynamique que thermique.

2.1. Conditions aux limites

Du point de vue thermique, les conditions aux limites sont représentées uniquement par la température en surface et le flux géothermique entrant à la base du modèle (figure V.12). Pendant la période de glaciation, la température en surface est considérée comme égale à 0°C. Le flux géothermique, estimé à -7776 J/m²/jr précédemment, est affecté à la base du modèle.

Du point de vue hydrodynamique, toutes les conditions aux limites sont supprimées : aucun flux d'eau n'entre ni ne sort du modèle. L'état de charge est fixé à l'altitude de la vallée (435m).

2.2. Paramètres du modèle

Les paramètres thermiques choisis pour le modèle sont reportés en figure V.12. Les valeurs de conductivité et de capacité thermiques du fluide sont celles de l'eau pure. La conductivité thermique du solide est maintenue à sa valeur par défaut de 3 J/m/s/K correspondant à une valeur moyenne des roches constituant la croûte terrestre. La capacité thermique du solide est fixée à 1,9.10⁶ J/m³/K, correspondant à la valeur de la capacité thermique du gypse+anhydrite (Waples et Waples, 2004). Les mêmes paramètres thermiques seront affectés aux simulations thermiques suivantes.

2.3. Résultats

On obtient ainsi le gradient géothermique non perturbé par les circulations d'eau (figure V.12). Comme le volume à chauffer est moins important, le gradient est plus élevé dans la vallée (0,038°C/m) qu'au niveau des sommets (0,031°C/m). Cette répartition de la température dans le modèle constitue l'état initial de la simulation 2.

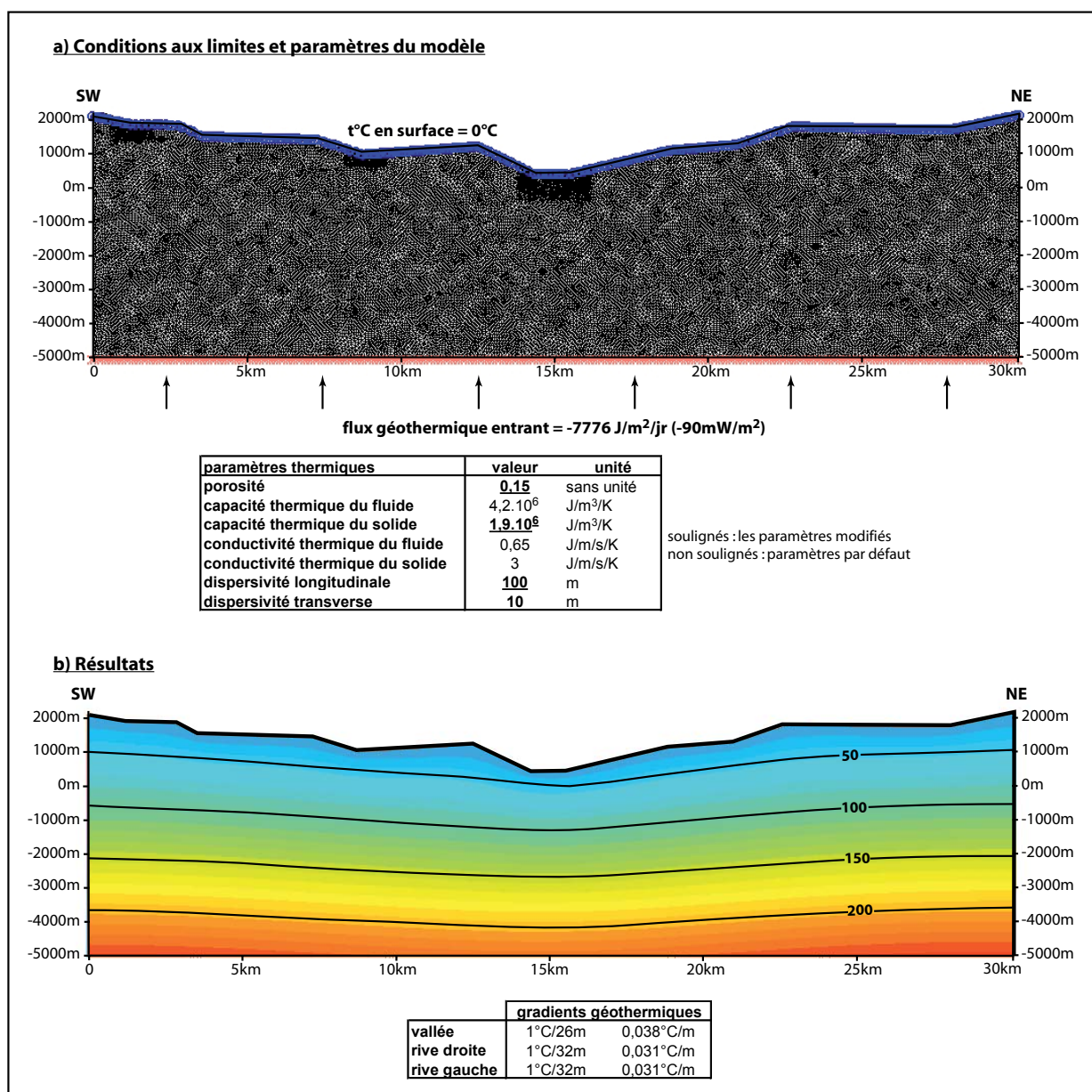


Figure V.12 : Simulation thermique 1 : mise en place du gradient géothermique

a) Conditions aux limites et paramètres du modèle

b) Résultats : répartition de la température dans le massif sans écoulement d'eau et gradients géothermiques non perturbés

3. Perturbation du gradient géothermique par les circulations d'eau (simulation 2)

La fin de la dernière glaciation (entre -10000 et -20000 ans BP) correspond au temps $t=0$ de cette deuxième simulation. Nous faisons alors l'hypothèse que les conditions hydrodynamiques, définies en régime permanent sans les aménagements (cf. chapitre IV, § III.2), ont perduré depuis ce temps $t=0$. Ces circulations d'eau perturbent le gradient géothermique établi durant la période glaciaire. Cette deuxième simulation est faite en régime permanent du point de vue hydrodynamique et en régime transitoire du point de vue thermique.

3.1. Conditions aux limites

Du point de vue thermique, le flux géothermique imposé à la base du modèle est toujours de $-7776 \text{ J/m}^2/\text{jr}$. En surface, les températures atmosphériques moyennes annuelles sont appliquées à chaque tranche d'altitude (900-1300m / 1300-1700m / 1700-2100m) (figure V.13). L'hypothèse est faite que la température de surface reste constante depuis la fin de la dernière glaciation jusqu'à aujourd'hui.

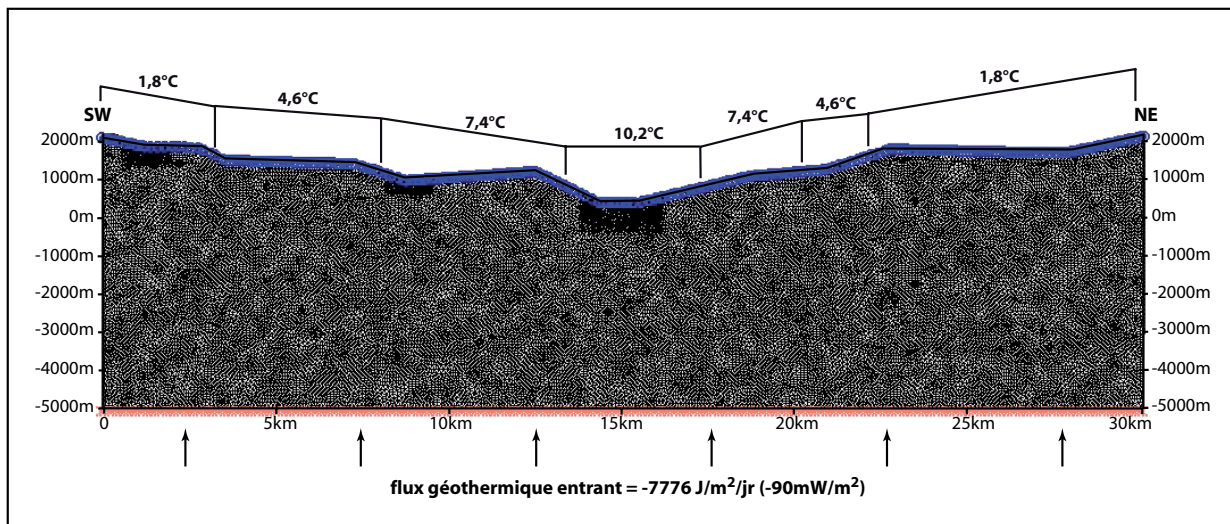


Figure V.13 : Conditions aux limites de la simulation thermique 2 : perturbation du gradient géothermique par les circulations d'eau

3.2. Résultats

Afin de visualiser l'évolution des températures, des "points d'observation" ont été placés au niveau des futurs équipements (galerie EDF, forages RVII et Natacha), bien que dans cette simulation, ils n'existent pas encore.

La simulation est effectuée sur 50000 ans. On considère que la situation actuelle est atteinte lorsque les températures calculées correspondent aux températures observées (tableau V.5 et figure V.14). La situation actuelle est atteinte 11500 ans après la fin de la dernière glaciation, ce qui correspond bien à l'ordre de grandeur attendu (entre -10000 et -20000 ans BP).

La réactivation des circulations d'eau mène au refroidissement des versants et à la "chasse" des eaux chaudes vers la vallée. Au bout de 50000 ans, l'ensemble du modèle est refroidi car le flux géothermique n'est pas suffisant pour réchauffer la masse d'eau entrant dans le modèle.

température en °C		
points d'observation	observée	simulée
galerie EDF	10	7
source RF	10	10
Natacha	62	70
écroulement	50	45
perte 1	<u>4,6</u>	<u>4,6</u>
perte 2	<u>7,4</u>	<u>7,4</u>

Tableau V.5 : Comparaison des températures réelles et des températures simulées soulignées : conditions imposées, non soulignées : conditions à simuler

Dans la vallée, l'évolution du gradient géothermique est enregistrée au cours de cette simulation (figure V.15). Au bout de 3500 ans, le gradient est très fort sur les 500 premiers mètres puis faible en profondeur. Cette période correspond au maximum de la "chasse" d'eau chaude. Au bout de 11500 ans, les

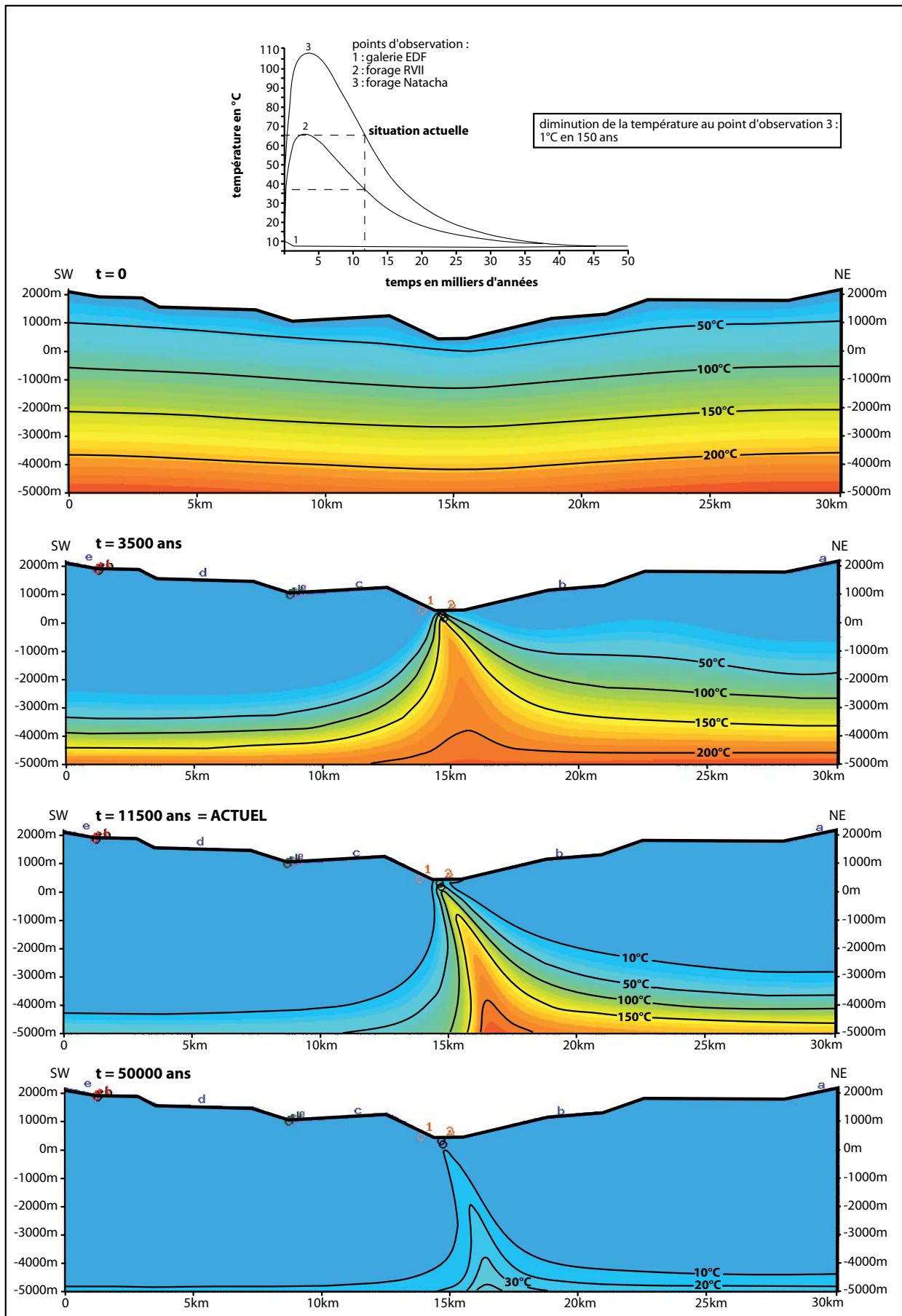


Figure V.14 : Résultats de la simulation thermique 2 : perturbation du gradient géothermique par les circulations d'eau

eaux chassées sont moins chaudes et le gradient géothermique se rapproche du gradient sans circulation d'eau. Au bout de 50000 ans, l'ensemble du modèle est refroidi et le gradient est presque nul.

Actuellement, on se trouve donc dans un état transitoire de décroissance de la température des eaux émergeant dans la vallée. Cette décroissance simulée est de 1°C en 150 ans au niveau du forage Natacha, ce qui n'est pas observable dans la réalité, à l'échelle de temps humaine.

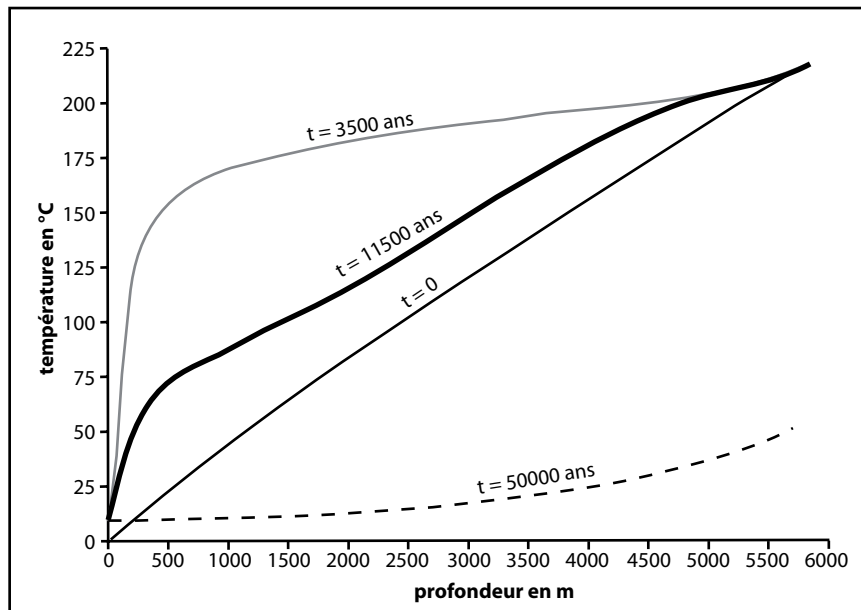


Figure V.15 : Simulation thermique 2 : évolution simulée du gradient géothermique au niveau de la vallée après la fin de la dernière glaciation

Il peut paraître surprenant que les versants soient complètement refroidis à l'heure actuelle. En effet, les tunnels réalisés sous les sommets rencontrent encore des températures élevées. Cependant, le modèle représente uniquement une zone de circulation intense, correspondant aux zones d'anomalies "froides" rencontrées par Maréchal (1998) dans les tunnels. En effet, celui-ci observe une diminution de 20°C entre les venues d'eau issues du massif "sain" et celles issues des zones tectonisées. En se déplaçant au NW et au SE de notre modèle, le massif doit donc conserver une température plus élevée.

L'application des formules géothermométriques a donné une température atteinte par les eaux du forage Natacha de 90°C (cf. chapitre IV, §II.1.1.3). Si l'on compare les lignes d'écoulement (figure V.10) et le champ de température actuel (figure V.14, t=11500ans), on constate que les eaux les plus profondes ont pu atteindre une température supérieure à 150°C. Cependant, ces eaux très chaudes se mélangent ensuite, au niveau du forage Natacha, avec des eaux moins profondes avec une température d'environ 50°C. Comme l'âge ^{14}C , la température calculée par les géothermomètres correspond à une valeur moyenne du mélange capté par Natacha.

4. Impacts simulés des ouvrages présents au niveau du site thermal (simulation 3)

Cette dernière simulation consiste à simuler en 3 étapes l'impact des aménagements (forages anciens, galerie EDF et forage Natacha) sur la ressource thermique. Les charges initiales sont celles de la simulation hydrodynamique réalisée en absence de tout aménagement (§III.2). Les températures initiales sont celles de la simulation thermique 2 au bout de 11500 ans.

- Etape 1

La phase d'exploitation par les premiers forages est simulée. Les conditions aux limites ainsi que les paramètres hydrodynamiques et thermiques sont les mêmes que pour la simulation thermique 2.

Une condition de charge de 437m est ajoutée au niveau du forage RVII. La simulation est réalisée en régime permanent du point de vue hydrodynamique et en régime transitoire sur 50 ans du point de vue thermique.

- Etape 2

A l'issue de l'étape 1, deux puits de prélèvement sont placés au niveau de la galerie EDF (60m³/h au total). La simulation est réalisée en régime permanent du point de vue hydrodynamique et en régime transitoire sur 50 ans du point de vue thermique.

- Etape 3

A l'issue de l'étape 2, le forage Natacha est ajouté avec une condition de charge de 437m. La simulation est réalisée en régime permanent du point de vue hydrodynamique et en régime transitoire sur 10 ans du point de vue thermique.

Les charges des deux forages sont donc fixées et le débit sortant est observé (figure V.16). L'évolution simulée de la température aux points d'observation RVII et Natacha est comparée à l'évolution simulée de la température en absence de tous ces équipements (figure V.16).

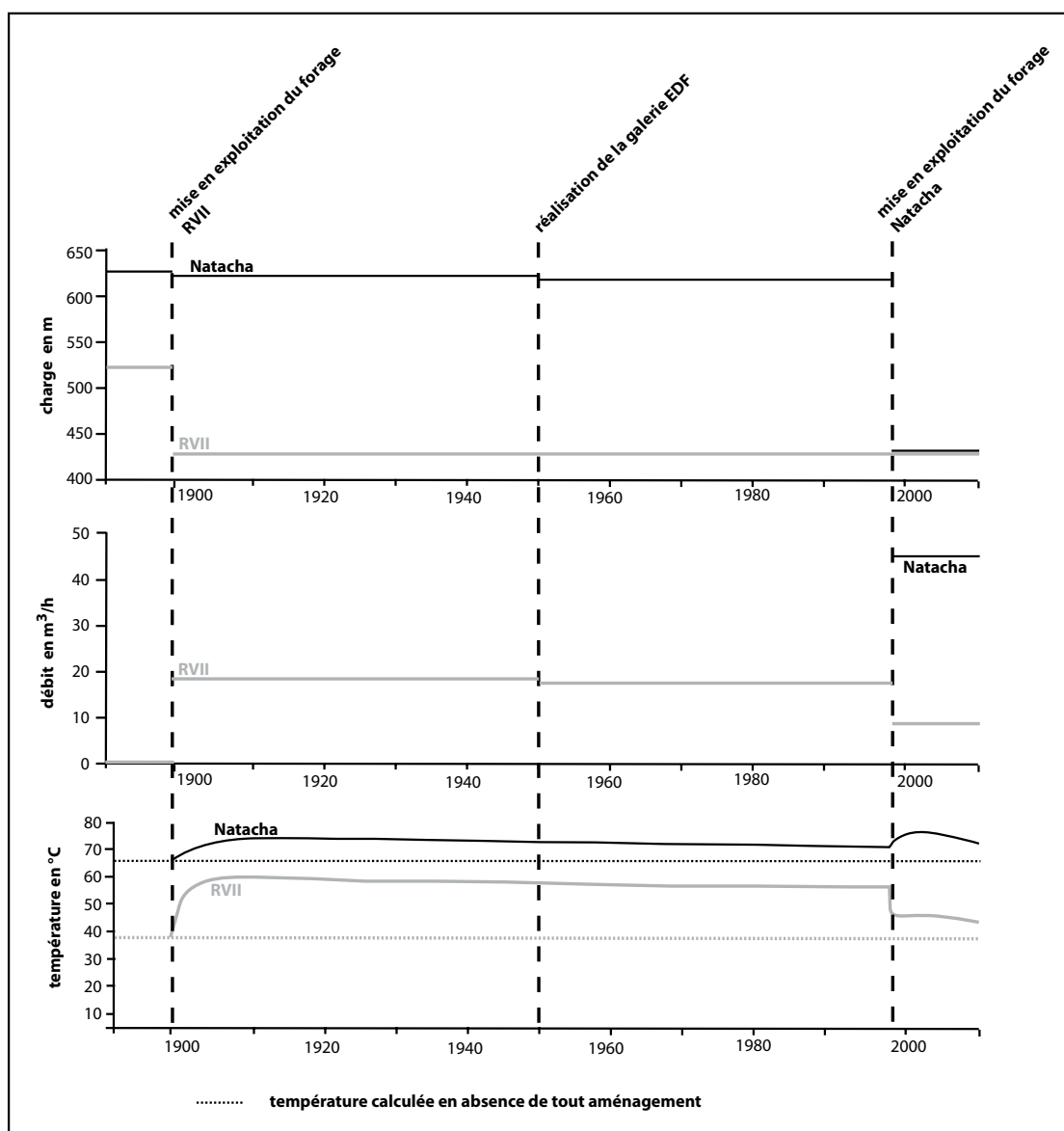


Figure V.16 : Simulation 3, impacts simulés des ouvrages présents sur le site thermal

La réalisation de la galerie EDF a très peu d'impact sur le débit de RVII et aucun impact sur les températures des deux points d'observation. En revanche, la mise en exploitation du forage Natacha provoque une nette diminution du débit et de la température de RVII. Dans le forage Natacha lui-même, la température augmente puis diminue. Les variations de température réelles mesurés sur les forages RVII et Natacha (figures IV.24 et IV.25) ont enregistré ces tendances mais sur des échelles de temps plus courtes et avec des amplitudes moins importantes. La simulation décrit les phénomènes de manière qualitative mais les simplifications de la structure géologique (passage du 3D à la 2D, manque de précision dans la zone d'émergence, ...) ne permettent pas d'obtenir des valeurs absolues identiques à celles observées. Ainsi, la simulation, réalisée sur plusieurs milliers d'années en présence des équipements, montre que l'exploitation de la ressource accélère le processus de refroidissement sans que l'importance de cette accélération ne puisse être quantifiée.

V. Conclusion

Un modèle conceptuel est construit à partir des informations issues des chapitres précédents. Ce modèle suppose un fonctionnement impliquant les deux versants, avec des circulations superficielles dans la zone décomprimée et des circulations profondes dans la zone comprimée. Dans la zone d'émergence, la présence d'une couche imperméable, recoupée par un écroulement ancien, conditionne l'artésianisme de l'aquifère thermal. La modélisation numérique du système de la Léchère a permis de vérifier que ce modèle conceptuel permet d'obtenir une bonne simulation de l'état de charge et des temps de transfert. Il reste également cohérent lors de la phase de modélisation couplée hydrodynamique / thermique. Le modèle conceptuel est donc validé numériquement.

Cette modélisation a également permis d'amener des éléments supplémentaires dans la compréhension du fonctionnement du système. En effet, les pertes ne participent pas ou peu à l'alimentation du circuit profond. Celui-ci est alimenté uniquement par les eaux infiltrées sur les points les plus hauts. L'eau thermale de la Léchère résulte d'un mélange d'eaux issues des deux versants, circulant à différentes profondeurs et avec des temps de transfert variables, mais de plusieurs milliers d'années.

Du point de vue thermique, la simulation rend compte de l'importance des périodes glaciaires dans la mise en place de systèmes thermaux de montagne. En effet, dans la situation actuelle, le système est en pleine évolution thermique. La dernière glaciation a permis à un gradient, non perturbé par les circulations d'eau, de se mettre en place. A la fin de cette glaciation, les circulations d'eau refroidissent les versants et poussent les eaux chaudes vers la vallée. Après avoir atteint un maximum de température au bout de 3500 ans, les eaux profondes de la zone d'émergence thermale se refroidissent. A l'heure actuelle (11500 ans après la fin de la glaciation), nous nous situons au cœur de cette diminution de température dans la zone d'émergence. Bien que les hypothèses climatiques soient simplifiées (températures et infiltration constantes dans le temps), le système est destiné à se refroidir encore, jusqu'à atteindre, au bout de 50000 ans, un régime permanent correspondant au refroidissement total de l'aquifère thermal. Cette simulation permet de décrire de manière qualitative l'évolution thermique du système, depuis sa mise en place jusqu'à sa disparition. La mise en exploitation de la ressource thermale accélère ce processus naturel de refroidissement. Cependant, l'importance de cet impact ne peut être quantifiée par ce modèle.

Chapitre VI : Conclusion générale

Le chapitre VI synthétise l'ensemble des éléments apportés par cette étude et propose des réponses aux questions des acteurs de l'exploitation de la ressource, évoquées dans la partie introductive.

Ces questions concernent non seulement des aspects pratiques :

- Quel est le degré de vulnérabilité du système thermal ?
- Quelles en sont les conséquences pour la gestion et l'exploitation de la ressource ?
- Et plus particulièrement, peut-on implanter un forage d'exploitation de secours et à quel endroit ?

...mais également des aspects fondamentaux plus généraux, nécessaires à la communication envers les curistes et la population locale et qui peuvent se résumer ainsi :

- Pourquoi une ressource thermique de cette nature existe-t-elle à la Léchère, quelle est son origine, quel est son parcours et comment émerge-t-elle ?

Chapitre VI : Conclusion générale

Dans un premier temps, les informations acquises sur le fonctionnement du système d'écoulement versants/vallée du secteur de la Léchère sont synthétisées. A la lumière de ces apports à la connaissance du système thermal, la vulnérabilité de la zone d'émergence est évaluée et des préconisations sont faites pour l'éventuelle implantation d'un forage de secours. Pour finir, des perspectives de recherche sont proposées pour poursuivre la compréhension des écoulements de versants, marqués par des contacts tectoniques.

I. Synthèse

Grâce aux éléments acquis par les études géologiques, hydrodynamiques, hydrogéochimiques et enfin par la modélisation couplée hydrodynamique / thermique, un schéma global de fonctionnement du système d'écoulement versants/vallée est proposé (figure VI.1). Ce schéma global répond aux objectifs fixés au début de ce manuscrit, qui étaient d'amener des éléments de précisions sur :

- l'alimentation : définition des possibilités d'alimentation et évaluation quantitative de la recharge ;
- le parcours : définition des échanges fluides-roches ainsi que du comportement hydrodynamique et thermique ;
- l'émergence : définition de la structure 3D du remplissage quaternaire, des conditions de mélange et des relations hydrodynamiques entre les aquifères.

Le fonctionnement du système est décrit, ci-dessous, depuis l'alimentation jusqu'à l'émergence en passant par le parcours souterrain, en intégrant aussi bien les eaux profondes que les eaux superficielles.

1. Alimentation

Les écoulements, émergeant au niveau de la Léchère, sont alimentés par les deux versants encadrant l'Isère : le versant de Celliers en rive gauche et celui de Naves en rive droite. Ces deux versants sont affectés par un contact tectonique perpendiculaire à l'Isère et penté vers le SE. Ce contact est souligné par des dépôts triasiques (dolomies, cargneules, gypses et anhydrites). A l'Ouest de ce contact, affleurent des micaschistes, tandis qu'à l'Est, la couverture delphino-helvétique est essentiellement carbonatée et marneuse. L'alimentation du système se fait de manière diffuse mais aussi ponctuelle. L'alimentation diffuse se fait par l'infiltration sur les bassins versants de l'Eau Rousse et du Grand Nant de Naves. La présence de dépôts fins glacio-lacustres imperméabilisent le bassin versant du Grand Nant de Naves entre Naves et Ronchat. L'alimentation ponctuelle se fait par les pertes identifiées, en rive gauche, sur le Ruisseau de la Rave à l'Homme de Beurre (perte 1) et sur le Colomban au Crozat (perte 2) (figure VI.1a). Ces pertes ne participent qu'à l'alimentation du système superficiel et le circuit profond est alimenté par les points les plus hauts des versants (figure VI.1b). Globalement, les pluies efficaces sont légèrement plus importantes en rive gauche qu'en rive droite et le débit artésien du forage Natacha (45m³/h) ne représente que quelques % du volume de pluie efficace intercepté par les deux bassins versants.

L'altitude moyenne de l'aire d'alimentation des circulations superficielles serait comprise entre 1100 et 1500m. Les eaux profondes se seraient infiltrées entre 1400 et 1600m, en considérant que les conditions climatiques au moment de leur infiltration étaient comparables aux conditions actuelles.

2. Parcours souterrain

Les micaschistes de Feissons-sur-Isère (MFI) présentent un réseau de fractures dense, orientées aussi bien SW-NE que NW-SE et associé à la présence de veines alpines verticales et horizontales. Quant aux schistes et carbonates de la couverture sédimentaire delphino-helvétique, ils constituent une barrière semi-imperméable du fait de la faible intensité du réseau de fractures. Les eaux bicarbonatées calciques (Ca-HCO_3), circulant dans les MFI et en moindre proportion dans les carbonates (faciès 1 et 2 sur la figure VI.1), sont drainées vers les contacts tectoniques, entre le socle et la couverture sédimentaire delphino-helvétique.

Une fois drainées vers ces accidents, les eaux circulent, en direction de la vallée de l'Isère, au niveau de la zone broyée des MFI et du contact tectonique constitué de dolomies, cargneules, gypses mais aussi de halites en profondeur. Les évaporites du Trias servent de niveau de décollement des grands chevauchements alpins et les jalonnent sous forme d'écailles discontinues. De ce fait, la géométrie du contact tectonique est très variable latéralement et en profondeur. Les dolomies, cargneules, gypses et halites ne sont donc pas toujours présents le long de l'accident de la Léchère. De plus, cet accident n'est pas unique mais il se divise en plusieurs accidents secondaires, limitant les différentes écailles du secteur. Tous ces accidents sont affectés par des plissements complexes.

Au sein de ce contact, on observe des circulations profondes émergeant à la Léchère mais aussi des circulations superficielles dans la zone décomprimée (faciès 6 et 5 de la figure VI.1). Le modèle hydrodynamique a été calibré avec une épaisseur de zone décomprimée de 600m sur les sommets, cohérente avec les modèles géologiques des versants montagneux préexistants. En revanche, le modèle ne fonctionne qu'en l'absence de la zone décomprimée dans la vallée. Au début de leur parcours, les eaux circulent toutes dans cette zone décomprimée mais les eaux infiltrées sur les points les plus hauts rejoignent ensuite le circuit profond où elles acquièrent leurs caractéristiques thermo-minérales (figure VI.1b).

Les données physico-chimiques ont permis de définir les phénomènes responsables de la différenciation minérale des eaux profondes par rapport aux eaux superficielles.

Les Eaux Triasiques Superficielles (faciès 5 de la figure VI.1), majoritairement en contact avec des dolomies, gypses et cargneules, acquièrent un faciès sulfaté calcique et magnésien enrichi par les éléments HCO_3 , Sr, B, Br et Mn mais aussi par le Ba, seul élément marqueur du drainage antérieur dans les MFI. Le temps de séjour des ETS est estimé à quelques années.

Du fait de la discontinuité des écailles évaporitiques jalonnant le contact tectonique, en profondeur, la halite est présente et les dolomies sont plus rares. De même, la circulation à grande profondeur met en contact les eaux thermales avec les roches permo-carbonifères contenant de la matière organique et avec les gneiss et granites à forte concentration en Th et U. D'après les calculs géothermométriques, les eaux thermales atteignent une température de 90°C, facilitant les échanges cationiques entre Ca et Na sur les argiles d'altération des MFI broyés. Ainsi les eaux thermales se différencient des ETS par une concentration plus faible en HCO_3 et Mg mais par de plus fortes concentrations en Na, Cl, NH_4 , CH_4 , Si, K et Rn. De plus, les échanges de l'eau thermale avec la matière organique des roches permo-carbonifères rendent possible la réduction bactérienne des sulfates en sulfures.

Les eaux thermales présentes au niveau de la vallée de l'Isère résultent d'un mélange d'eaux issues des deux versants, circulant à des profondeurs variables et avec des temps de transit estimés à plusieurs milliers d'années. Du fait de la circulation des eaux par la porosité de fractures, le système thermal présente des variations de niveau piézométrique très faibles. Les temps de réponse aux signaux d'entrée sont de l'ordre d'une dizaine de jours.

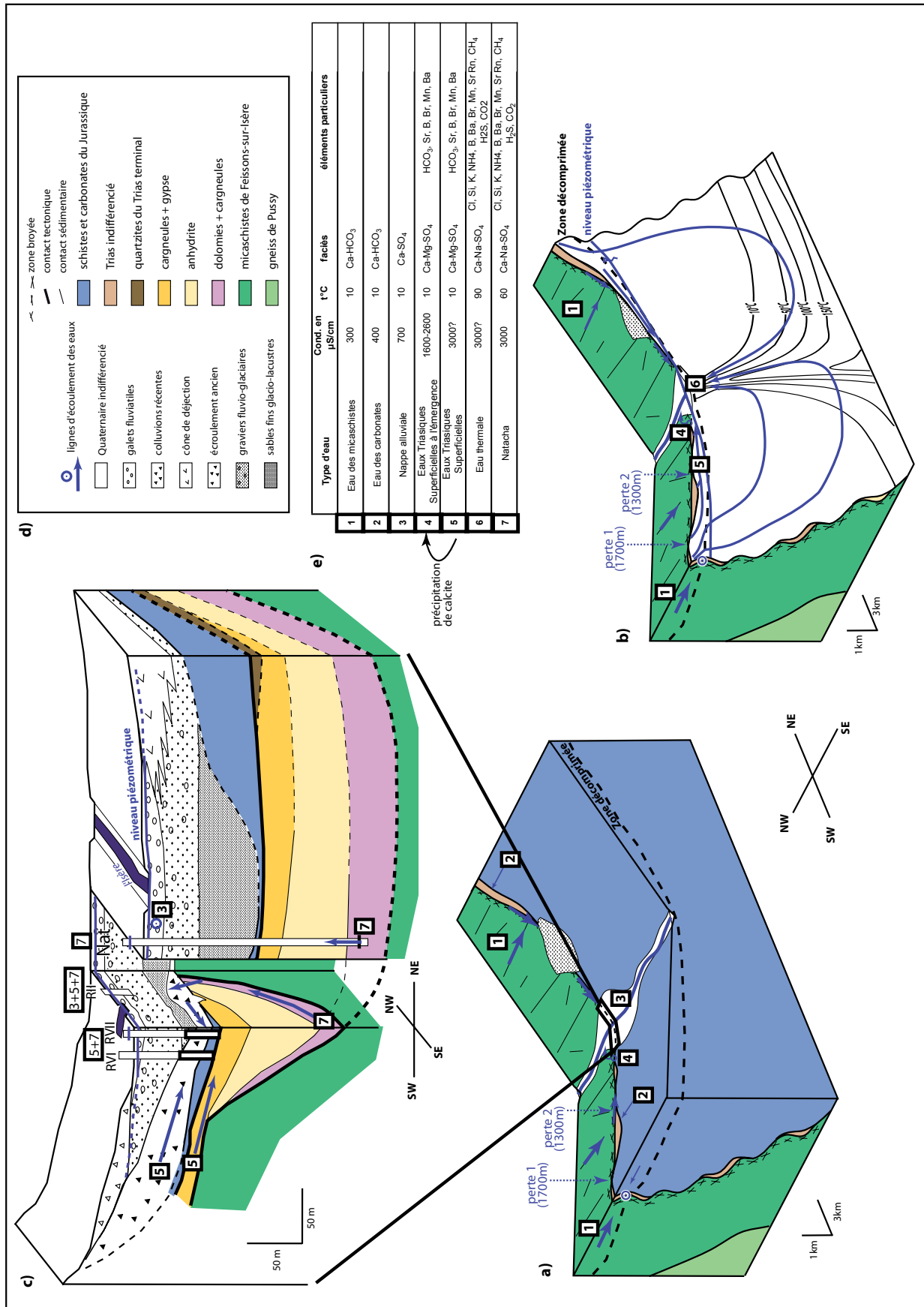


Figure VI.1 : Schéma global du fonctionnement du système d'écoulement versants/vallée dans le secteur de la Léchère
 a) Bloc diagramme de la structure géologique générale et localisation des faciès des eaux superficielles, b) Ecoulements superficiels et profonds ayant lieu au niveau de l'accident tectonique de la Léchère et isothermes calculés lors de la phase de modélisation couplée hydrodynamique/thermique, c) Bloc diagramme de la structure géologique de la zone d'émergence, mélanges des différents faciès d'eau présents et relations hydrodynamiques entre les trois aquifères présents (écroulement ancien, aquifère thermal profond et nappe alluviale), d) Légende des blocs diagrammes a, b et c, e) Définition des différents faciès d'eau du secteur

D'après la modélisation couplée hydrodynamique / thermique, dans la situation actuelle, le système est en pleine évolution thermique. En effet, la dernière période glaciaire a permis à un gradient, non perturbé par les circulations d'eau, de se mettre en place. A la fin de cette glaciation, les circulations d'eau, plus intenses au niveau du contact tectonique que dans le reste du massif, refroidissent les versants et poussent les eaux chaudes vers la vallée. Après avoir atteint un maximum de température au bout de 3500 ans, les eaux profondes de la zone d'émergence se refroidissent.

A l'heure actuelle, nous nous situons au coeur de cette diminution de la température dans la zone d'émergence. Au sein du contact tectonique, les versants sont complètement refroidis et seul un dôme thermique est présent sous la vallée (figure VI.1b). Chassées par la réactivation des circulations, les eaux chaudes se regroupent sous la vallée, juste avant leur remontée en surface.

Le système est destiné à se refroidir encore, jusqu'à atteindre la disparition de la ressource thermique au bout de plusieurs dizaines de milliers d'années.

3. Emergence

Dans la zone d'émergence, la réinterprétation des données de forage a permis de définir la structure du remplissage quaternaire. Le modèle ainsi défini a été conforté par les données hydrodynamiques et hydrogéochimiques (figure VI.1c).

Lorsque les eaux thermales atteignent la vallée de l'Isère, elles remontent en surface, du SE vers le NW, par l'intermédiaire de l'accident de la Léchère. Elles se diffusent alors dans l'ombilic glaciaire constitué de bas en haut par (i) des sables fins glacio-lacustres imperméables, recoupés en rive gauche par un écroulement ancien, scellé par les dépôts sus-jacents, puis (ii) par des graviers fluvio-glaciaires de plus en plus grossiers et enfin (iii) par les galets déposés par l'Isère. En rive droite, un cône de déjection est présent. Les eaux thermales franchissent la barrière semi-imperméable des dépôts glacio-lacustres grâce à la présence de l'écroulement ancien.

Dans la zone d'émergence, trois aquifères sont présents : l'aquifère thermal profond, l'écroulement ancien et la nappe alluviale, constituée par les dépôts fluvio-glaciaires et les alluvions récentes de l'Isère. Au niveau du forage Natacha, l'aquifère thermal est captif sous une épaisseur de 60m d'anhydrite surmontée par les dépôts glacio-lacustres. L'écroulement ancien est captif lorsqu'il est surmonté par les dépôts glacio-lacustres imperméables et libre lorsqu'il est directement en contact avec les dépôts grossiers. Ainsi, du point de vue hydrodynamique, deux aquifères sont définis : (i) la nappe alluviale associée à la partie libre de l'écroulement (RII et RVI, figure VI.1c) et (ii) l'aquifère thermal associé à la partie captive de l'écroulement ancien (Natacha et RVII, figure VI.1c). L'écroulement ancien est le siège des échanges entre les deux aquifères ainsi définis. Les circulations sont ascendantes depuis l'aquifère thermal profond vers l'écroulement puis la nappe alluviale. Tant que le forage Natacha présentera un niveau piézométrique supérieur à celui de l'aquifère supérieur, aucun flux descendant ne sera possible entre l'écroulement et l'aquifère thermal profond.

De même, le remplissage quaternaire de l'ombilic est le siège du mélange de trois faciès d'eau : l'eau thermique (faciès 7), les ETS avant qu'elles n'émergent et ne précipitent de la calcite (faciès 5) et les eaux de la nappe alluviale (faciès 3). L'écroulement ancien contient un mélange, capté par les forages RVI, RVII et RX, entre les ETS et les eaux thermales (5+7). A proximité de l'écroulement, les eaux des dépôts fluvio-glaciaires et fluviatiles récents sont constituées d'un mélange entre les ETS, les eaux thermales et les eaux de la nappe alluviale (3+5+7), capté par les forages anciens (RII, RIII, RIV et RV) ainsi que les piézomètres. La formation du lac d'eau tiède, suite à l'effondrement de 1869, a mis en évidence ce mélange à trois pôles.

II. Conséquences sur l'exploitation de la ressource

1. Vulnérabilité du système

Comme les eaux thermales ont des temps de séjour de l'ordre de plusieurs milliers d'années, la vulnérabilité du système profond ne réside pas au niveau de son aire d'alimentation. Seule la zone d'émergence est soumise à une forte vulnérabilité, due aux phénomènes de mélange entre les eaux superficielles et les eaux thermales.

Dans la zone d'émergence, on distingue deux aquifères présentant des vulnérabilités distinctes : d'une part, l'aquifère superficiel, constitué par des dépôts fluviatils (s.l.) et l'écroulement ancien et, d'autre part, l'aquifère thermal profond.

Le remplissage quaternaire, comme tous les aquifères superficiels, présente une vulnérabilité qualitative importante face au risque de contamination bactériologique. Le vecteur de la contamination peut être soit l'Isère et sa nappe d'accompagnement, soit les ETS provenant des versants. Le mélange de ces eaux superficielles avec les eaux thermales permet d'atteindre une température d'environ 40°C, idéale pour la prolifération des légionnelles. Vue l'étendue du bassin versant de l'Isère et de l'aire d'alimentation du système superficiel, il n'est pas envisageable d'établir de mesure de protection de cet aquifère superficiel. **Aucun forage d'exploitation thermique ne devra être réalisé dans l'écroulement, les dépôts fluvio-glaciaires et les alluvions récentes de l'Isère.**

L'exploitation thermique rend l'aquifère thermal profond vulnérable face à trois risques intimement liés : l'altération de la quantité d'eau thermique, la dégradation de ses caractéristiques physico-chimiques et le mélange avec des eaux de l'aquifère superficiel (figure VI.2).

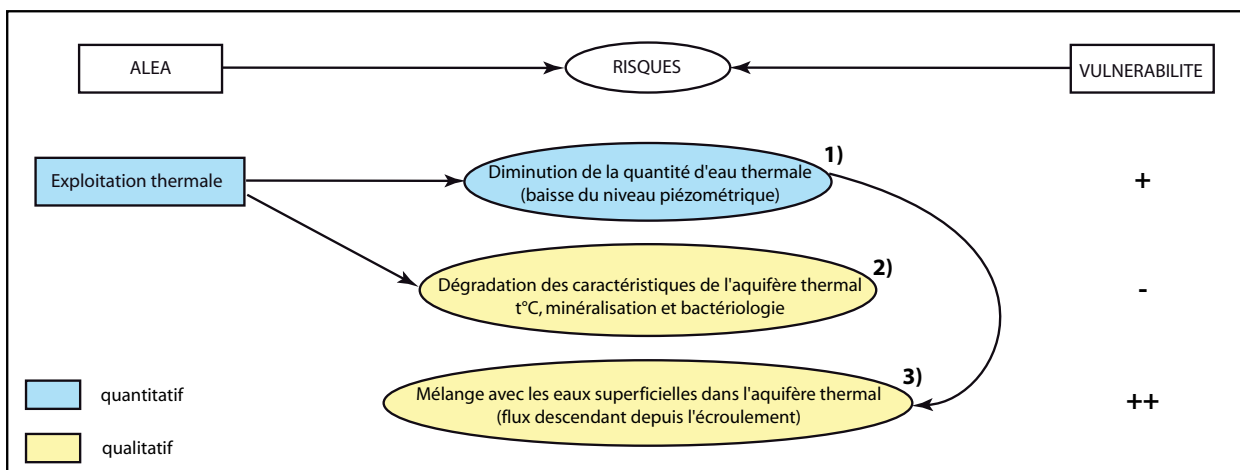


Figure VI.2 : Définition du risque de dégradation de l'aquifère thermal profond

1) Depuis sa mise en exploitation, le niveau piézométrique du forage Natacha diminue progressivement d'environ 10cm par an. Le système présente donc une vulnérabilité face à ce risque de dégradation de la quantité d'eau thermique. Il ne peut être prédit si cette diminution va se poursuivre avec la même amplitude ou si le niveau va tendre à se stabiliser.

2) Le système est également vulnérable face au risque de modification des caractéristiques physico-chimiques en réponse à l'exploitation. Même si le suivi de la minéralisation du forage Natacha, effectué depuis 1998, ne montre pas de modification significative, la vulnérabilité face à une dégradation de la minéralisation ne peut pas être évaluée pour le long terme. En revanche, à l'échelle d'observation, les températures restent relativement constantes mais, d'après les résultats de la modélisation numérique, l'exploitation accélère le refroidissement naturel de l'aquifère thermal, sans que l'importance de cet impact

A l'issue de la définition de la vulnérabilité de l'aquifère thermal, il apparaît qu'un forage de secours, captant l'aquifère profond, ne peut être réalisé que dans certaines conditions. En effet, l'ouverture de deux forages profonds en même temps provoquerait une diminution du niveau piézométrique de l'aquifère thermal et ceci risquerait d'enfreindre l'impératif fixé précédemment. La solution est donc de laisser un des forages fermé lorsque l'autre est ouvert. Cependant, lors de sa mise en exploitation, les paramètres physico-chimiques du forage Natacha ont mis presque une année pour se stabiliser. Ceci implique que l'éventuel forage de secours ne pourra être utilisé qu'après une phase de stabilisation de la minéralisation et de la température.

Maintenant que les conditions de réalisation d'un forage de secours sont posées, il convient de définir à quel endroit il serait le plus judicieux de l'implanter. Ce forage ne doit en aucun cas être implanté au NNW du contact tectonique entre le socle et le Trias, localisé entre les forages RVI et RIX (figure VI.3). De plus, la remontée des eaux thermales est très localisée et se trouve uniquement dans la partie la plus basse de la vallée. Si l'on s'écarte de la zone de captage actuelle vers l'WSW, les eaux captées sont des eaux triasiques superficielles froides (RVIII, figure VI.3). Il en sera de même si l'on s'écarte vers l'ENE sans que puisse être précisé à partir de quel point l'eau thermale n'est plus présente. Si l'on s'éloigne vers le SSE, l'aquifère thermal se situera à une profondeur plus importante que dans le forage Natacha (200m) et présentera certainement une température et un artésianisme plus importants. **L'implantation d'un nouveau forage doit donc nécessairement rester à proximité de la zone de captage actuelle.**

3. Reconnaissances géologiques

La structure du remplissage quaternaire de l'ombilic glaciaire a été définie à partir des descriptions de qualité médiocre des forages. Bien que le modèle géologique ait été conforté par les données hydrodynamiques et hydrogéochimiques, il semble nécessaire de préciser l'extension (figure VI.3) et la nature de l'écoulement ancien. S'il est encore présent au niveau du forage RII, il devrait se situer entre 50 et 70m de profondeur. Autour de RVIII, on devrait le trouver entre 30 et 60m.

Un sondage de reconnaissance en rive droite de l'Isère permettrait de délimiter la zone du griffon thermal.

III. Perspectives de recherche

Les perspectives de ce travail regroupent tous les éléments qui permettraient d'améliorer la modélisation couplée hydrodynamique / thermique du système de la Léchère. Ce système est un exemple des systèmes d'écoulement, profonds et superficiels, associés aux intersections entre les grands accidents tectoniques et les vallées alpines. La cohérence entre les résultats de la modélisation hydrodynamique / thermique et l'acquisition de la minéralisation nécessite ensuite d'être vérifiée.

1. Métrologie

Les mesures hydrodynamiques de la zone d'émergence (niveaux piézométriques et débits des forages RVII et Natacha, ainsi que les niveaux des piézomètres) doivent être poursuivies. Un meilleur équipement de la station de la galerie EDF (cuve réceptrice plus grande et seuil en V avec un angle plus petit) permettrait d'avoir un suivi plus fin des variations de débit et de vérifier que la galerie EDF se trouve bien en dehors de la zone décomprimée.

Ainsi, la géométrie et l'impact de la zone décomprimée sur les écoulements, profonds et superficiels, pourraient être mieux appréhendés.

2. Modélisation couplée hydrodynamique / thermique

Le modèle 2D réalisé dans ce travail est un modèle longitudinal d'une zone de circulation privilégiée recoupant une vallée. Maréchal (1998) avait, quant à lui, établi un modèle transversal recoupant une zone de forte perméabilité. Bien que la structure géologique du secteur étudié soit peu contrainte (surtout en profondeur), la réalisation d'un modèle en 3D permettrait de coupler ces deux approches.

Ainsi, les effets hydrodynamiques et thermiques des massifs sur l'accident tectonique qu'ils encadrent pourront être intégrés. En effet, le modèle 2D réalisé fait l'approximation que toutes les eaux entrent par la surface alors que, dans la réalité, l'eau s'infiltrerait d'abord dans les MFI et carbonates pour ensuite être drainée vers le contact tectonique. De même, les massifs encadrant l'accident restent probablement plus chauds que la zone de circulation privilégiée qui constitue le contact tectonique. Réciproquement, l'impact de la zone de forte perméabilité sur les écoulements et les flux de chaleur dans les massifs qui l'encadrent pourrait être évalué.

De plus, la précision apportée par ce modèle 3D sur la structure géologique et plus particulièrement dans la zone d'émergence, améliorerait l'évaluation de l'impact de l'exploitation thermique.

La modélisation en régime hydrodynamique transitoire permettrait de vérifier l'hypothèse des vidanges rapides dans la zone décompressée et de s'assurer que le modèle conceptuel permet bien de reproduire les variations tamponnées de l'aquifère thermal profond.

3. Modélisation géochimique

Les échanges fluides-roches ont été définis de manière qualitative à partir des données hydrogéochimiques. La prise en compte de l'évolution de la température et de la nature des roches encaissantes permettrait de simuler l'évolution chimique des eaux superficielles vers le faciès des eaux thermales (logiciel EQ3/EQ6, par exemple). Une telle simulation permettrait de valider le modèle d'interaction fluides-roches mais aussi la cohérence de l'estimation des temps de séjour. Dans un deuxième temps, il faudrait prendre en compte que les eaux thermales résultent d'un mélange entre des eaux circulant à des profondeurs et avec des temps de séjour variables.

De plus, comme l'aquifère thermal est destiné à se refroidir, l'impact de la diminution de la température des eaux sur leur minéralisation pourrait aussi être évalué.

Bibliographie

A

- Achard, D. (1972).** *Note sur les résultats obtenus par la méthode électrique dans la délimitation d'une lame mince de Trias à Petit-Coeur (Savoie)*. Rapport BRGM n°72 MET/GPH 031, 17p.
- Agard, P. et Lemoine, M. (2003).** *Visages des Alpes : structure et évolution géodynamique*. Ed. Commission de la carte géologique du monde, Paris, 47p.
- Alfaro, C. et Wallace, M. (1994).** *Origin and classification of springs and historical review with current applications*. Environ. Geol., 24, 112-124.
- Al-Kazwini, A. T. et Hasan, M. A. (2003).** *Radon concentration in Jordanian drinking water and hot springs*. J. Radiol. Prot., 23, 439-448.
- Amat-chantoux, R. (1984).** *Recueil et présentation des études hydrogéologiques du site des sources de La Léchère-les-Bains*. Rapport BRGM n°84 AGI 385 RHA, 20p.
- André, L. (2002).** *Contribution de la géochimie à la connaissance des écoulements souterrains profonds. Application à l'aquifère des Sables Infra-Molassiques du Bassin Aquitain*. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 3, 236p.
- André, L., Franceschi, M., Pouchan, P. et Atteïa, O. (2005).** *Using geochemical data and modelling to enhance the understanding of groundwater flow in a regional deep aquifer, Aquitaine Basin, south-west of France*. J. Hydrol., 305, 40-62.
- André, L. et Vuataz, F.-D. (2005).** *Simulated evolution of reservoir properties for the enhanced geothermal system of Soultz-sous-Forêts : the role of hot brine-rock interactions*. Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California.
- Angelier, J. (1990).** *Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress-III. A new rapid direct inversion method by analytical means*. Geophys. J. Int., 363-376.
- Angelier, J. (1991).** *Inversion directe et recherche 4-D : comparaison physique et mathématique de deux modes de détermination des tenseurs des paléocontraintes en tectonique de failles*. C.R. Acad. Sci., 312, 1213-1218.
- Anonyme (1953).** *Chute Isère-Arc. Centrale de Randens*. Rapport EDF inédit.
- Anonyme (1989).** *Memento technique de l'eau. Tome 1*. Ed. Degrémont, 9^{ème} édition, 592p.
- Anonyme (1994).** *Rapport de mise en oeuvre, traitement et interprétation. Etude par sismique réflexion haute résolution 3D*. Rapport CGG, mission 100 25 35, 37p.
- Antoine, P., Barféty, J. C., Vivier, G., Debelmas, J., Desmons, J., Fabre, J., Loubat, H. et Vautrelle, C. (1992).** *Carte géologique de Bourg-Saint-Maurice, 1/50000*. Editions du BRGM, Orléans.
- Aubignat, A. (1981).** *Station hydrothermale de La Léchère-les-Bains (Savoie), rapport hydrogéologique sommaire*. Rapport inédit, Thermes de la Léchère, 20p.

B

- Bahati, G., Pang, Z., Armannsson, H., Isabirye, E., M., et Kato, V. (2005).** *Hydrology and reservoir characteristics of three geothermal systems in western Uganda*. Geothermics, 34, 568-591.
- Baietto, A., Cadoppi, P., Martinotti, G., Perello, P., Vuataz, F.-D. et Perrochet, P. (2005).** *Mechanisms of up-rise of hot thermal springs of Valdieri (Argentera Massif, Maritime Alps, northwestern Italy)*. Geophysical Research Abstracts, European Geosciences Union, 7.
- Bajjali, W., Clark, I. D. et Fritz, P. (1997).** *The artesian groundwaters of northern Jordan : insights into their recharge history and age*. J. Hydrol., 192, 355-382.
- Barféty, J. C. (1985).** *Le Jurassique dauphinois entre Durance et Rhône. Etude stratigraphique et géodynamique. Zone externe des Alpes occidentales françaises*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Grenoble, 655p.
- Barféty, J. C. (2000).** *Glissement de Combelouvière, pont de la Thuile, route de Celliers à Doucy, commune de La Léchère-les-Bains, District d'Aigueblanche (Savoie). Etude géologique et hydrogéologique.*, Rapport BRGM n°RP-50632-FR, 91p.

- Barf ty, J. C., Blaise, J., Fourneaux, J. C. et Meloux, J. (1984).** *Carte géologique de la Rochette, 1/50000*. Editions du BRGM, Orléans.
- Basabe, P.P. (1993).** *Typologie des eaux souterraines du flysch de la nappe tectonique du Niesen (Préalpes Suisses)*. Th ese de Doctorat n 1073, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 200p.
- Bataillé, A., Genthon, P., Rabinowicz, M. et Fritz, B. (2006).** *Modeling the coupling between free and forced convection in a vertical permeable slot : implications for the heat production of an Enhanced Geothermal System*. *Geothermics*, 35, 654-682.
- Baudry, P. (1736).** *Traité des eaux minérales de Bourbonne les Bains contenant une explication méthodique sur tous leurs usages*. Ed. Sirot, 258p.
- Becq-Giraudon, B. (1997).** *Les légionelloses*. Bulletin d'information de l'AFTH, janvier 1997, 3-4.
- Beltrami, H., Cheng, L. et Maréchal, J. C. (1997).** *Simultaneous inversion of borehole temperature data for determination of ground surface temperature history*. *Geophys. J. Int.*, 129, 311-318.
- Bensimon, M., Gabus, J.H. et Parriaux, A. (1991).** *Characterization of natural waters using trace element analysis obtained in a plasma source mass spectrometer*. *J. Trace Microprobe T.*, 9, 81-93.
- Bensimon, M., Looser, M., Parriaux, A. et Reed, N. (1994).** *Characterization of groundwater and polluted water by ultra trace element analysis, using High Resolution Plasma Source Mass Spectrometry*. *Eclogae Geol. Helv.*, 87, 325-334.
- Bérard, P., Loizeau, M., Rouzaire, D. et Vigouroux, P. (2002).** *Am lioration de la connaissance des ressources en eau souterraine des sites thermaux en Auvergne, Site de Chaudes-Aigues (15)*. Rapport BRGM n  RP-51722-FR, 152p.
- Bertani, R. (2005).** *World geothermal power generation in the period 2001-2005*. *Geothermics*, 34, 651-690.
- Bertrand, J. M., Paquette, J. L., Gasquet, D., Lehmann, J., Ratzov, G., De Ascen o Guedes, R., Tiepolo, M. et Boullier, A. M. (2006).** *Age U-Th-Pb Miocène de l'hydrothermalisme et de la déformation en basse Tarentaise (Savoie)*. Réunion des Sciences de la Terre, Dijon.
- Besson, J. C. (1987).** *Etablissement thermal de La Léchère. Forage géotechnique profond. Synthèse géologique*. Rapport BRGM n 87 SGN 092 RHA, 11p.
- Bianchetti, G., Roth, P., Vuataz, F.-D. et Vergain, J. (1992).** *Deep circulation in the Alps : relations between water infiltration, induced seismicity and thermal springs. The case of Val d'Illeiez, Wallis, Switzerland*. *Eclogae geol. Helv.*, 85, 291-305.
- Blaise, M. et Vigouroux, P. (2003).** *Ressource en eau thermale de la station de Divonne-les-Bains (01)*. Rapport BRGM n  RP-52414-FR, 97p.
- Blaise, M. et Vigouroux, P. (2005).** *Ressource en eau thermale de la station de Brides-les-Bains/Salins-les-Thermes (73)*. Rapport BRGM n  RP-54262-FR, 126p.
- Blanc-Valleron, M. M., Gely, J. P., Schuler, M., Dany, F. et Ansart, M. (1991).** *La matière organique associée aux évaporites de la base du Sel IV (Oligocène inférieur) du bassin de Mulhouse (Alsace, France)*. *Bul. Soc. géol. France*, 162, 113-122.
- Blavoux, B. (1966).** *Les sources minérales d'Evian*. Th ese de 3 me cycle, Université de Paris, 365p.
- Blavoux, B. (1995).** *Apports des techniques isotopiques à la connaissance des gisements d'eau minérale*. *Houille Blanche*, n 2/3, 51-58.
- Blavoux, B. (1998).** *La formation des gisements d'eau minérale*. *Ann. Mines*, mai 1998, 8-12.
- Bode , S., Steinmann, M. et Buatier, M. (2006).** *Nd-Sr isotopic and REY geochemistry of metalliferous sediments in a low temperature off-axis hydrothermal environment*. *Geochim. cosmochim. Acta*, 70, 18, suppl. 1, A56.
- Bodri, B. et Rybach, L. (1998).** *Influence of topographically driven convection on heat flow in the Swiss Alps : a model study*. *Tectonophysics*, 291, 19-27.
- Bonijoly, D. (2006).** *Géologie du radon. Le radon, environnement et santé, colloque scientifique, Aix-les-Bains*.

- Bordet, C. (1961).** *Recherches géologiques sur la partie septentrionale du Massif de Belledonne (Alpes françaises)*. Ministère de l'Industrie, 197p.
- Bordet, C. (1971).** *L'eau dans les massifs rocheux fissurés. Observations dans les travaux souterrains*. Mémoires du centre d'études, de recherches et d'essai scientifique du génie civil (CERES), n°36, Université de Liège, 35p.
- Brenninkmeijer, C. A. M., Kraft, P. et Mook, W. G. (1983).** *Oxygen isotope fractionation between CO₂ and H₂O*. *Isot. Geosci.*, 1, 181-190.
- BRGM (1985).** *Route communale de Combelouvière (tronçon Doucy Combelouvière à Pont de la thuile sur l'Eau Rousse)*. Rapport BRGM.
- Brugger, J., Long, N., McPhail, D. C. et Plimer, I. (2005).** *An active amagmatic hydrothermal system : The Paralana hot springs, Northern Flinders Ranges, South Australia*. *Chem. Geol.*, 222, 35-64.
- Burger, A., Recordon, E., Bovet, D., Cotton, L. et Saugy, B. (1985).** *Thermique des nappes souterraines*. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 255p.

C

- Campy, M. et Macaire, J. J. (2003).** *Géologie de surface. Erosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux*. Ed. Dunod, 2ème édition, Paris, 436p.
- Canellas, J. et Blavoux, B. (1995).** *Relations entre les structures géologiques, la composition chimique des eaux minérales et leurs orientations thérapeutiques*. *Houille Blanche*, 50, 2-3, 29-133.
- Carillo-Rivera, J. J., Clark, I. et Fritz, P. (1992).** *Investigating recharge of shallow and paleogroundwaters in the Villa de Reyes basin, SLP, Mexico, with environmental isotopes*. *Appl. Geochem.*, 4, 35-48.
- Cartwright, I., Weaver, T., Tweed, S., Ahearne, D., Cooper, M., Czapnik, K. et Tranter, J. (2002).** *Stable isotope geochemistry of cold CO₂-bearing mineral spring waters, Daylesford, Victoria, Australia : sources of gas and water and links with waning volcanism*. *Chem. Geol.*, 185, 71-91.
- Ceron, J. C. et Pulido-Bosch, A. (1998).** *Geochemistry of thermomineral waters in the overexploited Alto Guadalentin aquifer (South East Spain)*. *Water Res.*, 33, 295-300.
- Champagnac, J. D., Sue, C., Delacou, B., Tricart, P., Allanic, C. et Burkhard, M. (2006).** *Miocene lateral extrusion in the inner western Alps revealed by dynamic fault analysis*. *Tectonics*, 25, TC3014.
- Chiodini, G., Frondini, F. et Marini, L. (1995).** *Theoretical geothermometers and pCO₂ indicators for aqueous solutions coming from hydrothermal systems of medium-low temperature hosted in carbonate-evaporite rocks. Application to the thermal springs of the Etruscan Swell, Italy*. *Appl. Geochem.*, 10, 337-346.
- Clark, I. et Fritz, P. (1997).** *Environmental isotopes in hydrogeology*. Ed. Lewis publishers, New York, 290p.
- Clark, I. D., Phipps, G. C. et Bajjali, W. T. (1995).** *Constraining carbon-14 ages in sulphate reducing groundwaters. Two case studies from arid regions*. Symposium on isotopes in water resources management, IAEA, Vienne.
- Collart, J. (1973).** *La zone des brèches de Tarentaise entre Montgirod et le vallon du Cormet d'Arêches (au N de Moûtiers), Savoie*. Thèse de 3ème cycle, Université de Grenoble, 99p.
- Corrigan, P. (1995).** *Synthèse des informations majeures concernant le site de La Léchère compte-tenu des données acquises lors de la réalisation des forages Radiana VIII et IX. Stratégie de développement de la ressource*. Rapport ANTEA n°A 03219, 11p.
- Corrigan, P. (1996a).** *Identification thermique et chimique de la venue d'eau thermale d'origine profonde*. Rapport ANTEA n°A04886, 5p.
- Corrigan, P. (1996b).** *Mise en exploitation du forage Radiana X. Avant-projet sommaire*. Rapport ANTEA n°A06190, 9p.
- Cosandey, C. et Robinson, M. (2000).** *Hydrologie continentale*. Ed. Colin, Paris, 360p.
- Courtois, N. et avec la collaboration de Vigouroux, P. (2005a).** *Ressource en eau thermale de la station de Allevard-les-Bains (38)*. Rapport BRGM n°RP-53620-FR, 119p.

Craig, H. (1961). *Isotopic variations in meteoric waters.* Science, 133, 1702-1708.

Cruchet, M. (1983). *Relations entre l'hydrogéologie, le thermalisme et les circulations d'eaux uranifères dans les roches fissurées. Les massifs cristallins externes de Basse Maurienne (Savoie).* Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 229p.

Cuchi-Oterino, J. A., Baeza Rodriguez-Caro, J. et Garcia de la Noceda-Marquez, C. (2000). *Overview of hydrogeothermics in Spain.* Environ. Geol., 39, 482-487.

Curt, A. L. et Lamotte, C. (2004). *Ressource en eau thermale de la station d'Aix-les-Bains. Rapport final.* Rapport BRGM n°RP-52 859-FR, 119p.

D

Dazy, J. et Razack, M. (1989). *Approche hydrogéochimique et structurale des circulations dans un réservoir du domaine alpin (massif d'Allevard, France).* Revue des Sciences de l'Eau, 2, 153-181.

De Ascençao Guedes, R. (1997). *Recherches structurales et cartographiques sur la série de Villard-Benoît dans le secteur de la Léchère, Tarentaise, Savoie.* Rapport de stage, Université de Savoie, 25p.

De Marsily, G., Delhomme, J. P., Delay, F. et Buoro, A. (1999). *Regards sur 40 ans de problèmes inverses en hydrogéologie.* C.R. Acad. Sci., 329, 73-87.

De Matteis, A. (1995). *Typologie géochimique des eaux des aquifères carbonatés des chaînes alpines d'Europe centrale et méridionale.* Thèse de doctorat n°1419, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 215p.

De Matteis, A. (2005). *Nouvelle liaison ferroviaire transalpine Lyon-Turin. Etudes hydrogéologiques 2002-2004.* Rapport hydrogéologique de synthèse LTF, 88p.

Debelmas, J., Barféty, J. C., Dabrowski, H., Desmons, J., Ellenberger, F., Goffe, B., Guillot, F., Jaillard, E., Pachoud, A., Raoult, J. F. et Vautrelle, C. (1989). *Carte géologique de Moûtiers, 1/50000.* Editions du BRGM, Orléans.

Debombourg, O. (2003). *Synthèse hydrogéologique de la vallée de l'Eau Rouse (Basse Tarentaise) : conséquences pour les eaux thermominérales de La Léchère.* Rapport de stage Licence IUP, Université de Savoie, 23p.

Debon, F., Guerrot, C., Menot, R. P., Vivier, G. et Cocherie, A. (1998). *Late variscan granites of the Belledonne massif (French Western Alps) : an Early Visean magnesian plutonism.* Schweiz. mineral. petrogr. Mitt., 78, 67-85.

Debrest (1778). *Traité des eaux minérales de Chateldon, de celles de Vichy et Haute Rive en Bourbonnois avec le détail de leurs propriétés médicinales et leurs analyses.* Ed. Faure et Vidalin, 304p.

Deines, P., Langmuir, D. et Harmon, R. S. (1974). *Stable carbon isotope ratios and the existence of a gas phase in the evolution of carbonate groundwaters.* Geochim. cosmochim. Acta, 38, 1147-1164.

Diersch, H. J. G. (2002). *Feflow, Finite element subsurface flow and transport simulation system, reference manual.* Wasy software, 278p.

Domenico, P. A. et Schwartz, F. W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology.* Ed. John Wiley and Sons, 2nd edition, 506p.

Doudoux, B., Barféty, J. C., Vivier, G., Carfantan, J. C., Nicoud, G. et Tardy, M. (1999). *Carte géologique d'Albertville, 1/50000.* Editions du BRGM, Orléans.

Dray, M. (2000). *Rapport sur les nouvelles données isotopiques de La Léchère.* Rapport CRG inédit, 21p.

Dray, M. (2001). *Etude isotopique du site de La Léchère. Situation à la fin de l'année 2000.* Rapport CRG inédit, 18p.

Dray, M. (2003). *Apport des isotopes de l'environnement à la compréhension des écoulements souterrains du site géothermal de La Léchère. Etat de la situation après trois années de suivi.* Rapport CRG inédit, 5p.

Droque, X. (1972). *Analyse statistique des hydrogrammes de décrue des sources karstiques.* J. Hydrol., 15, 49-68.

Druschel, G. K. et Rosenberg, P. E. (2001). *Non-magmatic fracture-controlled hydrothermal systems in the Idaho Batholith : South Fork Payette geothermal system.* Chem. Geol., 173, 271-291.

Dubar, C. et Corrigan, P. (1998). *Traitement statistique des données physico-chimiques des eaux souterraines du site.* Rapport ANTEA n°A12891/A, 14p.

Dubois, J.D. (1993). *Typologie des aquifères du cristallin : exemple des massifs des Aiguilles Rouges et du Mont Blanc (France, Italie, Suisse).* Thèse de Doctorat n°950, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 324p.

Durand, V. (2005). *Recherche multidisciplinaire pour caractériser deux aquifères fracturés : les eaux minérales de Plancoët en contexte métamorphique et de Quézac en milieu carbonaté.* Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 302p.

Durand-Fardel, M. (1857). *Traité thérapeutique des eaux minérales de France et d'étranger et de leur emploi dans les maladies chroniques.* Ed. Martinet, 758p.

Duriez, A. (2006). *Origine et processus de minéralisation d'eaux thermales en milieu continental méditerranéen : cas du système géothermal des Thermopyles (Grèce).* Thèse de Doctorat, Université de Paris Sud 11 (Orsay).

E

Eberentz, P. (1987). *Exécution des forages d'eau thermale de La Léchère : Radiana VI-Radiana VII-Forage du parc. Résultats techniques.* Rapport BRGM n°87 SGN 376 RHA, 25p.

Eberentz, P. (1988). *Diagnostic relatif aux anciens forages et consignes pour l'aménagement de l'étang.* Rapport BRGM n°88 SGN 925 RHA, 16p.

Eberentz, P. et Vaysse, F. (1990). *Résultats des tests de pompage pratiques sur l'ensemble des forages du site hydrothermal.* Rapport n°R 30843 RHA 4S/90, 15p.

Eichinger, L. (1973). *A contribution of the interpretation of ¹⁴C groundwater ages considering the example of a partially confined sandstone aquifer.* Radiocarbon, 25, 347-356.

Eisenlohr, L., Bouzelboudjen, M., Kiraly, L. et Rossier, Y. (1997). *Numerical versus statistical modelling of natural response of a karst hydrogeological system.* J. Hydrol., 202, 244-262.

Eltchaninoff, C. (1980). *Etude géologique entre Belledonne et Mont Blanc. La terminaison méridionale du massif du Mont Blanc et les terrains de son enveloppe.* Thèse de 3ème cycle, Université de Paris VI, 115p.

Eltchaninoff, C. et Triboulet, S. (1980). *Etude géologique entre Belledonne et Mont Blanc. Livre synthétique.* Thèse de 3ème cycle, Université de Paris VI, 54p.

Epstein, S. et Mayeda, T. (1953). *Variation of ¹⁸O content of waters from natural sources.* Geochim. cosmochim. Acta, 4, 213-224.

Etchecopar, A., Vasseur, G. et Daignières, M. (1981). *An inverse problem in microtectonics for determination of stress tensors faults striation analysis.* J. of Struct. Geol., 3, 51-65.

Etienne, J. (1997). *Les Légionelles dans les eaux thermales et de distribution.* Bulletin d'information de l'AFTH, janvier 1997, 6-7.

F

Fanget, B., Najib, H. et Mietton, M. (2003). *Le jaugeage de débits torrentiels par dilution d'un colorant alimentaire (E110 : jaune orangé sunset). Application à l'exurgence de la Doria (Massif des Bauges, France).* Karstologia, 41, 15-22.

Fara, M., Chandrasekharam, D. et Minissale, A. (1999). *Hydrochemistry of Damt thermal springs, Yemen Republic.* Geothermics, 28, 241-252.

Favara, R., Grassa, F., Inguaggiato, S. et D'Amore, F. (1998). *Geochemical and hydrogeological characterization of thermal springs in Western Sicily, Italy.* J. Volcanol. Geoth. Res., 84, 125-141.

Favara, R., Grassa, F., Inguaggiato, S. et Valenza, M. (2001). *Hydrogeochemistry and stable isotopes of thermal springs : earthquake-related chemical changes along Belice Fault (Western Sicily).* Appl. Geochem., 16, 1-17.

Federico, C., Aiuppa, A., Favara, R., Gurrieri, S. et Valenza, M. (2004). *Geochemical monitoring of groundwaters (1998-2001) at Vesuvius volcano (Italy).* J. Volcanol. Geoth. Res., 133, 81-104.

- Finizola, A. (2002).** *Etude de systèmes hydrothermaux de volcans actifs : Misti (Perou) et Stromboli (Italie) ; approches géophysiques et géochimiques.* Thèse de Doctorat, Université de Clermont-Ferrand II, 205p.
- Fontes, J.C. (1976).** *Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles.* Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Paris 6, 208p.
- Fontes, J. C. et Garnier, J. M. (1979).** *Determination of the initial ^{14}C activity of the total dissolved carbon : a review of the existing models and a new approach.* *Water Res.*, 15, 399-413.
- Ford, T. D. et Pedley, H. M. (1996).** *A review of tufa and travertine of the world.* *Earth-Sci. Rev.*, 41, 117-175.
- Fouillac, C. et Michard, G. (1981).** *Sodium/Lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs.* *Geothermics*, 10, 55-70.
- Fournier, R. O. (1977).** *Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems.* *Geothermics*, 5, 41-50.
- Fournier, R. O. (1979).** *A revised equation for the Na/K geothermometer.* *Geotherm. Res. Counc. Trans.*, 3, 221-224.
- Fournier, R. O. et Truesdell, A. (1973).** *An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters.* *Geochim. cosmochim. Acta*, 37, 1255-1275.
- Fournier, R. O. et Truesdell, A. (1974).** *Geochemicals indicators of subsurface temperature.* *J. Res. US. Geol. Surv.*, 2, 263-270.
- Friedman, I. et O'Neil, J. R. (1977).** *Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest.* *Geol. Surv. Prof. Paper*, 440-KK.
- Frisch, W., Dunkel, I. et Kuhlemann, J. (2000).** *Post-collisional orogen-parallel large scale extension in the Eastern Alps.* *Tectonophysics*, 327, 239-265
- Fügenschuh, B., A., L., Ceriani, S. et Schmid, S. M. (1999).** *Structural analysis of the Subbriançonnais and Valais units in the area of Moûtiers (Savoie, Western Alps) : paleogeographic and tectonic consequences.* *Int. J. Earth. Sci.*, 88, 201-218.

G

- Gal, F. (2005).** *Etude géochimique et isotopique des eaux superficielles du bassin versant du Furan et des eaux minérales du Forez, Est du Massif Central français.* Thèse de Doctorat, Université de Saint Etienne, 450p.
- Gallino, S. (2007).** *Hydrogéologie, géochimie et modélisation hydrodynamique-thermique d'un système thermo-minéral associé à un contact structural alpin (Aix-les-Bains-Savoie).* Thèse de Doctorat, Université de Savoie, 338p.
- Ganderax, C. (1827).** *Recherches sur les propriétés physiques, chimiques et médicinales des eaux minérales de Bagnères de Bigorre.* Ed. de Gueffier, 624p.
- Garnier, J. L. et Dumas, A. (2000).** *Campagne 2000 d'analyse d'Arsenic sur la commune de La Léchère.* Rapport inédit CCVA, 16p.
- Gasquet, D. (1979).** *Etude pétrologique, géochimique et structurale des terrains cristallins de Belledonne et du Grand Chatelard traversés par les galeries EDF Arc-Isère (Alpes Françaises).* Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Grenoble, 230p.
- Gély, J. P. (1989).** *Stratigraphie, tectonique et métamorphisme comparés de part et d'autre du front pennique en Tarentaise (Alpes de Savoie, France). Premières applications cristallogéochimiques, géochimiques et isotopiques dans les reconstitutions paléogéographiques et géodynamiques régionales.* Thèse de Doctorat, Université de Savoie, 342p.
- Gemici, U. et Tarcan, G. (2002).** *Hydrochemistry of the Simav geothermal field, western Anatolia, Turkey.* *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 116, 215-233.
- Genter, A. et Traineau, H. (2004).** *Synthèse méthodologique sur l'exploration haute énergie dans les DOM : approche géologique.* *Projet GHEDOM.* Rapport BRGM n°RP 53 130-FR, 85p.

- Gérard, A., Genter, A., Kohl, T., Lutz, P., Rose, P. et Rummel, F. (2006).** *The deep EGS (Enhanced Geothermal System) project at Soultz-sous-Forêts (Alsace, France)*. *Geothermics*, 35, 473-714.
- Gianelli, G. et Grassi, S. (2001).** *Water-rock interaction in the active geothermal system of Pantelleria, Italy*. *Chem. Geol.*, 181, 113-130.
- Giggenbach, W. F. (1988).** *Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers*. *Geochim. cosmochim. Acta*, 52, 2749-2765.
- Gignoux, M. et Barbier, R. (1955).** *Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques*. Ed. Masson et Cie, 95p.
- Goddard (1888).** *Rapport des ingénieurs : réponse de demande d'autorisation*. Rapport CCVA inédit, 3p.
- Godwin, H. (1962).** *Half life of radiocarbon*. *Nature*, 195, p192.
- Gökgöz, A. et Tarcan, G. (2006).** *Mineral equilibria and geothermometry of the Dalaman-Köycegiz thermal springs, southern Turkey*. *Appl. Geochem.*, 21, 253-268.
- Gourgand, B. (1983).** *Hydrogéologie des roches fissurées, étude du massif cristallin du Rissiou et de sa couverture sédimentaire*. Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Grenoble, 238p.
- Grasby, S. E. et Hutcheon, I. (2001).** *Controls on the distribution of thermal springs in the southern Canadian Cordillera*. *Can. J. Earth. Sci.*, NRC Research Press, 38, 427-440.
- Gudmundsson, B. T. et Arnorsson, S. (2002).** *Geochemical monitoring of the Krafla and Namafjall geothermal areas, N-Iceland*. *Geothermics*, 31, 195-243.
- Guyomard, A. (2006).** *Etude structurale et hydrogéologique de la terminaison occidentale du Massif des Mémises et de ses relations avec le complexe détritique quaternaire d'Éoian*. Thèse de Doctorat, Université de Savoie, 336p.

H

- Hesske, S. (1995).** *Typologie des eaux souterraines de la molasse entre Chambéry et Linz (France, Suisse, Allemagne, Autriche)*. Thèse de Doctorat n°1417, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 246p.
- Horvath, A., Bohus, L. O., Urbani, F., Marx, G., Piroth, A. et Greaves, E. D. (2000).** *Radon concentrations in hot spring waters in northern Venezuela*. *J. Environ. Radioactiv.*, 47, 127-133.
- Hubbert, M. K. (1940).** *The theory of groundwater motion*. *J. Geol.*, 48, 785-944.
- Hudson, J. A. et Priest, S. D. (1979).** *Discontinuities and rock mass geometry*. *Int. J. Rock. Mech. Min.*, 16, 339-362.
- Hudson, J. A. et Priest, S. D. (1981).** *Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys*. *Int. J. Rock. Mech. Min.*, 18, 183-197.
- Hudson, J. A. et Priest, S. D. (1983).** *Discontinuity frequency in rock masses*. *Int. J. Rock. Mech. Min.*, 20, 73-89.
- Huneau, F. (2000).** *Fonctionnement hydrogéologique et archives paléoclimatiques d'un aquifère profond méditerranéen. Etude géochimique et isotopique du bassin miocène de Valréas (SE de la France)*. Thèse de Doctorat, Université d'Avignon, 200p.

I-J-K

- Inguaggiato, S., Martin-Del Pozzo, A. L., Aguayo, A., Capasso, G. et Favara, R. (2005).** *Isotopic, chemical and dissolved gas constraints on spring water from Popocatepetl volcano (Mexico) : evidence of gas-water interaction between magmatic component and shallow fluids*. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 141, 91-108.
- Jamier, D. (1988).** *Etude géologique et géotechnique. Projet immobilier Sud/les eaux claires. Station thermale de La Léchère. District du Bassin d'Aigueblanche*. Rapport du Cabinet Jamier-Vial n°114088, 14p.
- Jerphanion, P. et Corrigan, P. (1996).** *Forage d'eau minérale Radiana X. Réalisation et pompages préliminaires*. Rapport ANTEA n°A06439, 7p.

- Jeudy, J. M. (2006).** *Montagne maudite, montagne apprivoisée*. Coll. Pour Mémoire, Ed. La Fontaine de Siloé, Montmélian, 246p.
- Jobard, S. (2005).** *Les glaciers du Haut Arc (Savoie) : caractérisation et impacts de la décrue post-Petit Age Glaciaire*. Thèse de Doctorat, Université de Savoie, 279p.
- Kattan, Z. (2002).** *Effects of sulphate reduction and geogenic CO₂ incorporation on the determination of ¹⁴C groundwater ages. A case study of the Palaeogene groundwater system in north-eastern Syria*. Hydrogeol. J., 10, 495-508.
- Kilchmann, S. (2001).** *Typology of recent groundwater from different aquifer environments based on geogenic tracer elements*. Thèse de Doctorat n° 2411, 254p.
- Kilchmann, S., Niklaus Waber, H., Parriaux, A. et Bensimon, M. (2004).** *Natural tracers in recent groundwaters from different Alpine aquifers*. Hydrogeol. J., 12, 643-661.
- Kohl, T. (1999).** *Transient thermal effects below complex topographies*. Tectonophysics, 306, 311-324.
- Kohl, T., Signorelli, S. et Rybach, L. (2001).** *Three-dimensional (3-D) thermal investigation below high Alpine topography*. Phys. Earth. Planet. In., 126, 195-210.
- Kovacs, A., Perrochet, P., Kiraly, L. et Jeannin, P. Y. (2005).** *A quantitative method for the characterisation of karst aquifers based on spring hydrograph analysis*. J. Hydrol., 303, 152-164.

L

- Le Fanic, R. (2005).** *Hydrogéologie d'un système thermal et modélisation couplée hydrodynamique-thermique en vue de la gestion de la ressource. Application au système de Dax/Saint-Paul-les-Dax*. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 3, 285p.
- Le Maréchal, A. (1976).** *Géologie et géochimie des sources thermominérales du Cameroun*. Travaux et documents de l'Orstom, n°59, 180p.
- Lehmann, J. (2004).** *Chronologie relative des déformations alpines en bordure orientale du Massif de La Lauzière (Alpes Occidentales). Etude en lame mince*. Rapport de stage, M1 STUE, Université de Grenoble, 27p.
- Lemahieu, J. M. (1986).** *Demande d'autorisation d'exploiter, mélanger, transporter les eaux des sources Radiana II, III, IV et V*. Rapport DRIRE, 15p.
- Lemoine (1930).** *Etude géologique de la source Radiana*. in Amat-Chantoux (1984).
- Lemoine, M., De Graciansky, P. C. et Tricart, P. (2000).** *De l'océan à la chaîne de montagnes. Tectonique des plaques dans les Alpes*. Gordon and Breach Science Publishers, Collection Géosciences, 207p.
- Leven, C. et Dietrich, P. (2006).** *What information can we get from pumping tests?-comparing pumping test configurations using sensitivity coefficients*. J. Hydrol., 319, 199-215.
- Lhomme, D., Dzikowski, M., Nicoud, G. et Naffrechoux, E. (1995).** *Réponses d'un aquifère fissuré de haute montagne à la fusion nivale, Morzine-Aovoriaz, Haute-Savoie*. Houille Blanche, 7, 83-87.
- Li, J. et Kusky, T. M. (2007).** *World's largest known Precambrian fossil black smoker chimneys and associated microbial vent communities, North China : implication for early life*. Gondwana Res., 12, 84-100.
- Li, X., Chen, Z. et Zhao, J. (2006).** *Simulation and experiment on the thermal performance of U-vertical ground heat exchanger*. Appl. Therm. Eng., 26, 1564-1571.
- Lienhard, G. et Pachoud, A. (date inconnue).** *Les effondrements de la région de La Léchère-Petit-Coeur (Savoie)*. Inédit, 4p.
- Lucazeau, F. et Vasseur, G. (1989).** *Heat flow density data from France and surrounding margins*. Tectonophysics, 164, 251-258.
- Luczyszyn, H. et Chemery, J. B. (2003).** *Gestion de l'eau et des cours d'eau sur le bassin de l'Isère en amont d'Albertville : étude d'opportunité*. Rapport Geoplus n° 03-B74-087, 143p.

M

- Maillet, E. (1905).** *Essais d'hydraulique souterraine et fluviale*. Ed. Hermann, Paris, 218p.
- Malatrait, A., Berthier, M., Corrigan, P. et Duboeuf, P. (1994).** *Recherche d'une ressource complémentaire en eau thermique. Résultats et synthèse des diverses prospections; Propositions de forages*. Rapport BRGM n°N 1279 RHA 4S 94, 12p.
- Mancktelow, N. S. (1992).** *Neogene lateral extension during convergence in the Central Alps : Evidence from interrelated faulting and backfolding around the Simplonpass (Switzerland)*. *Tectonophysics*, 215, 295-316.
- Mandia, Y. (1993).** *Typologie des aquifères évaporitiques du Trias dans le Bassin lémanique du Rhône (Alpes Occidentales)*. Thèse de Doctorat n°948, 345p.
- Manzoor, A., A., W., Niaz, A., Azam Tasneem, M., Rafiq, M. et Latif, Z. (2002).** *Assessment of reservoir temperatures of thermal springs of the northern areas of Pakistan by chemical and isotope geothermometry*. *Geothermics*, 31, 613-631.
- Maréchal, J. C. (1998).** *Les circulations d'eau dans les massifs cristallins alpins et leurs relations avec les ouvrages souterrains*. Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 174p.
- Maréchal, J. C., Perrochet, P. et Tacher, L. (1999).** *Long-term simulations of thermal and hydraulic characteristics in a mountain massif : The Mont Blanc case study, French and Italian Alps*. *Hydrogeol. J.*, 7, 341-354.
- Mariner, R. H., Evans, W. C. et Young, H. W. (2006).** *Comparison of circulation times of thermal waters discharging from the Idaho batholith based on geothermometer temperatures, helium concentrations, and ¹⁴C measurements*. *Geothermics*, 35, 3-25.
- Massonnat, G. (1981).** *Etude du massif de Bramefarine et Nord du massif d'Allevard. La source thermominérale d'Allevard (Isère-France)*. Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Grenoble, 313p.
- Melioris, L. (2000).** *Mineral and thermal waters of the Ipelska Pahorkatina hillyland*. *Environ. Geol.*, 39, 448-462.
- Ménard, G. (1988).** *Structure et cinématique d'une chaîne de collision, les Alpes occidentales et centrales*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Grenoble, 268p.
- Menard, G. et Sacchi, R. (1996).** *Etude «Tunnel de base Maurienne-Ambin». Coupes géologiques 1:25000^{ème}*. Document Alpetunnel.
- Menard, R. (1981).** *Etude du gisement hydrothermal par prospection électrique*. in Amat-Chantoux (1984).
- Michard, G. (1979).** *Géothermomètres chimiques*. Bulletin du BRGM, 2, 183-189.
- Michard, G., Pearson, F. J. et Gautschi, A. (1996).** *Chemical evolution of waters during long term interaction with granitic rocks in northern Switzerland*. *Appl. Geochem.*, 11, 757-774.
- Molinero, J., Samper, J. et Juanes, R. (2002).** *Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks*. *Eng. Geol.*, 64, 369-386.
- Monteith, J.L. (1981).** *Evaporation and surface temperature*. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 107 (451), 1-27.
- Mook, W. G. (1976).** *The dissolution exchange model for dating groundwater with ¹⁴C*. Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology, IAEA, Vienne, 213-225.
- Mook, W. G. (2000).** *Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and applications*. International hydrological programme V, Technical documents in hydrology of IAEA, Vienne.
- Moret, L. (1946).** *Les sources thermominérales : hydrogéologie, géochimie, biologie*. Ed. Masson et Cie, Paris, 136p.
- Moret, L. (1950a).** *Sources thermales alpines et travaux de barrages*. Travaux du laboratoire de Géologie de la faculté des sciences de l'Université de Grenoble, tome XXVIII, 79-96.
- Moret, L. (1950b).** *Sur la géologie des environs de la Léchère, près de Notre-Dame de Briançon (Savoie)*. C.R. somm. Soc. géol. Fr., 4, 61-63.

Muralt, R. (1999). *Processus hydrogéologiques et hydrochimiques dans les circulations profondes des calcaires du Malm de l'arc jurassien (zones de Delémont, Yverdon-les-Bains, Moiry, Genève et Aix-les-Bains)*. Matériaux pour la géologie de la Suisse, série géotechnique, n°82, 236p.

Musy, A. et Higy, C. (2004). *Hydrologie, une science de la nature*. Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 326p.

N-O

Negga, H. S. (1984). *Comportement de l'uranium lors des métamorphismes tardi-hercynien et alpin dans les massifs des Aiguilles Rouges et de Belledonne (Vallorcine et Lauzière), Alpes Occidentales*. Thèse de 3ème cycle, CREGU, Nancy, 400p.

Nicoud, G. et Parriaux, A. (1993). *Les formations glaciaires et l'eau souterraine. Exemple du contexte nord alpin occidental*. Quaternaire, 4, 61-67.

Nieva, D., Pal Verma, M., Santoyo, E., Portugal, E. et Campos, A. (1997). *Geochemical exploration of the Chipilapa geothermal field, El Salvador*. Geothermics, 26, 589-612.

Novel, J. P. et Zuppi, G. M. (2000). *Assistance technique, hydrogéologie, géochimie isotopique des circulations souterraines profondes (tunnels de base et de Bussoleno de la future liaison Lyon-Torino)*. Rapport Alpetunnel, 95p.

Olive, P. (1999). *Protocole de prélèvement d'eau pour le dosage du ¹⁴C du carbone minéral total dissous*. Rapport interne CRG, n° 424.

Opaix, C. (1816). *Traité des eaux minérales de Provins*. Ed. Delalain, Paris, 176p.

P-Q

Pachoud, A. (1971). *Rapport sur l'origine d'un effondrement de terrain constaté sur le territoire de la commune de Petit-Coeur (Savoie)*. Rapport BRGM, 4p.

Pachoud, A. (1973). *Résultats de deux forages de reconnaissance exécutés sur la commune de La Léchère (Savoie)*. Rapport BRGM n°73 SGN 200 JAL, 11p.

Pastorelli, S., Luigi, M. et Hunziger, J. (2001). *Chemistry, isotope values (δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{34}S$ (SO_4)) and temperatures of the water inflows in the two Gotthard tunnels, Swiss Alps*. Appl. Geochem., 16, 633-649.

Pastorelli, S., Marini, L. et Hunziker, J. C. (1999). *Water chemistry and isotope composition of the Acquarossa thermal system, Ticino, Switzerland*. Geothermics, 28, 75-93.

Paulick, H., Bach, W., Godard, P., De Hoog, J. C. M., Suhr, G. et Harvey, J. (2006). *Geochemistry of abyssal peridotites (Mid-Atlantic Ridge, 15°20'N, ODP Leg 209) : Implications for fluid/rock interaction in slow spreading environments*. Chem. Geol., 234, 79-210.

Pauwels, H., Fouillac, C., Goff, F. et Vuataz, F. D. (1997). *The isotopic and chemical composition of CO₂-rich thermal waters in the Mont-Dore region (Massif-Central, France)*. Appl. Geochem., 12, 411-427.

Pearson, F. J. et Hanshaw, B. B. (1970). *Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effects on carbon-14 dating*. Symposium of the International Atomic Agency and UNESCO, Vienna, paper n°SM-129/18, 271-286.

Pedley, H. M. (1990). *Classification and environmental models of cool freshwater tufas*. Sediment. Geol., 68, 143-154.

Penman, H.L. (1948). *Natural evaporations from open water, bare soils and grass*. Proc. Roy. Soc. London, A193, 120-146.

Pentecost, A. (1995). *The quarternary travertine deposits of Europe and Asia minor*. Quaternary Sci. Rev., 14, 1005-1028.

Pomerol, C. et Ricour, J. (1992). *Terroirs et thermalisme. Les eaux minérales françaises*. Editions du BRGM, Orléans, 288p.

Poncerry, E. (1981). *Contribution à l'étude géologique des granitoïdes de Vallorcine, Beaufort, Lauzière, de leur encaissant et des minéralisations uranifères associées. Alpes Françaises.* Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Grenoble, 316p.

Portugal, E., Izquierdo, G., Truesdell, A. et Alvarez, J. (2005). *The geochemistry and isotope hydrology of the Southern Mexicali Valley in the area of the Cerro Prieto, Baja California (Mexico) geothermal field.* J. Hydrol., 313, 132-148.

Poul, X. et Iundt, F. (1985). *Ressources en eaux thermales de la station de la Léchère.* Rapport BRGM n°85 SGN 089 RHA, 90p.

Priest, S. D. et Hudson, J. A. (1976). *Discontinuity spacings in rock.* Int. J. Rock. Mech. Min., 13, 135-148.

Qin, D., Turner, J., V., et Pang, Z. (2005). *Hydrochemistry and groundwater circulation in the Xi'an geothermal field, China.* Geothermics, 34, 471-494.

R

Rabemanana, V., Vuataz, F.-D., Kohl, T. et Andre, L. (2005). *Simulation of mineral precipitation and dissolution in the 5km deep enhanced geothermal reservoir at Soultz-sous-Forêts, France.* World Geothermal Congress, Antalya, Turkey.

Radolic, V., Vukovic, B., Smit, G., Stanic, D. et Planinic, J. (2005). *Radon in the spas of Croatia.* J. Environ. Radioactiv., 83, 191-198.

Ratzov, G. (2004). *Chronologie relative des déformations alpines en bordure orientale du Massif de La Lauzière (Alpes Occidentales). Etude de terrain.* Rapport de stage M1 STUE, Université de Grenoble, 25p.

Ravailleau, S. (2001). *Quelques rappels sur les isotopes.* CRG, Université de Paris VI, www.ccr.jussieu.fr/crg_thonon/competences.html.

Razack, M. et Dazy, J. (1990). *Hydrochemical characterization of groundwater mixing in sedimentary and metamorphic reservoirs with combined use of Piper's principle and factor analysis.* J. Hydrol., 114, 371-393.

Renard, P. (2005). *The future of hydraulic tests.* Hydrogeol. J., 13, 259-262.

Rodier, J. (1984). *L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Chimie, physico-chimie, bactériologie, biologie.* Edition Dunod, 7^{ème} édition, 1365p.

Rosaz, T. et Curioz, P. (1984). *Géologie de la haute vallée de la Grande Maison (torrent de Glaize, rive droite de l'Isère), Savoie.* Rapport de stage réalisé pour EDF, Université de Savoie, 20p.

Rossi, M., Rolland, Y., Vidal, O. et Cox, S. F. (2005). *Geochemical variations and element transfer during shear zone development and related episyenites at middle crust depths: insights from the Mont-Blanc granite (French-Italian Alps).* Geol. Soc. of London, Special Publications, 245, 373-396.

S

Salem, O., Visser, J. H., Dray, M. et Gonfiantini, R. (1980). *Groundwater flow patterns in the western Libyan Arab Jamahiriya, evaluated from isotopic data.* Advisory group meeting on arid zone hydrology, investigations with isotope techniques, IAEA, Vienna.

Serre, A. (1983). *Evolution géodynamique d'un secteur de la paléomarge tétysienne dans les Alpes occidentales : les unités à flysch paléogène de la région de Saint-Jean-de-Maurienne, Savoie.* Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Rennes I, 243p.

Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D. et Kohl, T. (2006). *Numerical evaluation of thermal response tests.* Geothermics, 36, 141-166.

Siméon, Y. (1979). *Etude pétrologique, géochimique et structurale des terrains cristallins de Belledune entre l'Arc et l'Isère (Alpes Françaises).* Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Grenoble, 224p.

- Siméon, Y. (1980).** *Etude hydrogéologique des sources thermominérales de Tarentaise (Savoie). Brides-les-Bains, Salins-les-Thermes, La Léchère.* Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Grenoble, 219p.
- Simler, R. (2007).** *Diagrammes : logiciel d'hydrochimie multilingue en distribution libre, version 4.0.*
- Smejkal, V. (1978).** *Isotope geochemistry of the Cypris formation in the Cheb Basin, West Bohemia. I. Sulphur isotopes in sulphates and pyrites.* Vestník Ustredniho ustava geologickeho, 53, 3-18.
- Socquet, J. M. (1824).** *Essai analytique, médical et topographique sur les eaux minérales gazeuses-acidulés et thermo-sulfureuses de la Perrière, près Moûtiers, en Savoie.* Ed. Huzard, Paris, 302p.
- SOGREAH (1998a).** *Etablissement thermal de la Léchère-captage RXI : dossier de demande d'autorisation d'exploitation.* Rapport SOGREAH n°100638R1, mémoire, annexes et figures.
- SOGREAH (1998b).** *Opération de réhabilitation sur RVII et RX : cimentation des anciens forages, réalisation du forage RXI. Note d'avancement.* Rapport SOGREAH n°100 638, 6p.
- SOGREAH (1998c).** *Opération de Work Over sur RVII et RX. Cimentation de RIII-IV-Olod-POlod-RVI-F9-F1. Réalisation du forage RXI.* Rapport SOGREAH, 6p.
- SOGREAH (1999).** *Etablissement thermal de La Léchère-captage Natacha. Dossier de demande d'autorisation d'exploitation. Mémoire, annexes et figures.* Rapport SOGREAH n°100638R2, mémoire, figures et annexes.
- SOGREAH (2000).** *Captage Natacha : dossier de demande d'autorisation d'exploitation. Synthèse géologique et hydrogéologique sur le bassin d'alimentation (versant Naves). Vulnérabilité du gisement hydrothermal. Suivi des forages pour l'année 2000.* Rapport SOGREAH n°N735145, 22p.
- SOGREAH (2001).** *Captage Natacha : dossier de demande d'autorisation d'exploitation. Synthèse géologique et hydrogéologique sur le bassin d'alimentation (versant Celliers). Vulnérabilité du gisement hydrothermal-versant Celliers. Suivi des forages pour l'année 2001.* Rapport SOGREAH n°730118R1, 25p.
- SOGREAH (2003).** *Captage Natacha : dossier de demande d'autorisation d'exploitation.* Rapport SOGREAH n°0730118 R2, mémoire, figures et annexes.
- Solétanche (1952).** *Chute Isère-Arc. Etude des nappes souterraines. Sources thermales de La Léchère.* Rapport Solétanche n°103 058, mémoire, annexes et plans.
- Somméria, L. (1998).** *Opération de multitraçage sur le site de la station thermale de La Léchère.* Rapport CCVA inédit, 10p.

T

- Tamers, M. A. (1960).** *Carbon 14 Dating with the Liquid Scintillation Counter : Total Synthesis of the benzene Solvent.* Science, 132, 668-669.
- Tardy, M., Bertrand, J. M., Deville, E., Fudral, S., Ganne, J., Jouanne, F., Paillet, A. et Philippe, Y. (1999).** *Coupe crustale des Alpes occidentales franco-italiennes -Transect île Crémieu - Torino.* Colloque Géofrance 3D, Résultats et perspectives, ENS Lyon, Document BRGM, 293, 52-63.
- Teisseyre, J. (1968).** *Les sources minérales des Sudètes en relation avec la structure géologique du sous-sol.* International Geological Congress, Symposium II : Genesis of Mineral and Thermal Waters, Prague.
- Theis, C. V. (1935).** *The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage.* Trans. Amer. Geophys. Un., 16, 519-524.
- Thiébaud, E. (2005).** *Site hydrothermal de la Léchère (Savoie) : rapport de synthèse bibliographique.* Rapport intermédiaire inédit, Université de Savoie, 81p.
- Toro, G. (1988).** *Les eaux thermales et minérales dans les Alpes de Haute Provence (SE de la France). Relations avec le cadre structural.* Thèse de 3^{ème} cycle, Université d'Aix-Marseille, 216p.
- Traineau, H., Sanjua, B., Beaufort, D., Brach, M., Castaing, C., Correia, H., Genter, A. et Herbrich, B. (1997).** *The Bouillante geothermal field (FWI) revisited : new data on the fractured geothermal reservoir in light of a future stimulation experiment in a low productive well.* Twenty second workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University.

Triboulet, S. (1980). *Etude géologique entre Belledonne et Mont Blanc. La terminaison septentrionale du massif de Belledonne et les terrains de son enveloppe.* Thèse de 3ème cycle, Université de Paris VI, 93p.

Turc, L. (1961). *Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise à jour.* Annales d'Agronomie, 12, 13-49.

V

Valles, V. (2007). *Cours sur les eaux thermales.* Lab. d'Hydrogéologie d'Avignon, Enseignement Terre et Eau, <http://www.terre-et-eau.univ-avignon.fr/eaux-thermales.htm>.

Vinograd, N. A. (2004). *Formation of mineral and thermal waters of some artesian basins in Russia.* Environ. Geol., 46, 675-679.

Vogiannis, E., Nikolopoulos, D., Louizi, A. et Halvadakis, C. P. (2004). *Radon variations during treatment in thermal spas of Lesvos Island (Greece).* J. Environ. Radioactiv., 76, 283-294.

Voronov, A. N. (2004). *Radon-rich waters in Russia.* Environ. Geol., 46, 630-634.

Vuataz, F. D. (1982). *Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes.* Matériaux pour la géologie de la Suisse, hydrologie, n°29, 149p.

W-Z

Waples, D. W. et Waples, J. (2004). *A review and evaluation of specific heat capacities of rocks, minerals and subsurface fluids. Part 1 : minerals and nonporous rocks.* Natural Resources Research, 13, 97-122.

Wu, Y. S., Lu, G., Zhang, K., Pan, L. et Bovardson, G. S. (2007). *Analyzing unsaturated flow patterns in fractured rock using an integrated modeling approach.* Hydrogeol. J., Springer, 15, 553-572.

Wu, Y. S., Mukhopadhyay, S., Zhang, K. et Bovardson, G. S. (2006). *A mountain-scale thermal-hydrologic model for simulating fluid flow and heat transfer in unsaturated fractured rock.* J. Contam. Hydrol., 86, 128-159.

Zwahlen, F., Drew, D., Goldscheider, N., Hötzl, H., de Ketelaere, D., Kralik, M., Mudry, J. et Neale, S. (2001). *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers.* Final report, COST 620, 315p.

Annexes

liste des annexes

ANNEXE 1 : Historique de l'exploitation des eaux thermales de la Léchère	A.2
ANNEXE 2 : Description des forages réalisés sur le secteur de la Léchère.....	A.4
ANNEXE 3 : Carottages réalisés dans les travertins de la Léchère	A.40
ANNEXE 4 : Résultats des campagnes de jaugeage	A.41
ANNEXE 5 : Essais par pompages réalisés sur les forages thermaux du site de la Léchère	A.44
ANNEXE 6 : Méthodologie des analyses physico-chimiques et résultats de la campagne 2005-2006..	A.49
ANNEXE 7 : Formules de calculs géothermométriques	A.54
ANNEXE 8 : Données physico-chimiques des forages thermaux de la Léchère.....	A.56
ANNEXE 9 : Analyses chimiques (majeurs, traces et terres rares) des roches du secteur étudié.....	A.66
ANNEXE 10 : Analyses des éléments traces des eaux des forages thermaux de la Léchère	A.69
ANNEXE 11 : Analyses utilisées pour le calcul des gradients isotopiques en rive droite et en rive gauche de l'Isère (Dray, 2003)	A.71
ANNEXE 12 : Méthodologie des analyses des isotopes stables (O, H et C) et résultats de la campagne 2005-2006.....	A.72

ANNEXE 1**HISTORIQUE DE L'EXPLOITATION DES EAUX THERMALES DE LA LÉCHÈRE**

- 1869 : des effondrements locaux forment 2 dépressions de chaque côté de l'Isère. Des eaux chaudes ont rempli l'excavation de la rive gauche ; l'excavation de la rive droite s'est, elle, remplie d'eaux froides.
- 1887 : réalisation des premiers captages Radiana consistant en de simples tubes de quelques m enfoncés dans l'étang de la rive gauche.
- 1895 : construction du premier établissement thermal et de l'Hôtel des Bains.
- 1925 : création de la Station Thermale de La Léchère.
- 1927-1928 : captage Radiana renforcé par 8 nouvelles pointes enfoncées par battage.
- 27 janvier 1930 : **arrêté ministériel : autorisation d'exploiter Radiana I (7 tubes/8) à un débit de 300l/min (18m³/h).**
- 1931 : réalisation d'une pointe supplémentaire de 9m et curage du dispositif ancien.
- 1930 à 1944 : colmatage progressif de RI.
- 15 déc. 1952 : demande de déclaration d'utilité publique avec définition d'un périmètre de protection pour le captage Radiana.
- janv-fév 1944 : réalisation de RII (16,8m) sous l'impulsion de l'ingénieur Cuau.
- avril 1947 : réalisation de RIII (11,5m par rapport au fond du lac)
- janvier 1948 : reconnaissance du versant par galeries dans le cadre des travaux effectués par EDF pour l'aménagement de la chute Arc-Isère.
- 10 juillet 1950 : **arrêté ministériel : l'autorisation d'exploiter Radiana I est étendue à RII et RIII jusqu'au 27 janvier 1960.**
- juillet-déc. 1950 : réalisation du deuxième tracé de reconnaissance par galerie.
- 1952 : étude de la nappe thermominérale par le bureau d'étude SOLETANCHE à la demande d'EDF :
- P20bis est transformé en captage RIV (13m),
- P5 est équipé sur 21m pour constituer le captage Olod,
- un piézomètre POlod de 11m est réalisé juste à côté de Olod.
- 28 juillet 1954 : **arrêté ministériel : autorisation d'exploiter RIV pour 30 ans.**
- 10 sept. 1957 : demande d'autorisation d'exploiter RIII et RIV et de transporter ce mélange.
- 20 mai 1959 : demande de renouvellement des autorisations d'exploiter RI, RII et RIII.
- 23 nov. 1970 : la demande d'autorisation d'exploiter RI, RII et RIII pour 30ans reste sans suite.
- 30nov.-2déc. 1982 : tentative d'exécution d'un nouveau forage F1 par l'entreprise MASSE.
- 1-5déc. 1983 : - réalisation de F2 ou RV (22,6m) par l'entreprise MASSE,
- abandon de RI,
- nettoyage à l'air comprimé de Radiana IV,
- réhabilitation de RIII obturation de RI et mise en exploitation de RV.
- 1984 : obturation de RI et mise en exploitation de RV.
- 1984 : réalisation du forage du Parc.
- déc. 1984 : pompages d'essai sur RII, RIII, RIV, RV et Olod
- 5 déc. 1985 : la Société des Eaux Thermales de la Léchère (Paulette Stern) vend le site au District du bassin d'Aigueblanche (future CCVA)
- 1986-1987 : réalisation de RVI (71,5m) par la société Intrafor-Cofor sous le contrôle du BRGM.
- 1986 : - réalisation de RVII (80m),
- construction d'un nouvel établissement thermal.
- janvier 1987 : découverte d'une cavité au niveau du nouvel établissement thermal et réalisation du forage de reconnaissance S1 (50m).
- juin 1987 : mise en gestion des nouveaux équipements par contrat de concession à la société d'économie mixte SA des Eaux Thermales de La Léchère.

- 14 sept. 1987 :** *arrêté ministériel : autorisation d'exploiter à l'émergence et après transport de RII, RIII, RIV et RV ainsi que le mélange FIRA (RIII, RIV et RV). RII est exploité pour la buvette à un débit de 1,2m³/h. RIII, RIV et RV ne doivent pas excéder un débit d'exploitation de 200l/min (12m³/h). Le débit total des 4 sources ne doit pas excéder 400l/min (24m³/h).*
- 1990 :** - aucune contamination dans RIV et RV,
- mise en exploitation de RVI (30m³/h) et RVII (42 m³/h) et exploitation de RV et Olod.
- 1992 :** comblement de l'étang en rive droite.
- 10 fév. 1993 :** demande d'autorisation d'exploiter le mélange RVI/RVII mais la présence de Legionella pneumophila de 1989 à 1992 conduit à l'abandon de RVI.
- 1994 :** exploitation de RIV et RV
- 6 av. 1994 :** *autorisation provisoire d'exploiter RVII à un débit de 42m³/h.*
- 1994:** prospection sismique réflexion 3D par la CGG.
- 21oct-17nov.1994 :** réalisation de RVIII (126m) et abandon du forage.
- 17nov-15déc.1994 :** réalisation de RIX (104m) et cimentation du forage.
- janv-mars 1996 :** réalisation de RX (105m).
- situation en oct.1996 :** exploitation de RV et RVII à des débits continus respectifs de 20 et 42m³/h.
- 1997 :** exploitation de RII et RV en soutien.
- janvier 1997 :** opération ANTEA avec la collaboration de SONDALP
- abandon de RIII, RIV, Olod et POlod par cimentation gravitaire,
- arrachage des 11 pointes filtrantes constituant RI,
- régénération de RV et RVII.
- mars 1997 :** pompages de qualification sur RX et RVII mené par ANTEA, phase 1.
- automne 1997 :** pompage de qualification sur RX et RVII mené par ANTEA, phase 2.
- 4 décembre 1997 :** arrêt de l'essai de pompage sur RX et RVII à cause de la présence de légionelles.
- 1998-juil.1999:**..... suspension d'autorisation d'exploiter RVII et fermeture de l'établissement.
- mars 1998 :** opération ANTEA avec la collaboration de SONDALP, INTROVISION et HERLI-France AQUAPLUS :
- obturation de F1, RVI et RIX après désinfection,
- nettoyage et désinfection de RX,
- nettoyage de RVII, cimentation d'un télescopage défectueux et détection d'une fuite sur le tube supérieur.
- mai 1998 :** opération de multitraçage par M^{me} Someria.
- mai 1998 :** demande d'autorisation d'exploiter RX malgré les problèmes bactériologiques.
- juin 1998 :** réalisation de 3 piézomètres Pz1, Pz2, Pz3 de 21m de profondeur.
- août-sept.1998 :** opération SOGREAH :
- réhabilitation de RVII,
- essai de réhabilitation de RX et cimentation de cet ouvrage,
- cimentation en pression des anciens forages (RIII, RIV, RV, Olod, POlod, RVI, RIX, F1).
- septembre 1998 :** réalisation de RXI ou Natacha.
- déc.1998-juin1999 :** pompage de certification de Natacha.
- mai 1999 :** réfection du réseau d'assainissement de La Léchère.
- fin 1999 :** réhabilitation du lac par curage et mise en place d'un système de renouvellement des eaux.
- 22 mars 2000 :** *arrêté ministériel : autorisation pour 5 ans d'exploiter à l'émergence et après transport l'eau du captage Natacha à un débit maximal de 45m³/h.*
- 2002 :** inspection vidéo et tests d'étanchéité du réseau d'assainissement.
- 2006 :** cimentation du forage RII
- février 2006 :** *arrêté ministériel : autorisation d'exploiter à l'émergence et après transport à distance l'eau du captage Natacha.*

Radiana I

Situation géographique : dans le lac, sur la berge SE. Coordonnées Lambert X=923 919 Y=65 530 Z=432 par rapport au fond du lac.

Réalisation : 7 tubes enfoncés dans le lac en 1887.

Profondeur : 4 à 7 m sous le sol.

Coupe géologique : non précisée.

Coupe technique : tubes enfoncés de 4 à 7m sous le sol, crépinés à leur base.

Historique :

. 1897 : premier captage sommaire par pointes crépinées de 30 à 60mm de diamètre et profonds de 3 à 14m.

. 1927 : captage renforcé par 8 nouvelles pointes battues,

. 1931 : curage du dispositif et pointe supplémentaire de 9m d'un débit supplémentaire de 26l/min

. 1984 : captage mis hors service et remplacé par RV.

. janvier 1997 : opération ANTEA avec la collaboration de SONDALP : arrachage des pointes.

Pompage : pas d'information

Débit artésien :

en 1930, 300l/min (18m³/h).

en 1931, 26l/min (1,56m³/h) en plus apporté par la neuvième pointe.

Exploitation :

. arrêté ministériel de 1930 : autorisation d'exploiter RI à un débit de 300 l/min.

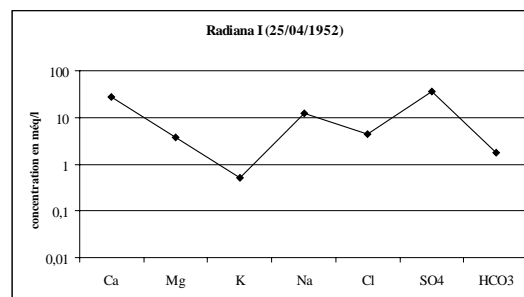
. colmatage progressif de 1930 à 1944.

. abandon en 1984

Eau captée :

température : 54°C en 1952, 47°C en 1980.

minéralisation :



bactériologie : organismes aérobies détectés en grand nombre (>5000) le 08/07/80.

Etat actuel : pointes arrachées depuis 1997.

Radiana II

Situation géographique : à 10m de la berge Est du lac. Coordonnées Lambert II : X= 923 950 ; Y=65 552 ; Z=423.2mNGF

Réalisation : réalisé par battage entre janvier et février 1944 sous le contrôle de la Direction Régional de l'Industrie et de la Recherche et sous l'impulsion de l'ingénieur Cuau.

Profondeur : 16,8m

Coupe géologique : non précisée.

Coupe technique :

. réalisé en 300mm de diamètre.

. repose à la base sur un bloc de béton de 15cm d'épaisseur.

. constitué d'un tube en Eternit de 100mm de diamètre crépiné sur les 80cm du fond du forage (système Cuau).

. au dessus, l'espace entre le tube Eternit et le tube du forage est cimenté.

. la tête du forage est protégée par un capot en acier et débouche dans une petite salle enterrée fermée par un couvercle étanche.

Historique : ce forage n'a jamais subi de modification de son équipement ni de réhabilitation.

Pompage : eau aspirée par une électro-pompe installée dans la salle d'urgence.

Débit artésien : 13,7l/min (0,8m³/h).

Exploitation :

. arrêté ministériel du 10 juillet 1950 : autorisation d'exploiter RII jusqu'au 27 janvier 1960.

. arrêté ministériel du 14 sept. 1987 : autorisation d'exploiter à l'émergence et après transport RII pour la buvette avec un débit de 20l/min (soit 1,2m³/h) ainsi que le mélange FIRA (RIII, RIV et RV). Débit maximal total pour les 4 sources : 400l/min.

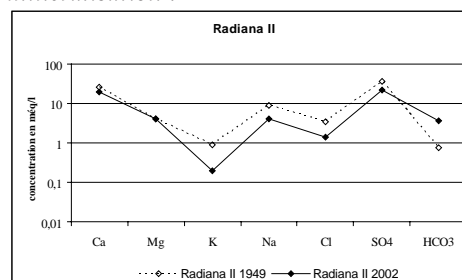
. RII a été exploité pour la buvette jusqu'en 1997.

. cimenté en 2006

Eau captée :

température : 48°C en 1949, 29°C en 2002.

minéralisation :



bactériologie :

. de 1989 à 1997, qualité satisfaisante à quelques exceptions près,

. à partir de 1997 : présence de microorganismes, de coliformes et de legionella pneumophilla,

. à partir de 1999, seules quelques analyses montre la présence de microorganismes et/ou de coliformes.

Etat actuel : pointes arrachées depuis 1997.

Radiana III

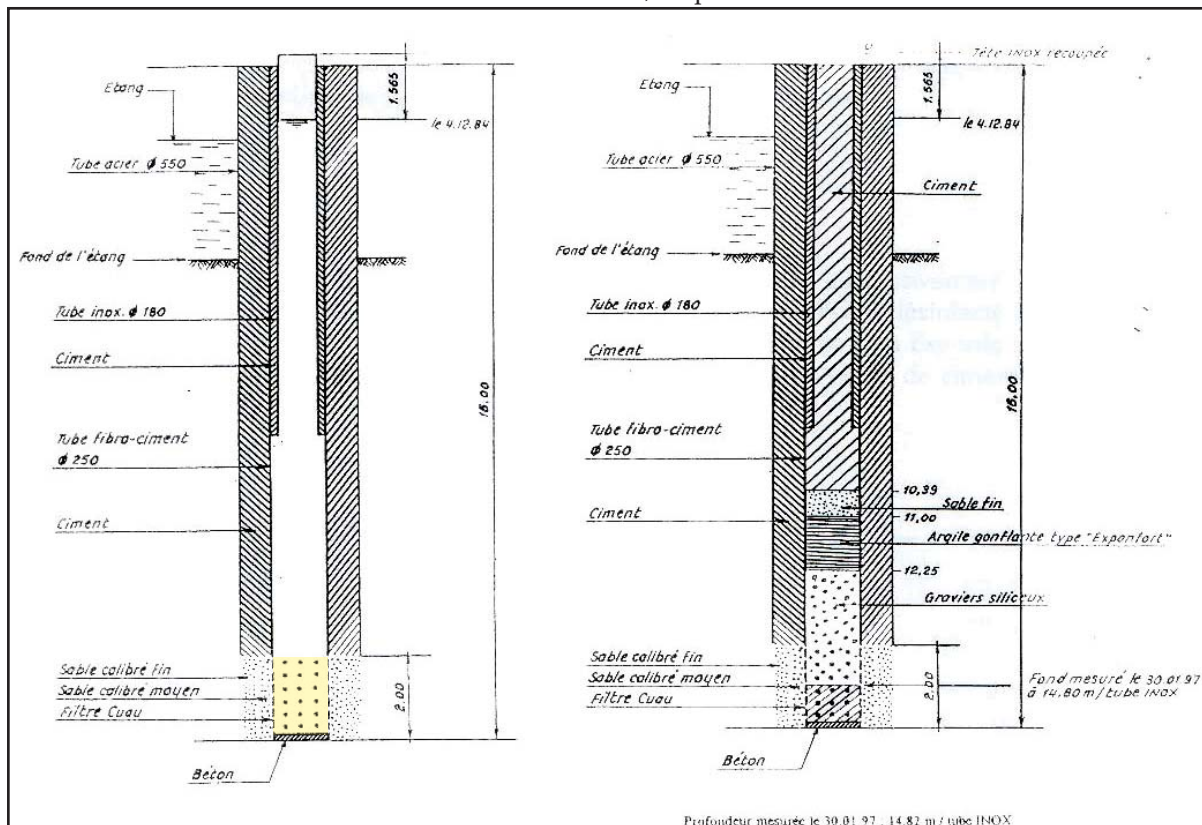
Situation géographique : dans le lac, sur la berge SE, à quelques m de RI. Coordonnées Lambert II : X=923 918 ; Y=65 534 ; Z=431,52mNGF (fond du lac)

Réalisation : foré en avril 1947.

Profondeur : 16m par rapport à la tête du forage, soit environ 11,5m depuis le fond de l'étang.

Coupe géologique : aucune coupe géologique.

Coupe technique : tubes enfoncés de 4 à 7m sous le sol, crépinés à leur base.



Historique :

. 1983 : pose d'un tube en inox sur 9m de la partie supérieure du forage et cimentation entre les deux tubages par l'entreprise MASSE puis nettoyage du forage.

. janvier 1997 : opération ANTEA avec la collaboration de SONDALP

essai d'arrachage de la pointe sans succès, mise en place d'un gravier désinfecté en face des crépines, surmonté d'un lit d'argile et d'un lit de sable, puis cimentation gravitaire jusqu'à la surface

. août-septembre 1998 : opération SOGREAH : cimentation en pression

Pompage : un tube de cuivre de 80mm de diamètre plonge de 2.2m dans la colonne de captage.

Débit artésien : 180l/min (10,8m³/h).

Exploitation :

. Arrêté ministériel du 10 juillet 1950 : autorisation d'exploiter RIII jusqu'au 27 janvier 1960.

. Arrêté ministériel du 14 sept. 1987 : autorisation d'exploiter à l'émergence et après transport de RIII avec un débit de 200l/min (12m³/h) ainsi que le

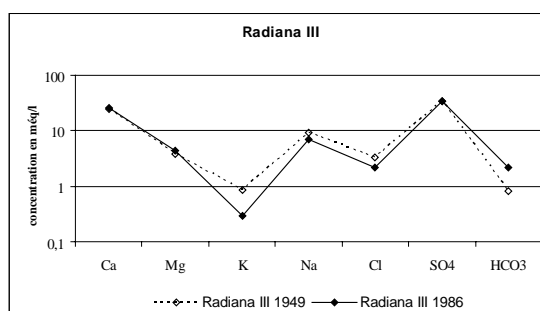
mélange FIRA (RIII, RIV et RV). Débit maximal total pour les 4 sources : 400l/min (24 m³/h).

. Abandon de l'ouvrage en janvier 1997.

Eau captée :

température : 51°C en 1949, 42,6°C en 1986.

minéralisation :



bactériologie :

. pollution bactériologique détectée en 1983 (microorganismes, coliformes et streptocoques) résorbée après les travaux de réfection de 1983.

. recrudescence en 1988 (microorganismes).

Etat actuel : forage cimenté en pression depuis 1998.

Radiana IV ou P20bis

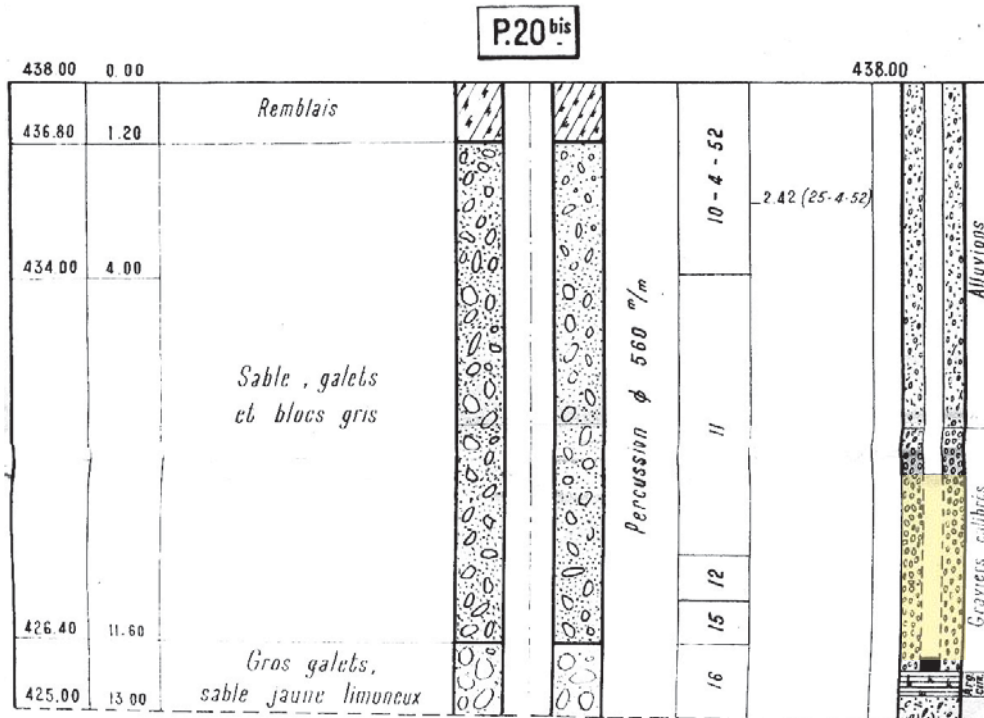
Situation géographique : à 5 m de la berge SE du lac, entre le lac et l'ancien Hôtel des Bains. Coordonnées Lambert II : X=923 931 ; Y=65529 ; Z=438.0mNGF

Réalisation : réalisé par battage au diamètre de 560mm en avril 1952 d'abord en tant que piézomètre dans le cadre de l'étude Soletanche.

Profondeur : 13m lors de la réalisation, et 9,5m après le terrassement effectué (quand ?).

Coupe géologique :

. de 0 à 11,6m : sables, galets et blocs gris.
. de 11,6 à 13m : gros galets, sable jaune limoneux.



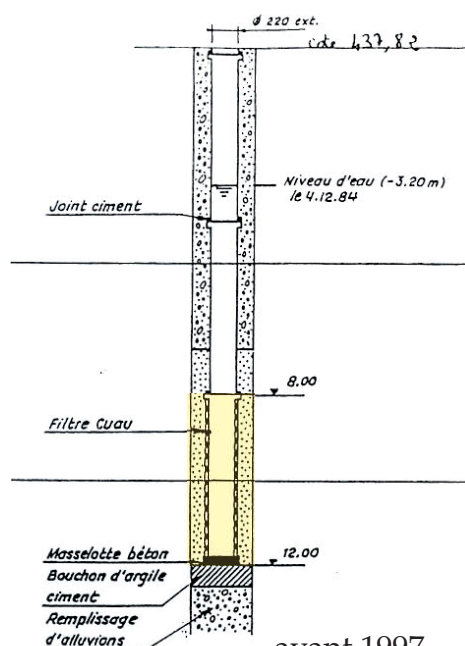
Coupe technique : . Repose sur un élément de béton lui-même posé sur un bouchon d'argile.

. Crépine de 8 à 12m de profondeur, protection Cuau.

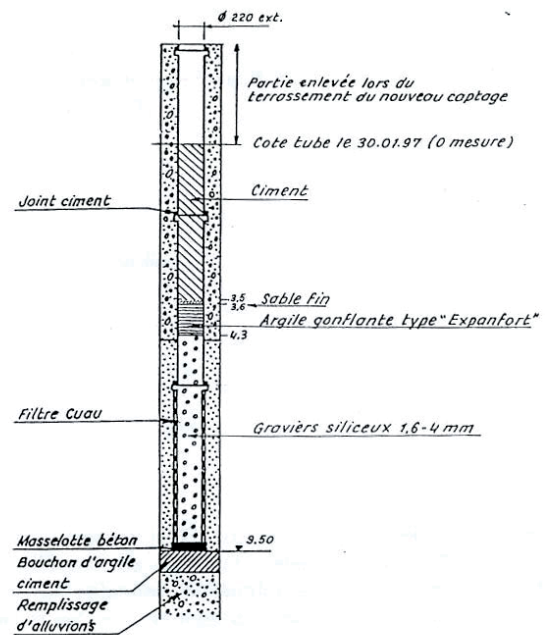
. Partie supérieure équipée de 2 tubes en fibrociment

de 220mm de diamètre.

. Espace entre les deux tubages rempli de graviers calibrés au niveau de la crépine et d'alluvions au niveau de la partie supérieure.



avant 1997



après 1997

Historique :

. 5 décembre 1983 : nettoyage par envoi d'air comprimé au fond de la crépine par l'entreprise MASSE

. janvier 1997 : opération ANTEA avec la collaboration de SONDALP

mise en place d'un gravier désinfecté en face des crépines, surmonté d'un lit d'argile et d'un lit de sable, puis cimentation gravitaire jusqu'à la surface

. août-septembre 1998 : opération SOGREAH : cimentation en pression

Pompage : groupe électro-pompe centrifuge ou pompe volumétrique installés dans la salle des pompes.

Débit artésien : 280l/min (16,8m³/h).

Exploitation :

. Arrêté ministériel du 28 juillet 1954 : autorisation d'exploiter RIV pour 30 ans.

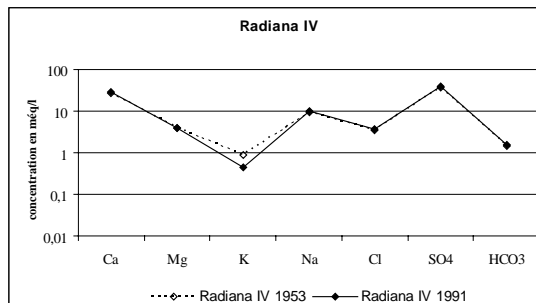
. Arrêté ministériel du 14 sept. 1987 : autorisation

d'exploiter à l'émergence et après transport de RIV avec un débit de 200l/min (12m³/h) ainsi que le mélange FIRA (RIII, RIV et RV). Débit maximal total pour les 4 sources : 400l/min (24m³/h).

Eau captée :

température : 51 en 1983, 41 en 1988.

minéralisation :



bactériologie : en 1990, absence de germes de contamination mais présence de Pseudomonas aeruginosa.

Etat actuel : cimenté en pression depuis 1998.

P3

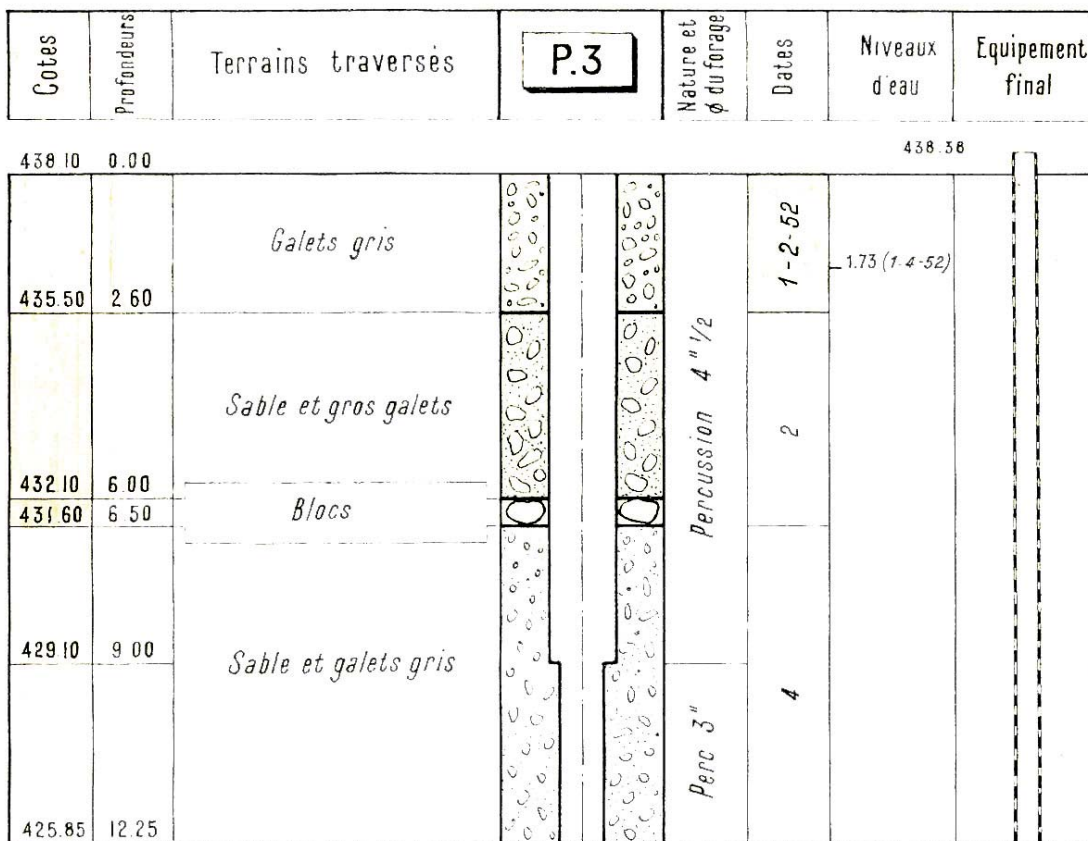
Situation géographique : sur la rive gauche de l'Isère, à environ 10m de la berge S du lac.

Réalisation : par battage entre le 1er et le 4 février 1952, dans le cadre de l'étude Soletanche.

Profondeur : 12,25m.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.



P4

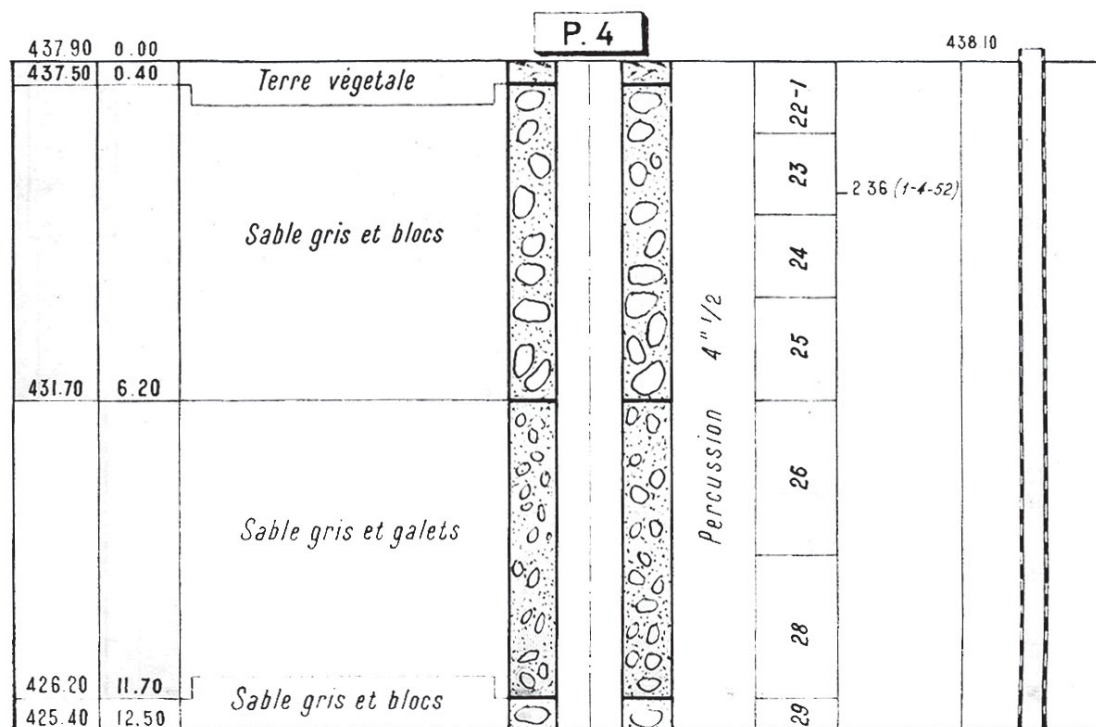
Situation géographique : sur la rive gauche de l'Isère, à 10m environ de la berge N du lac.

Réalisation : par battage entre le 22 et 29 janvier 1952, dans le cadre de l'étude Soletanche.

Profondeur : 12,5m

Coupe géologique : voir ci-dessous

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.

**P5, Olod et POlod**

Situation géographique : sur la rive gauche de l'Isère, à environ 10m de la berge NE du lac et à environ 40m de la rive gauche actuelle de l'Isère.

Réalisation : foré par percussion en gros diamètre entre le 26 février et le 25 mars 1952, dans le cadre de l'étude Soletanche.

Profondeur : 40m, équipé sur 21m en ouvrage de captage Olod. Un piézomètre POlod de 11m est réalisé juste à côté de Olod.

Coupe géologique : voir page suivante.

Coupe technique : voir page suivante.

- . bouchon de ciment entre 23 et 21m
- . crépine de type Cuau entre 17 et 21m
- . tube plein jusqu'à la surface constitué de 4 éléments cimentés et étanchés.

Historique :

. janvier 1997 : opération ANTEA avec la collaboration de SONDALP

mise en place d'un gravier désinfecté en face des crépines, surmonté d'un lit d'argile et d'un lit de sable, puis cimentation gravitaire jusqu'à la surface

. août-septembre 1998 : opération SOGREAH : cimentation en pression.

Pompage : aucune information.

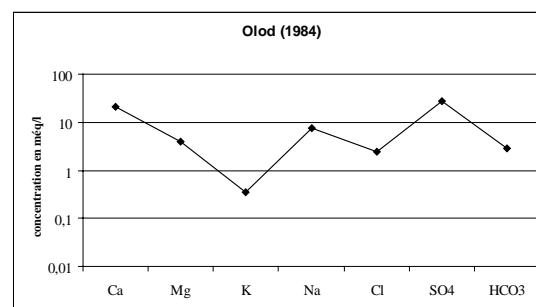
Débit artésien : aucune information.

Exploitation : aucune information.

Eau captée :

température : 32,5°C en 1952, 44°C en 1984

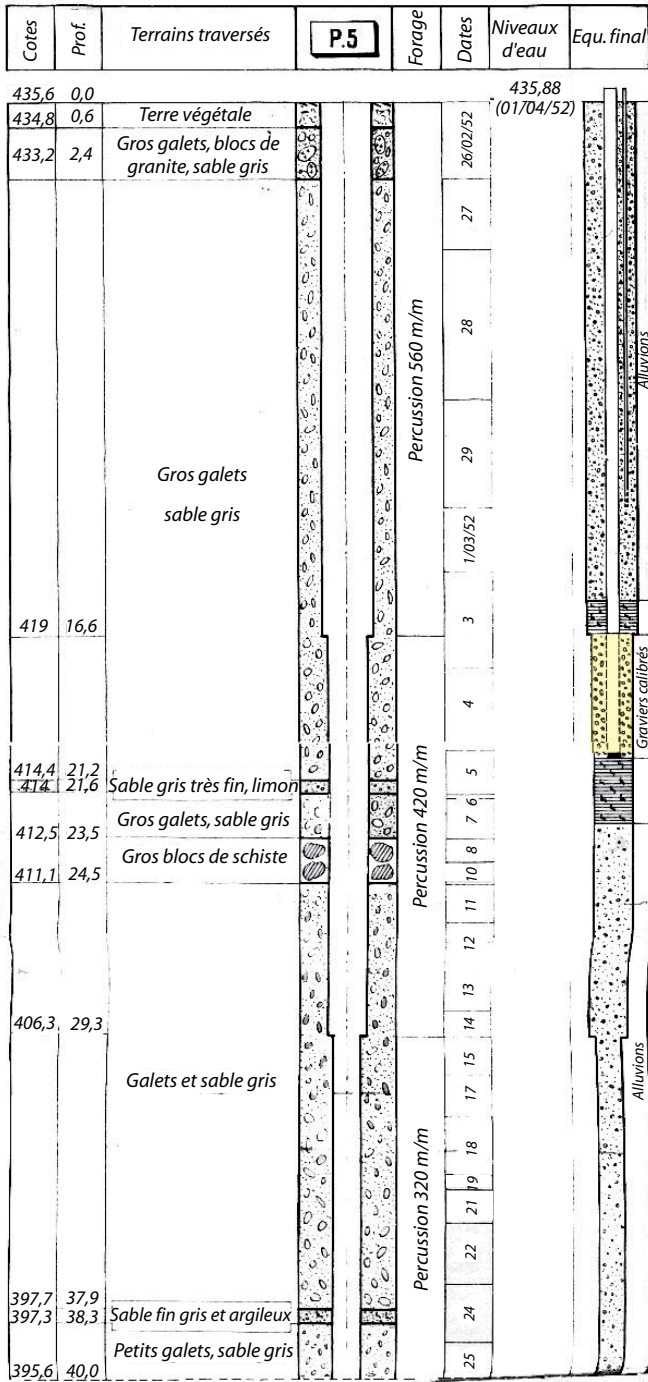
minéralisation :



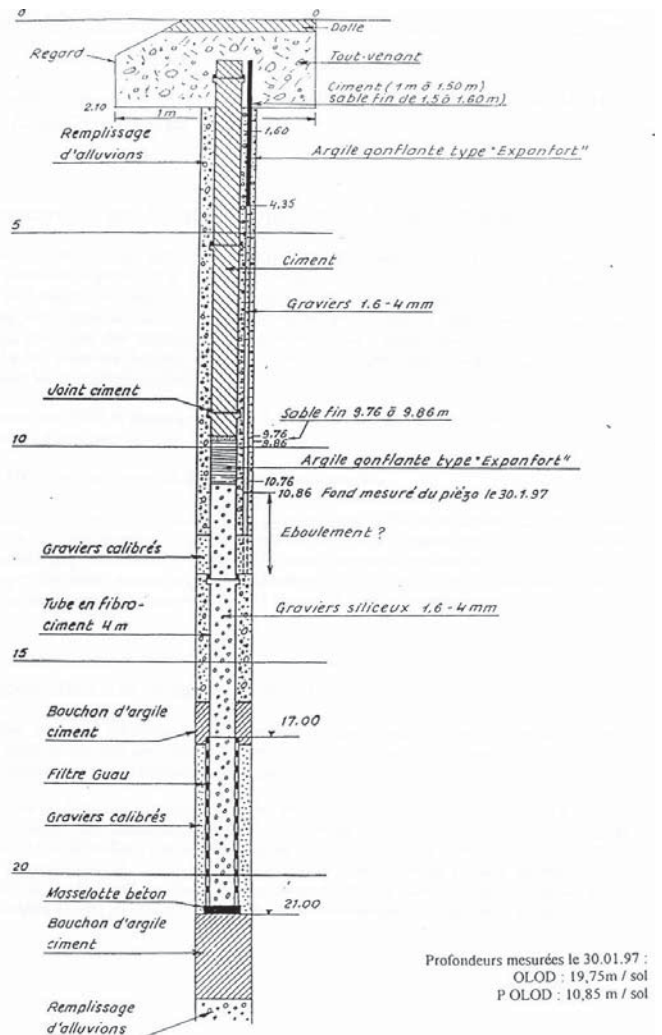
bactériologie : aucune information

Etat actuel : cimenté en pression depuis 1998.

P5, Olod et POlod



Coupe géologique et technique de P5 ou Olod



Coupe technique de Olod après rebouchage

P6

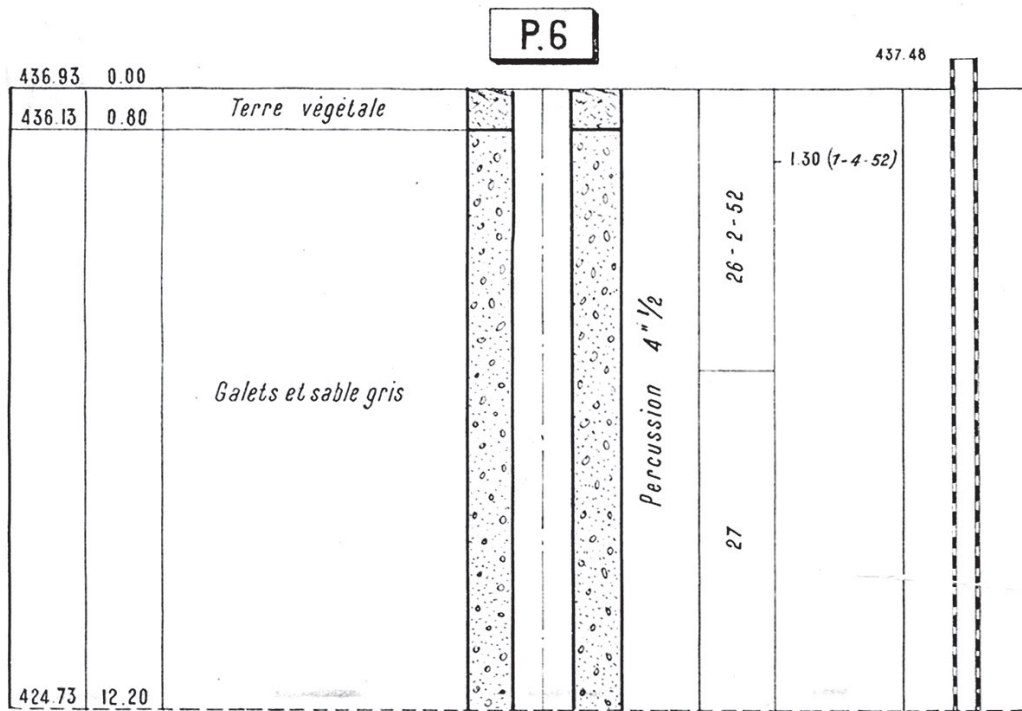
Situation géographique : sur la rive droite de l'Isère.

Réalisation : entre le 26 et le 27 février 1952, dans le cadre de l'étude Soletanche.

Profondeur : 12,2m.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.

**P7**

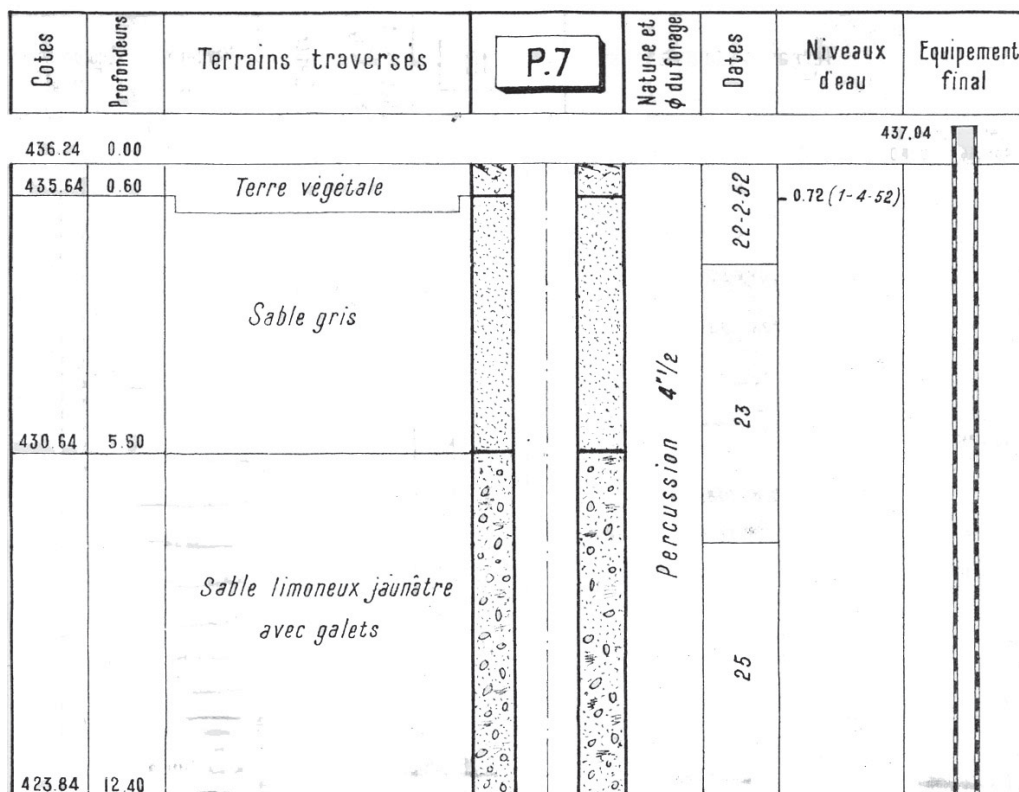
Situation géographique : sur la rive droite de l'Isère.

Réalisation : entre 22 et le 25 février 1952.

Profondeur : 12,4m.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.



P8

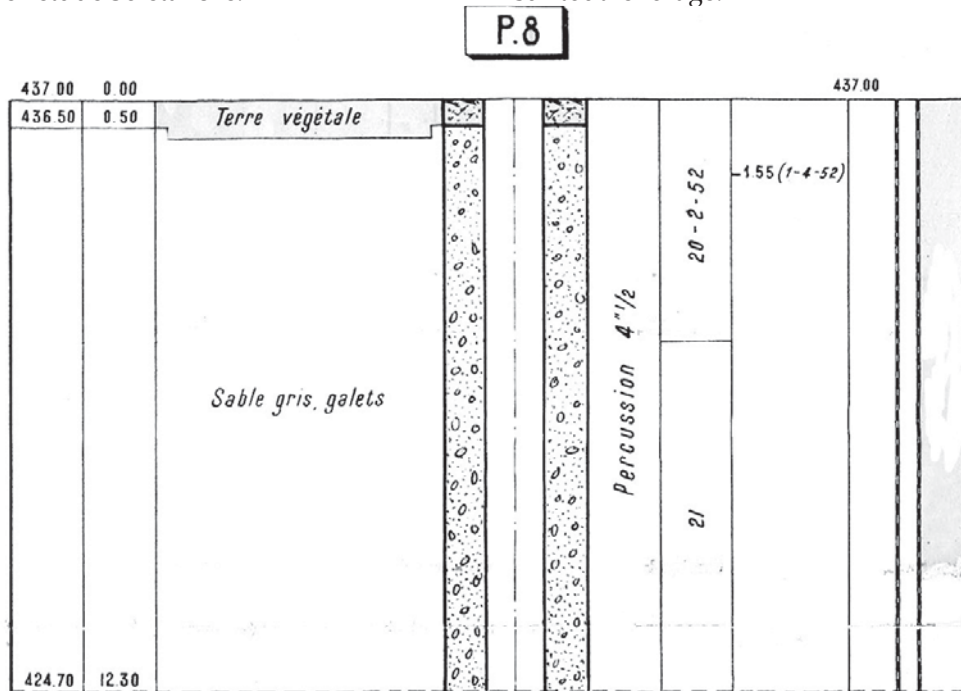
Situation géographique : sur la rive droite de l'Isère.

Profondeur : 12,3m.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Réalisation : entre le 20 et le 21 février 1952, dans le cadre de l'étude Soletanche.

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.



P9

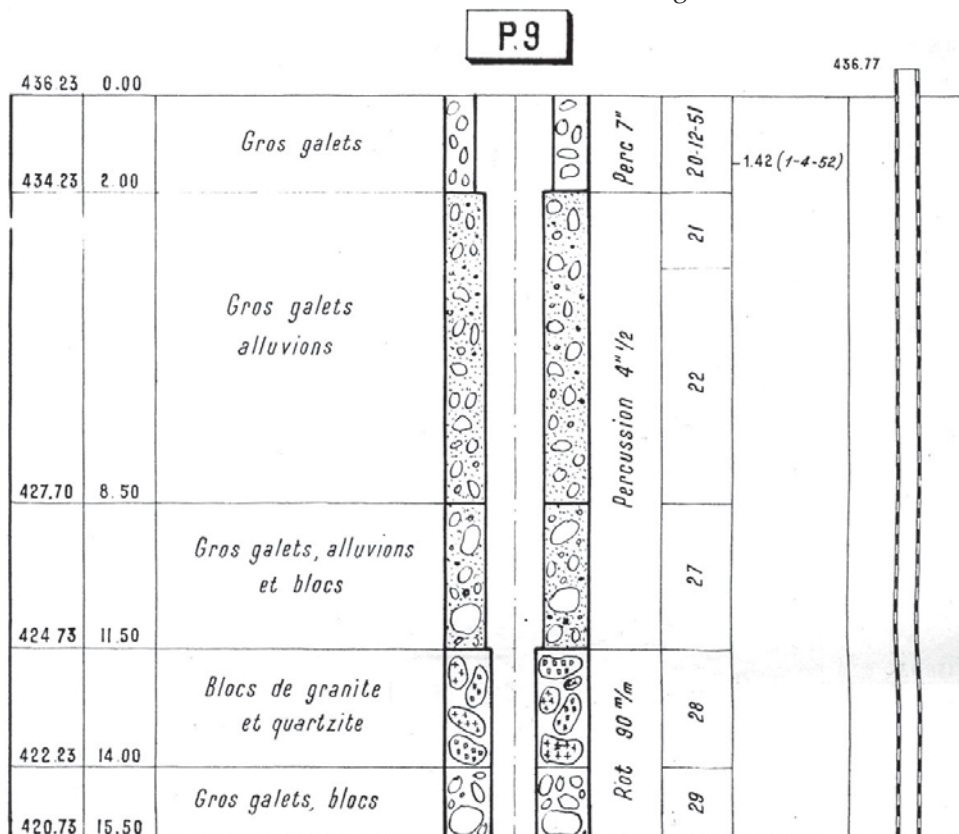
Situation géographique : sur la rive droite de l'Isère.

Profondeur : 15,5m.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Réalisation : entre le 20 et le 29 décembre 1951, dans le cadre de l'étude Soletanche.

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.



P10

Situation géographique : sur la rive droite de l'Isère.

Réalisation : entre le 31 décembre 1951 et le 12 février 1952, dans le cadre de l'étude Soletanche. Il était destiné à reconnaître l'hétérogénéité des alluvions.

Profondeur : 63,1m

Coupe géologique : voir ci-contre

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.

Cotes	Profondeurs	Terrains traversés	P.10	Heure et jour forage	Dates	Niveaux d'eau	Equipement final
436.35	0.00						
		Sable gris et gros galets					
430.76	5.60						
		Sable blanchâtre avec graviers et galets					
426.06	8.30						
		Sable et graviers avec galets moyens					
425.56	10.80						
		Sable et graviers gris avec galets de quartz					
421.86	14.90						
		Sable et graviers gris avec petits galets					
419.86	22.50						
		Sable et blocs de quartz					
411.26	25.10						
		Sable et galets moyens gris					
408.86	27.50						
		Sable et petits galets gris avec galets de quartz					
402.76	33.60						
401.31	35.05						
		Sable et graviers gris					
392.56	43.80						
		Sable et petits galets gris avec galets de quartz					
389.76	46.60						
		Sable gris assez gros					
381.76	54.60						
373.96	63.10						

P11

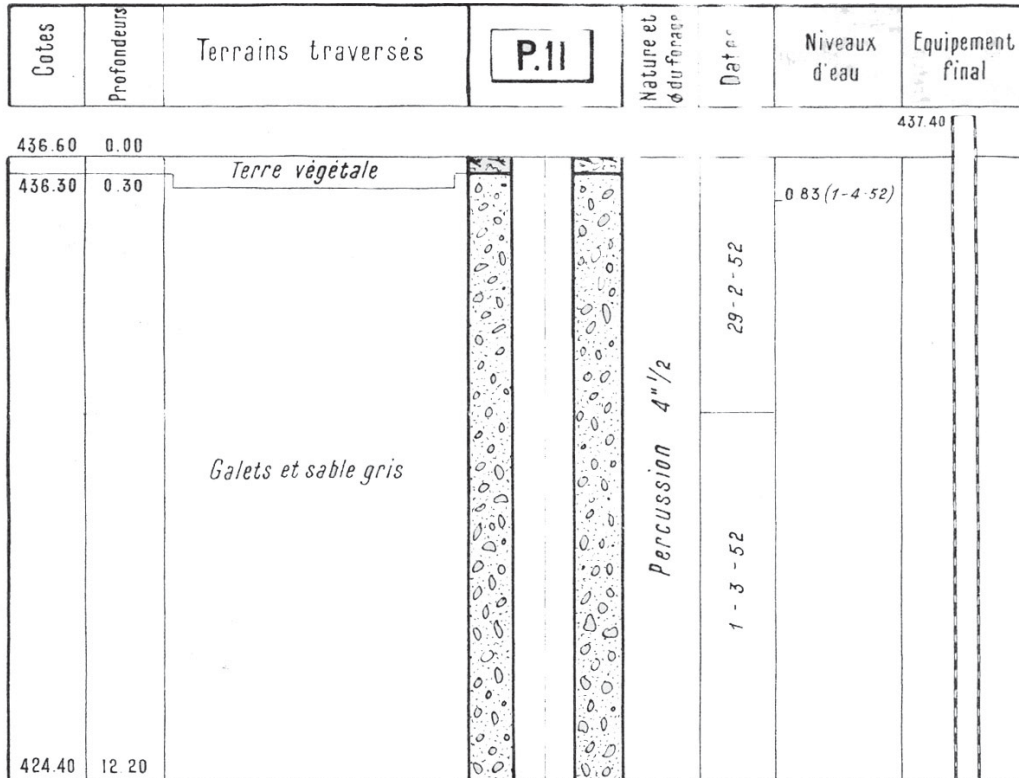
Situation géographique : sur la rive droite de l'Isère.

Profondeur : 12,2m.

Réalisation : entre le 29 février et le 1er mars 1952, dans le cadre de l'étude Soletanche.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.



P13

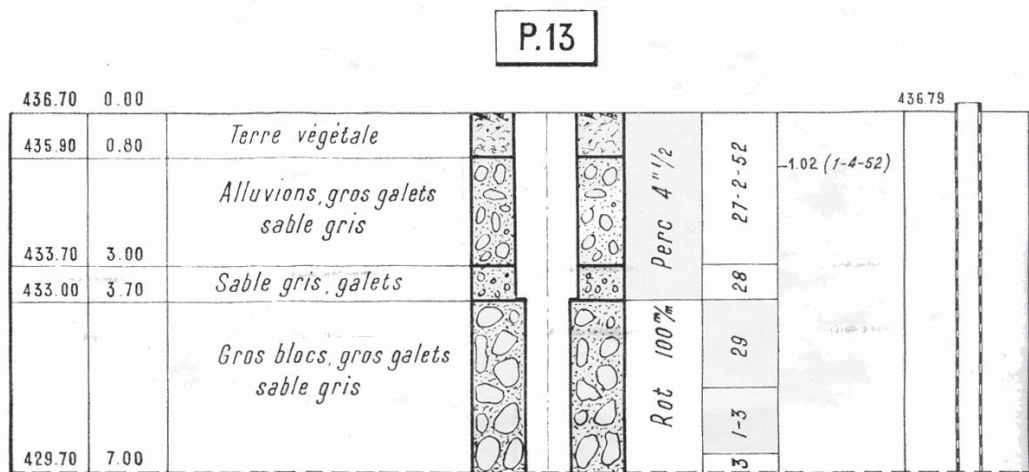
Situation géographique : sur la rive gauche de l'Isère, très éloigné des autres forages vers le N.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Réalisation : entre le 27 février et le 3 mars 1952, dans le cadre de l'étude Soletanche.

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.

Profondeur : 7m.



P15

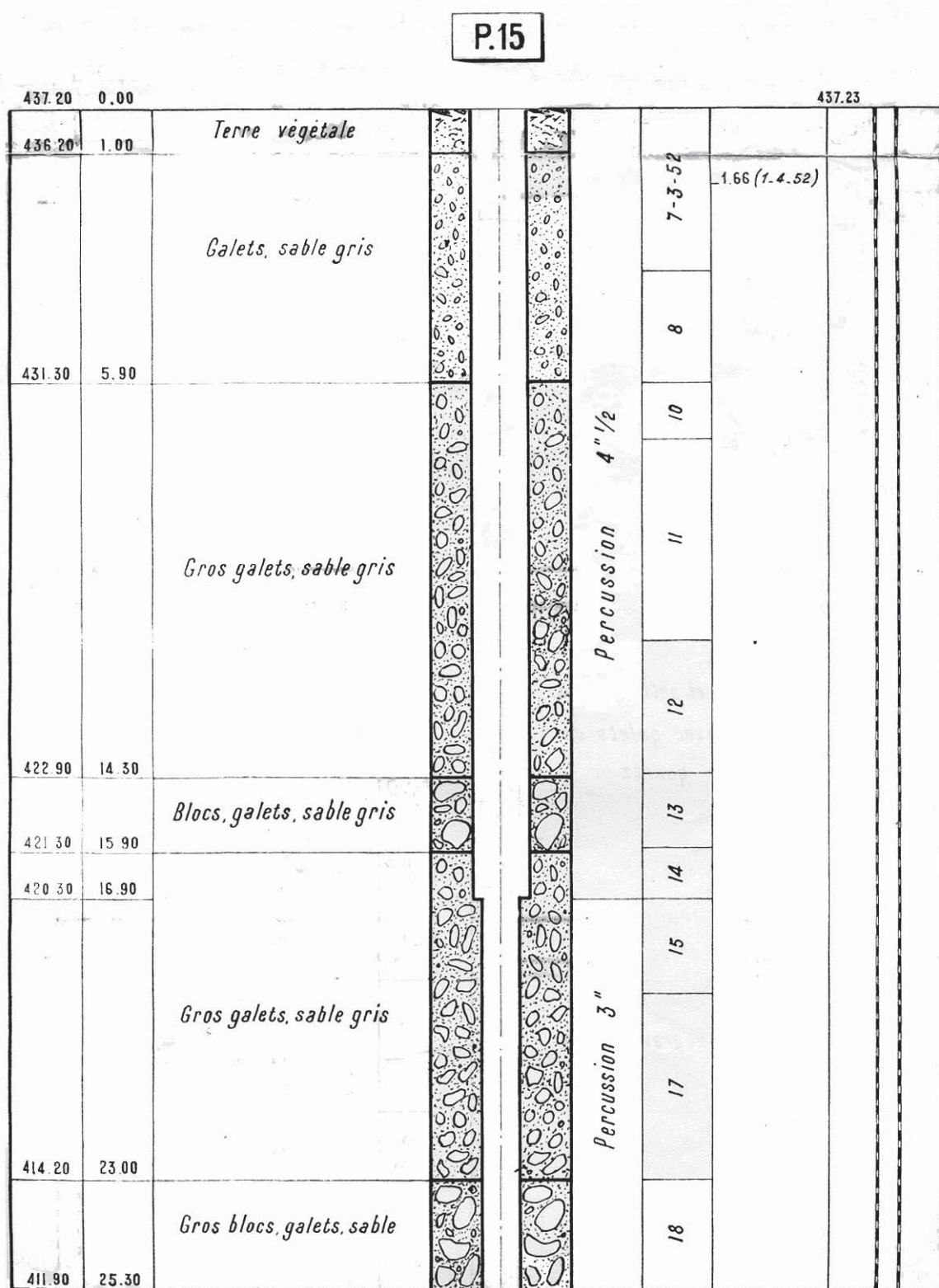
Situation géographique : sur la rive gauche de l'Isère, entre Hôtel Radiana et le lac.

Profondeur : 25,3m.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Réalisation : entre le 7 et le 18 mars 1952, dans le cadre de l'étude Soletanche.

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.



P16

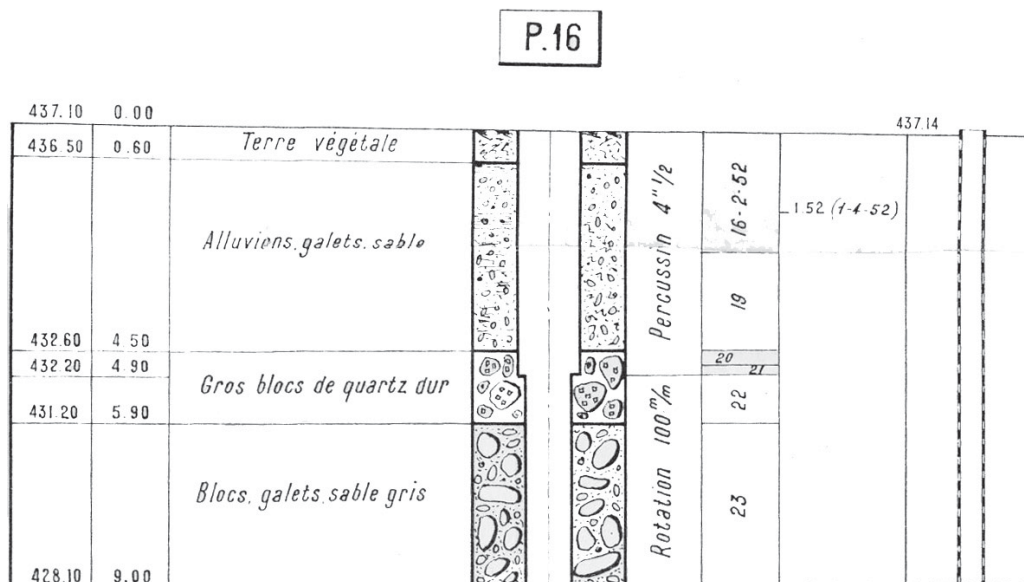
Situation géographique : sur la rive gauche de l'Isère, à environ 20m au NNE de l'Hôtel Radiana.

Réalisation : entre le 16 et le 23 février 1952.

Profondeur : 9m.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.



P17

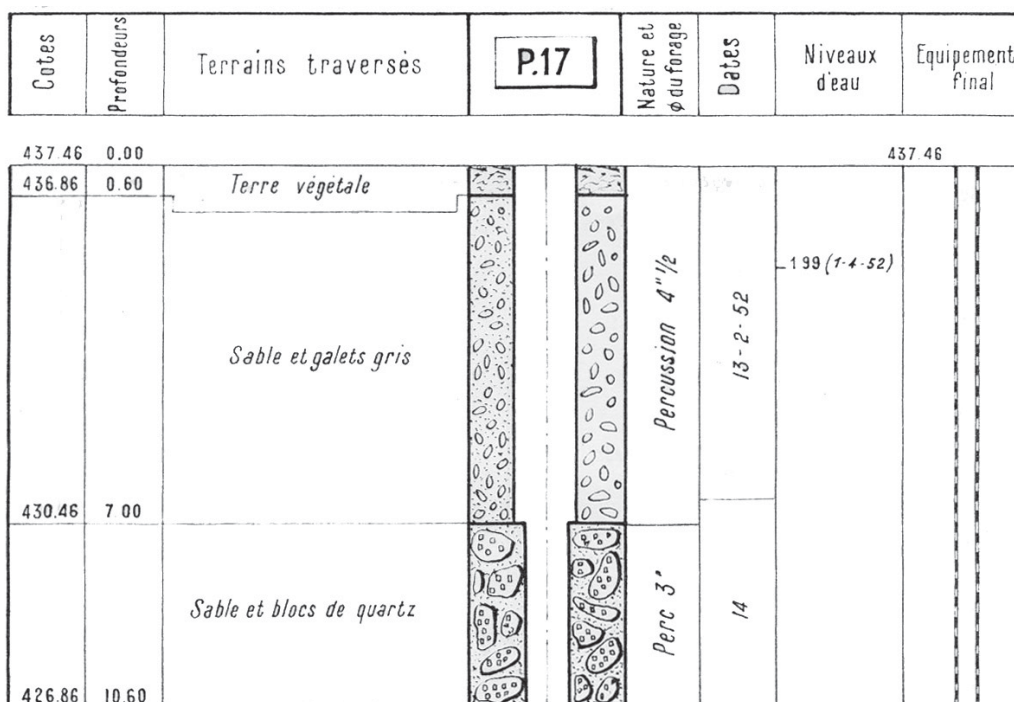
Situation géographique : sur la rive gauche de l'Isère, à environ 40m au NE de l'établissement des bains.

Réalisation : entre le 13 et le 14 février 1952, dans le cadre de l'étude Soletanche.

Profondeur : 10,6m.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.



P18

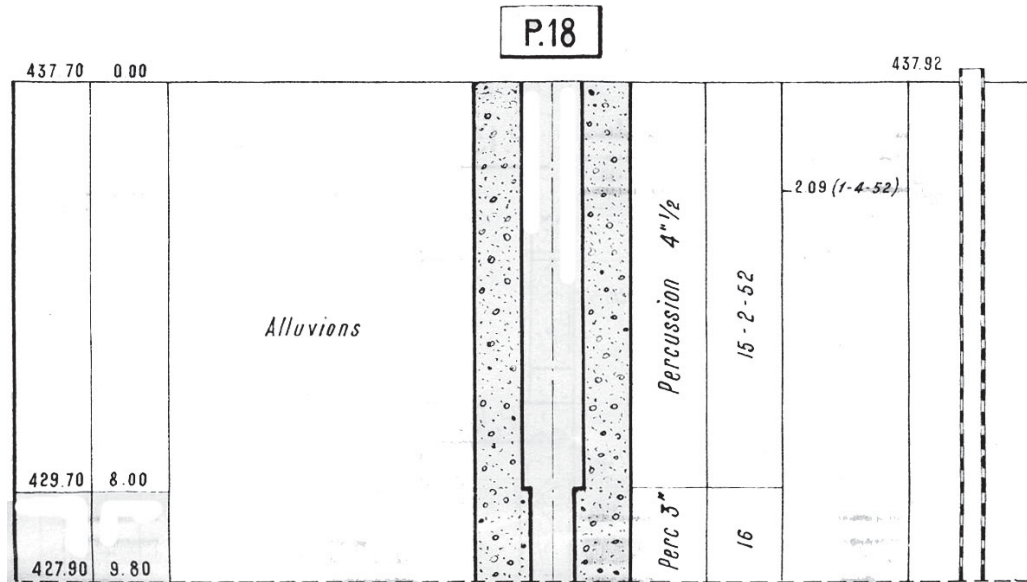
Situation géographique : sur la rive gauche de l'Isère, à environ 20m de l'établissement des bains.

Réalisation : entre le 15 et le 16 février 1952, dans le cadre de l'étude Soletanche.

Profondeur : 9,8m.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.

**P19**

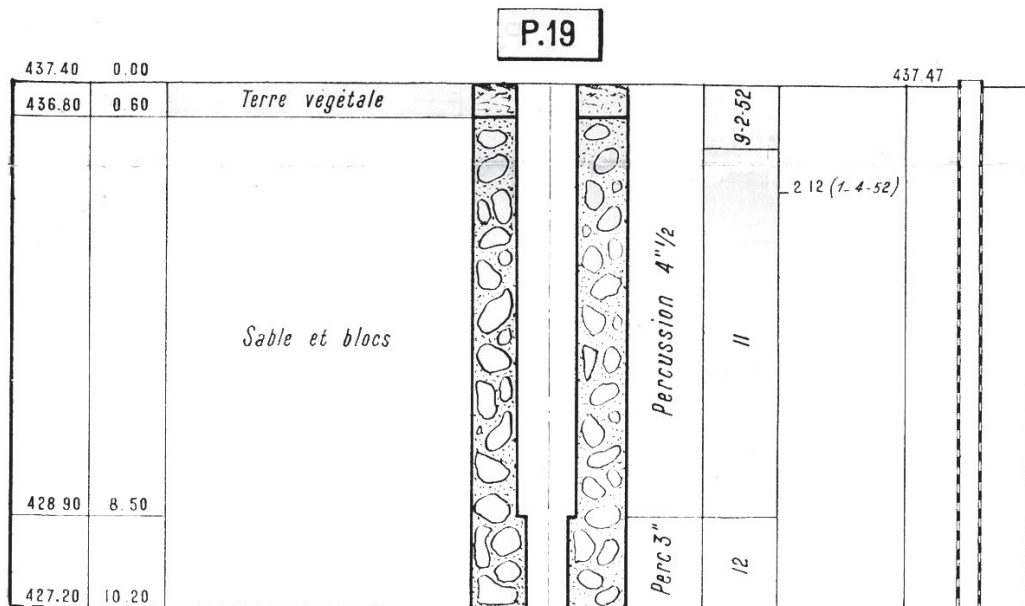
Situation géographique : sur la rive gauche de l'Isère, à environ 15m de la berge N du lac.

Réalisation : entre le 9 et le 12 février 1952, dans le cadre de l'étude Soletanche.

Profondeur : 10,2m.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.



P20

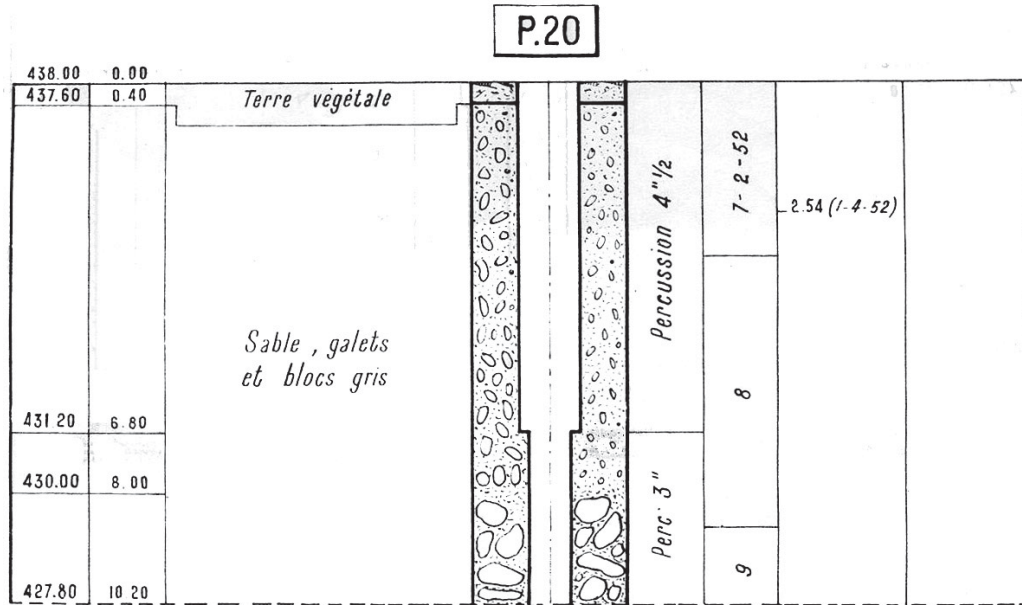
Situation géographique : sur la rive gauche de l'Isère, superposé à P20bis ou RadianaIV.

Réalisation : entre le 7 et le 9 février 1952, dans le cadre de l'étude Soletanche.

Profondeur : 10,7m.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.



P21

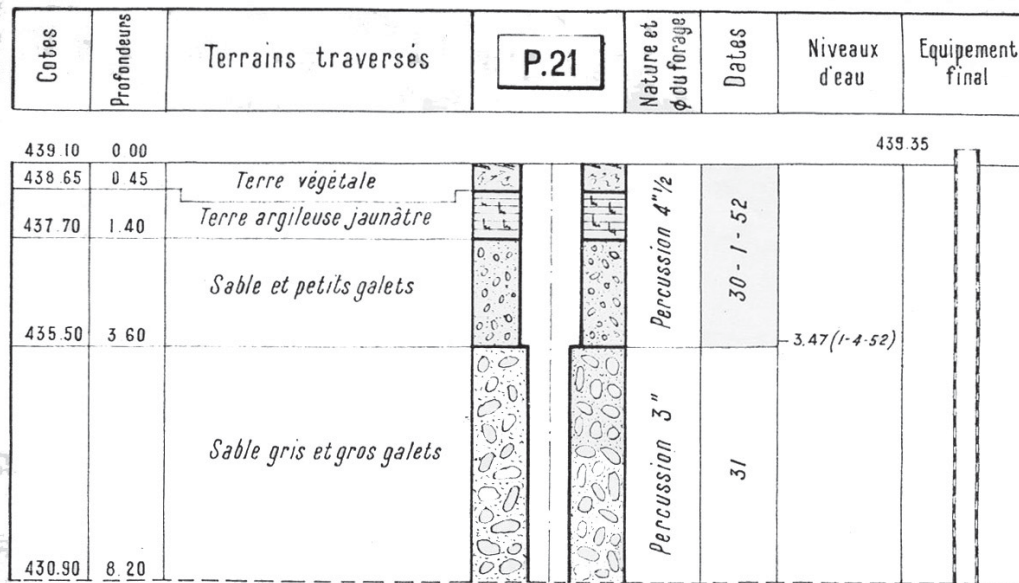
Situation géographique : sur la rive gauche de l'Isère, à 3m de la berge NW du lac.

Réalisation : entre le 30 et le 31 janvier 1952, dans le cadre de l'étude Soletanche.

Profondeur : 8,2m.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.



P22

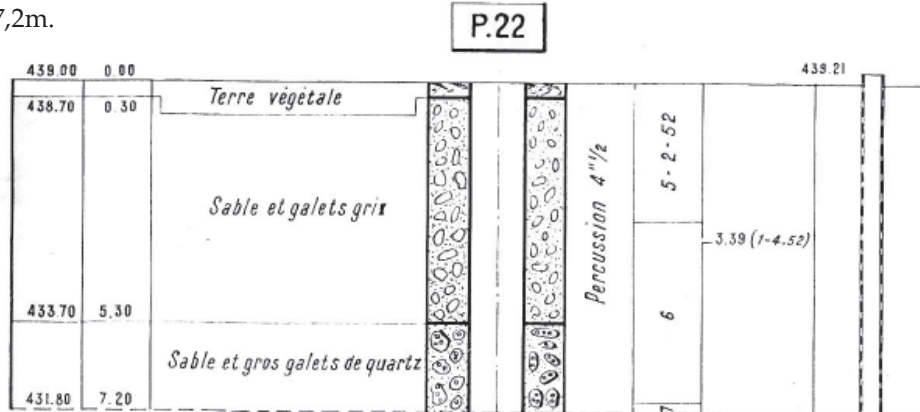
Situation géographique : sur la rive gauche de l'Isère, à environ 30m de la berge S du lac.

Réalisation : entre le 5 et le 6 février 1952.

Profondeur : 7,2m.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Coupe technique : équipé en piézomètre, crépine sur tout le forage.

**PQ**

Situation géographique : sur la rive gauche de l'Isère, à environ 40m de la berge NE du lac.

Réalisation : par percussion en gros diamètre entre le 1er et le 5 avril 1952 dans le cadre de l'étude Soletanche, implanté d'après les résultats de la

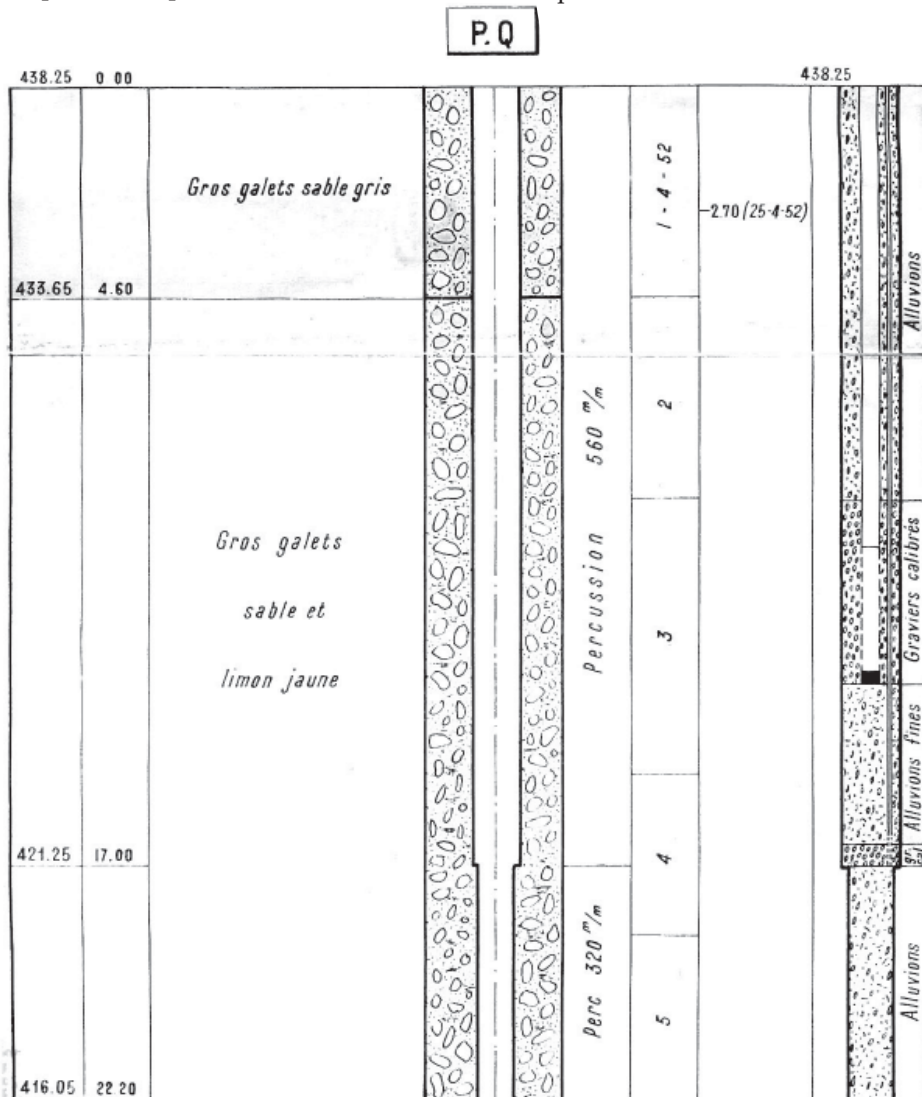
prospection électrique.

Profondeur : 22,2m.

Coupe géologique et technique :

. crépine entre 16 et 17m.

. dispositif filtrant entre 13 et 12m.



F1

Situation géographique : à environ 5m de la berge SE du lac.

Réalisation : du 30 novembre au 2 décembre 1982 par l'entreprise MASSE, il a été arrêté à cause de l'apparition de fissures sur le façade de l'Hôtel.

Profondeur : 14m.

Coupe géologique et technique : aucune information.

Historique :

. mars 1998 : opération ANTEA : cimentation après nettoyage par air-lift, stérilisation, mise en place de graviers siliceux au droit des crépines.

. août-septembre 1998 : opération SOGREAH : cimentation en pression

Exploitation : non exploité

Etat actuel : cimenté en pression depuis 1998.

F2 ou Radiana V

Situation géographique : à 5 m de la berge SE du lac, entre le lac et l'ancien Hôtel des Bains. Coordonnées Lambert II : X= 923 927 ; Y=65 527 ; Z=438.0mNGF

Réalisation : réalisé du 1er au 5 décembre 1983 par l'entreprise MASSE (Tournay Boutonne en Charente-Maritime).

Profondeur : 22,6m.

Coupe géologique : seule indication : formation fluviatile de sables et graviers.

Coupe technique :

. Crépine sur 4m de 17.35 à 21.35m de profondeur entourée d'un massif filtrant.

. colonne principale constituée par un tubage en inox de 180mm de diamètre et de 23,95m de long.

. trois colonnes de 406, 322 et 244mm sont télescopées et ont servi de tube de soutènement à l'avancement du forage.

. tous les espaces inter-annulaires sont cimentés.

Historique :

. se substitue à Radiana I en 1984.

. janvier 1997 : opération ANTEA avec la collaboration de SONDALP : phase de broyage, air lift, acidification, air lift et contrôle vidéo

. août-septembre 1998 : opération SOGREAH : cimentation en pression

Pompage : groupe électro-pompe centrifuge à axe horizontal installé en 1984 dans la salle des pompes.

Exploitation :

. se substitue à Radiana I en 1984.

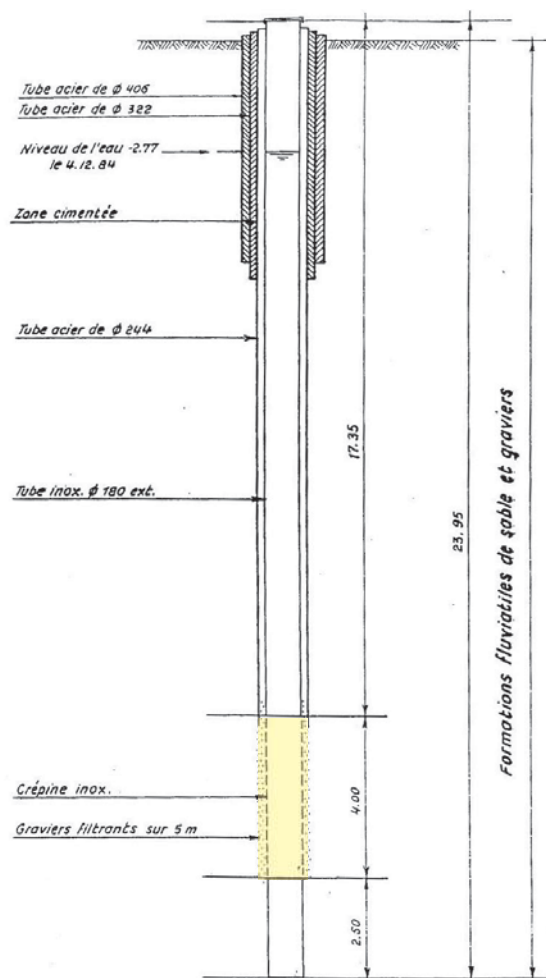
. Arrêté ministériel du 14 sept. 1987 : autorisation d'exploiter à l'émergence et après transport de RV avec un débit de 200l/min ainsi que le mélange FIRA (RIII, RIV et RV). Débit maximal total pour les 4 sources : 400l/min.

. 1996 : exploitation à un débit de 20m³/h (en même temps que RVII à un débit de 42m³/h)

Eau captée :

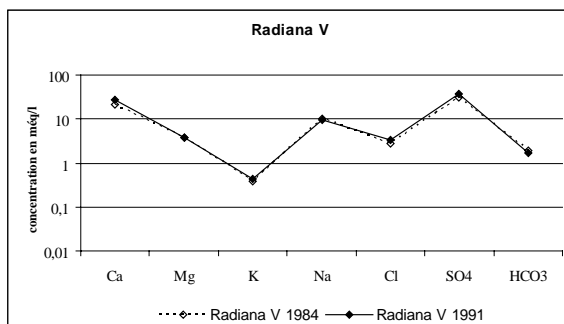
température : 47°C en 1984 , 48°C en 1996.

minéralisation : voir ci-contre



bactériologie : la qualité bactériologique de ce forage est marquée par des contaminations ponctuelles (microorganismes à 37°C >1000 en 1988, legionelles : 65000 en 1996).

Etat actuel : cimenté en pression depuis 1998.



Radiana VI

Situation géographique : à environ 10m du lac, sur la berge N. X=923,84 Y=65,88 Z=437,45m.

Réalisation : foré à la boue en novembre 1986 par l'entreprise INTRAFOR-COFOR sous maître d'œuvre BRGM. **Profondeur :** 71,5m.

Coupe géologique (ci-contre):

- . de 0 à 61m : alluvions et colluvions
- . de 61 à 62 m : marnes
- . de 62 à 71,5m : calcaires noirs recristallisés (Trias) eau à 47°C entre 15 et 60m puis à 24°C entre 60 et 70m.

Coupe technique :

- . de 0 à 19,05m : tubage en acier de 7" doublé d'un tube en inox de 150-156mm espace inter-annulaire cimenté
- . de 19 à 68,5m : tube en PVC de 4"1/2 télescopé dans le tube en inox (le télescopage n'est pas étanche)
- . de 57 à 68,5m : crépine

Historique :

- . mise en exploitation en 1990
- . demande d'autorisation d'exploiter le mélange RVI/RVII en 1993 échoue
- . abandon en 1993 pour cause de problèmes bactériologiques
- . mars 1998 : opération ANTEA : obturation

(graviers lavés, argile expansive, sable fin) après désinfection (air-lift, acidification, air-lift)

. août-septembre 1998 : cimentation en pression par SOGREAH

Pompage : l'eau est pompée mais aucune information trouvée

Débit artésien : aucune information.

Exploitation :

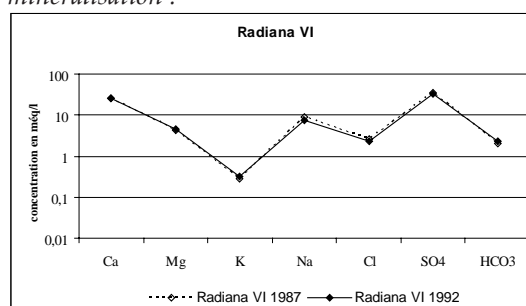
. mise en exploitation en 1990 à un débit de 30m³/h en même temps que RVII (42 m³/h)

. abandon en 1993

Eau captée :

température : 45,2 en 1987, 43°C en 1992.

minéralisation :



bactériologie : présence de légionelles à partir de 1991.

Etat actuel : cimenté en pression depuis 1998.

Radiana VI

COUPE TECHNIQUE SIMPLIFIEE	Prof (m)	GEOLOGIE	Température (°C)	Conductivité (mS/cm)	Vitesse d'avancement (mm/m)	OBSERVATIONS	
	0	Alluvions			2	25.11.86	
		Calcaire argileux			2	Forage 8 ¹ / ₂	
					2	Eboulement à 3.50 m	
	5				4		
					15		
					3		
					8		
					4		
				13.0	3.01	3	
						4	
				11.9	4.98	2	26.11.86
						4	Eboulement à 12.00 m
				11.4	4.86	2	Reforage en 9 ⁵ / ₈
						3	
						4	
						2	
			Colluvions			5	
				12.1	4.73	6	
				13.1	6.83	7	
				12.4	7.00	22	27.11.86
				13.0	7.20	8	Forage en 6 ¹ / ₄
						7	Ajout de 50 kg de bentonite
				13.3	7.27	7	
						10	
				14.5	7.30	8	
						7	
				14.8	10.23	8	
						2	
						2	
						1	
					2		
					1		
					4		
					3		
			16.8	10.48	7		
			17.1	12.17	14		
			17.2	11.84	2		
			17.5	11.82	3		
					3		
					14		
			18.8	11.37	8		
			18.9	11.33	3		
			19.2	10.90	3		
			19.6	11.40	3		
			19.5	10.64	5	Ajout tiges	
			19.5	10.79	3		
					18		
			20.4	10.76	12		
					17		
			21.6	10.61	10		
					6		
			21.0	9.96	7	Ajout 50 kg bentonite	
					3	+ 50 kg de soude	
					3		
			21.2	9.56	6		
			21.2	9.68	9		
					5		
					3		
					2		
		Marnes	21.4	8.88	16	Crépine de 57 à 68.50	
			20.5	8.48	2		
					5		
					5		
		Calcaire noir	20.4	8.30	5		
		Recristallisation de calcite et quartz			13		
			20.5	8.25	7		
			20.7	8.24	4		
					2		
					1		
					1	Arrêt à 71.50	

Radiana VII

Situation géographique : à moins de 10m du lac, sur la berge S, proche de RV. X=923,85 Y=65,83 Z=438,23

Réalisation : réalisé en 1986 par l'entreprise INTRAFOR-COFOR sous maître d'œuvre BRGM.

Profondeur : 80m.

Coupe géologique (page suivante):

- réalisée à partir des cuttings remontés pendant la foration de 1986 :

. de 0 à 69m : alluvions de l'Isère avec une zone concrétionnée de 54 à 69m.

. de 69 à 74m : éboulis de marnes liasiques (colluvions)

. de 74 à 80m : alluvions

. 80m : gypse (ouvrage stoppé dès l'apparition du gypse)

présence de cavités à 70 et 78m (mises en évidence par des pertes de boue au moment du forage)

température maximale de l'eau observée à 71m (plus bas, l'eau refroidit)

- interprétée à partir de la diaggraphie γ ray réalisée en août 1998 sur le forage équipé :

. de 0 à 54m : alluvions de l'Isère

. de 54 à 69m : formation alluviale cimentée par les eaux thermales

. de 69 à 74m : calcaires ou quartzites ?

. de 74 à 75m : venue d'eau thermale

. de 75 à 79m : gypse

. de 79 à 81m : argilites

Coupe technique :

Avant 1998 :

. de 0 à 31m : tubage PVC 12''3/8

. de 30 à 80m : tubage PVC 4''1/2 plein de 27,55 à 56,3m et crépiné de 56,3 à 79,3m.

. les télescopes entre les tubes en PVC ont été cimentés sur 3m environ

Après vérification de la coupe technique par diaggraphie CBL et VDL, il est apparu que les cimentations inter-annulaires ainsi que celle situées entre la paroi du forage et le tubage sont inefficaces.

Après 1998 : Rééquipement complet de l'ouvrage

. de 0 à 45,2m : tube en inox de 9''5/8

. de 0 à 81m : tube en inox de 6''1/4

. le télescope est cimenté

. ancrage des deux tubages dans la paroi du forage

. open-hole de 69,6 à 74m

Historique :

. janvier 1997 : opération ANTEA avec la collaboration de SONDALP : phase de broyage, air lift, acidification, air lift et contrôle vidéo.

. mars 1997 : pompages de qualification sur RX et RVII mené par ANTEA

- 11 mars : pompage par paliers sur RX avec RVII à un débit nominal de 43,5m³/h

- 12 mars : pompage par paliers sur RX avec RVII arrêté

- du 12 au 31 mars : pompage longue durée sur RX avec RVII arrêté

. automne 1997 : pompage de qualification mené par ANTEA

du 30/10 au 04/12 pompage longue durée sur RX et RVII au débit nominal de 43,5m³/h

. mars 1998 : opération ANTEA : nettoyage de RVII, cimentation d'un télescope défectueux qui a mené à l'obturation fortuite du forage par un bouchon de ciment à la cote -28m et à la détection d'une fuite sur le tube supérieur à la cote -7m.

. août-sept. 1998 : réhabilitation menée par SOGREA

- destruction ou extraction des tubages et crépines

- rééquipement du forage par la mise en place de 2 tubages inox cimentés en pression et ancrés dans le rocher à 70m de profondeur dans le but de capter l'eau thermale dans le substratum rocheux

Pompage : l'eau est pompée mais aucune information trouvée

Débit artésien : 8m³/h. RVII rééquipé en 1998 produisait un débit artésien de 19m³/h (lorsque RXI était en production).

Exploitation :

. mise en exploitation en 1990 au débit de 42m³/h.

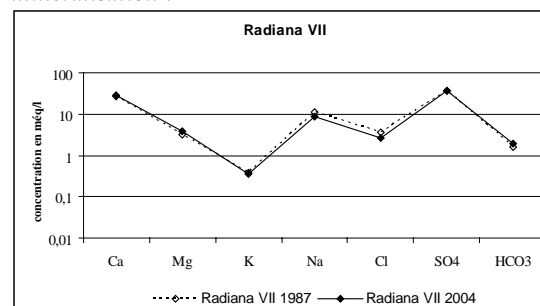
. 6 av. 1994 : autorisation provisoire d'exploiter RVII à un débit de 42m³/h.

. en 1996, exploitation à un débit de 42m³/h (en même temps que RV à un débit de 20m³/h).

Eau captée :

température : 54°C en 1987, 47°C en 2004.

minéralisation :



bactériologie :

. identification de légionelles en mars 1997, pendant l'essai de pompage,

. cette contamination persiste même après la désinfection poussée de l'aquifère réalisée en 1998,

. elle s'intensifie jusqu'à atteindre 140000 unités le 29/03/00,

. elle persiste jusqu'à aujourd'hui (analyse du 29/12/04: 23000unités).

Radiana VII : coupe levée à partir des cuttings

Etat actuel : forage ré-équipé mais non exploité. niveau dynamique, sa température, sa composition Il est maintenu avec un débit de 0,5m³/h. Son chimique et sa bactériologie sont suivis.

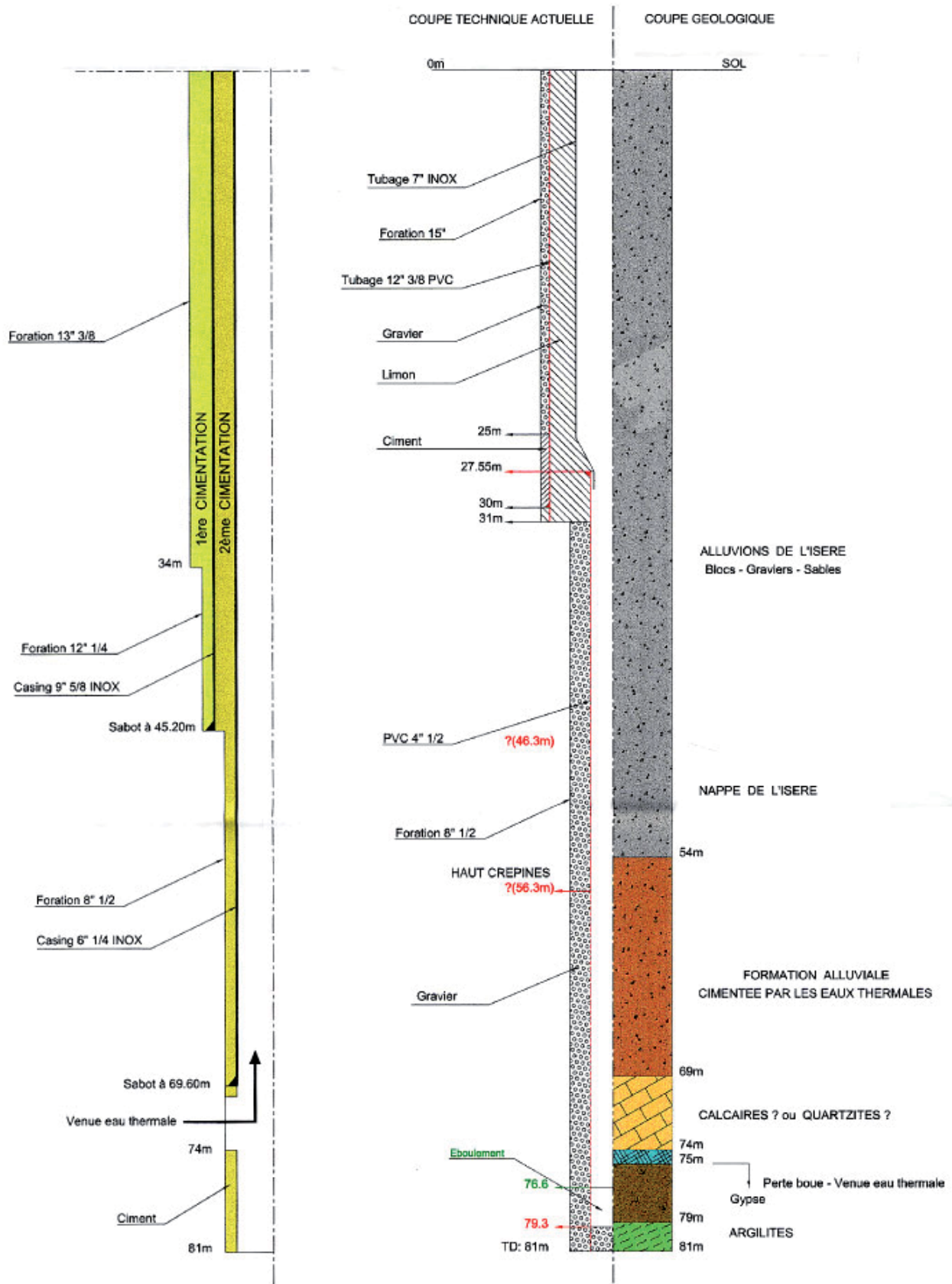
RECAPITULATIF DES CARACTERISTIQUES DU FORAGE RADIANA VII

COUPE TECHNIQUE SIMPLIFIEE	Prof (m)	GEOLOGIE	Température (°C)	Conductivité (mS/cm)	Vitesses d'avancement (mm/m)	OBSERVATIONS
	0				50	8.12.1986
	5	0 (NGF: 437.09) Cote / bride INOX forage (station de pompage)			35	Blocs durs
	10	Graviers emoussés, subarrondis avec quelques arrondis francs > 90% de métamorphique + quartz			65	Forage 15"
	15				100	
	20				120	
	25				80	
	30				80	
	35				70	
	40				50	
	45				60	
	50				40	
	55				30	
	27.55			20		
	30.00			14		
	26.02 (NGF: 411.07)			14		
	30			18		
	35			20		
	40			15		
	45			17		
	50			17		
55			10			
60			14			
65			20			
70			14			
75			18			
80			12.6	3.51	6	9.12.1986
			12.8	3.49	4	Forage 8" 1/2
			13.2	3.43	9	
			13.5	3.35	7	
			14.4	3.64	7	
			14.8	3.78	6	
			14.9	3.69	6	
			15.9	3.72	10	
			15.7	3.65	16	
			17.4	3.24	7	
			17.4	3.24	5	
			18.0	3.4	4	
			17.3	3.35	10	
			16.1	3.76	4	
			18.0	3.29	3	
			18.5	3.36	3	
			19.3	3.31	3	
			20.4	3.01	4	
			20.2	3.32	14	
			20.5	3.40	7	
			21.0	3.13	4	
			19.3	2.49	5	
			19.1	2.29	3	
			19.3	2.49	6	
			19.1	2.29	23	
			19.6	2.74	15	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	2	
			22.4	2.12	3	
			21.6	2.00	3	
			21.8	2.37	1	
			19.6	2.74	1	
			20.5	2.45	1	
			22.9	2.54	2	
			22.4	2.12	2	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	3	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	3	
			22.9	2.54	3	
			22.4	2.12	3	
			21.6	2.00	3	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	3	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	
			22.4	2.12	4	
			21.6	2.00	4	
			21.8	2.37	4	
			19.6	2.74	4	
			20.5	2.45	4	
			22.9	2.54	4	

Radiana VII : coupe établie à partir de la diagraphie gamma ray

Coupe technique après 1998

Coupes géologique et technique avant 1998



Forage du Parc ou forage du Docteur

Situation géographique : X=923,8 Y=66,06
Z=436,5m

Réalisation : en 1986 par l'entreprise INTRAFOR-COFOR, destiné à fournir de l'eau pour refroidir les eaux rejetées dans l'Isère

Profondeur : 12m.

Coupe géologique : voir ci-dessous

Coupe technique :

. de 0 à 7m : tube en acier de 9''5/8

. de 7 à 12m : tube crépiné de 4''1/2

. le télescopage est cimenté

COUPE TECHNIQUE SIMPLIFIÉE	Prof. (m)	GÉOLOGIE	Température (°C)	Conductivité (mS/cm)	Vitesses d'écoulement (m/m)	OBSERVATIONS	
	0	Eléments polygéniques Alluvions			20	15.12.1986	
	30		12.4	4.86	30		
	35		13.5		35		
	35		14.5		35	Pertes de 6 m ³ de boue	
	25		13.2	12.1	25		
	30		14.7		15		
	15		15.3		15		
	20				20		
	30				30		
	32				32		
	25						

Historique :

cimentation en mars 1998 après nettoyage par airlift, stérilisation, mise en place de graviers siliceux au droit des crépines.

Pompage : non pompé.

Exploitation : non exploité.

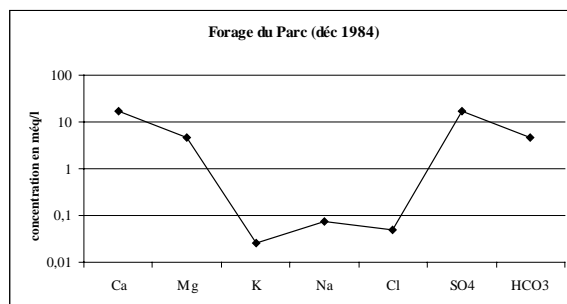
Eau captée :

température : 20°C.

minéralisation : voir ci-contre

bactériologie : aucune donnée

Etat actuel : cimenté en pression depuis 1998.



Forage de reconnaissance S1

Situation géographique : au niveau des fondations de l'établissement thermal.

Réalisation : du 9 au 14 janvier 1987 par l'entreprise INTRAFOR, destiné à repérer l'extension d'une cavité.

Profondeur : 50m.

Coupe géologique (ci-contre):

. de 0 à 14 m : alluvions sablo-graveleuses cimentées compactes présentant des vides entre 6,5 et 9m.

. de 14 à 35m : alluvions sablo-graveleuses grossières denses mais non cimentées, riches en galets de quartz.

. de 35 à 50m : micaschistes sériciteux.

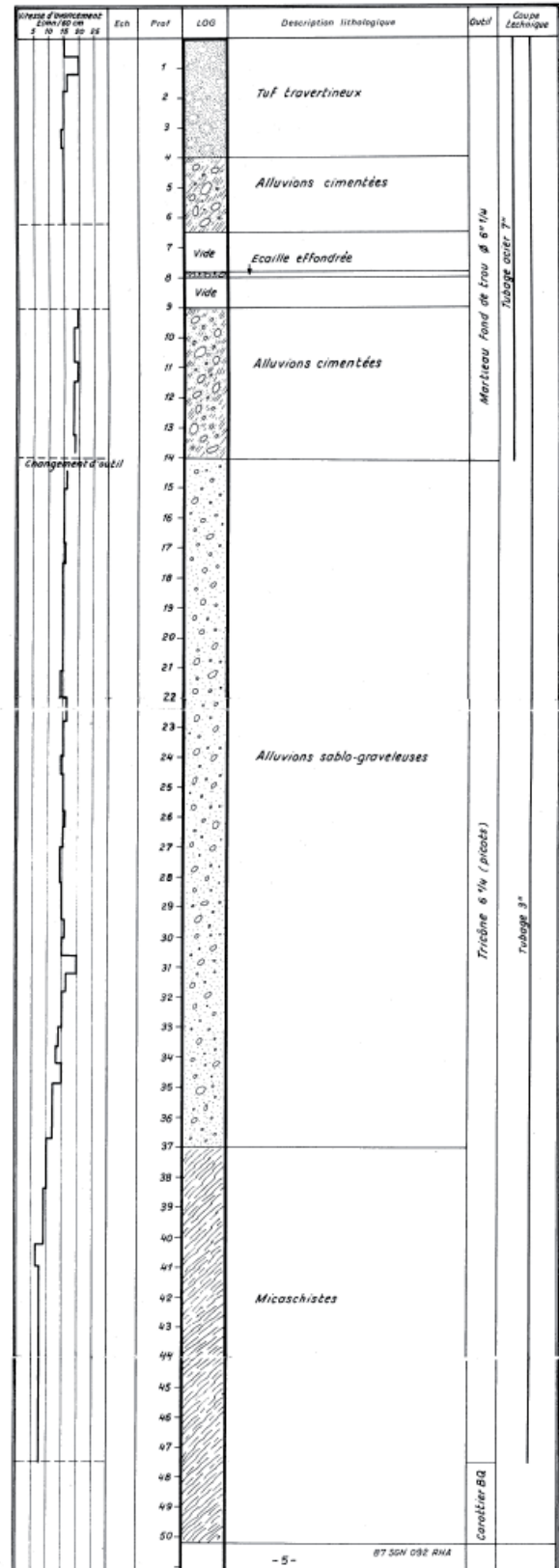
. venues d'eau chaudes à partir de 15m de profondeur

Coupe technique :

. de 0 à 7m : tube en acier de 9''5/8.

. de 7 à 12m : tube crépiné de 4''1/2.

. le télescopage est cimenté.



Sondages de reconnaissance géotechnique

Situation géographique : voir carte de localisation.

Réalisation : en 1987-1988, sondages destructifs de reconnaissance géotechnique avec essais pressiométriques.

Profondeur :

WD4, WD5 et WD7 : 15 m.

WD1, WD2, WD3, WD6 et WD8 : 20 m.

WD9, WD10, WD11 : 25m.

Coupes géologiques :

WD1

- . de 0 à 1,2 m : remblai
- . de 1,2 à 3,4 m : tuf avec blocs de schiste
- . de 3,4 à 5,1m : limon sablo-graveleux
- . de 5,1 à 20 m : poudingue avec passées non indurées de type sablo-graveleuse

WD2

- . de 0 à 1 m : remblai
- . de 1 à 6 m : limon sablo-graveleux marron à petits blocs
- . de 6 à 20 m : sable, gravier à galets, avec passées plus ou moins cimentées (poudingue)

WD3

- . de 0 à 1,6 m : remblai
- . de 1,6 à 3,6 m : limon sableux et passées graveleuses
- . de 3,6 à 8,4 m : alluvions, sable, gravier à galets (passées plus ou moins indurées)
- . de 8,4 à 10,2 m : sable marron grésifié
- . de 10,2 à 16,6 m : alluvions, sable, gravier à galets (passées plus ou moins indurées)
- . de 16,6 à 20 m : poudingue

WD4

- . de 0 à 2,8 m : limon devenant graveleux en fond
- . de 2,8 à 15 m : alluvions, sable, gravier gris avec galets

WD5

- . de 0 à 1,3 m : terre végétale et limon
- . de 1,3 à 15 m : alluvions, sable, gravier gris avec galets

WD6

- . de 0 à 0,5 m : terre limoneuse
- . de 0,5 à 1,6 m : tuf avec blocs
- . de 1,6 à 3,4 m : argile limoneuse marron gris
- . de 3,4 à 4,8 m : gravier limoneux avec blocs
- . de 4,8 à 20 m : alluvions, sable, graviers et galets

WD7

- . de 0 à 0,5 m : remblai
- . de 0,5 à 2,4 m : limon tufeux
- . de 2,4 à 4,8 m : sable et gravier peu argileux
- . de 4,8 à 7,8 m : sable et gravier
- . de 7,8 à 15 m : sable et gravier avec galets

WD8

- . de 0 à 3,8 m : limon avec passées tufeuses et blocs de schiste
- . de 3,8 à 8,8 m : sable et gravier
- . de 8,8 à 20 m : sable, gravier et galets

WD9

- . de 0 à 2,4 m : limon caillouteux avec passées tufeuses
- . de 2,4 à 5,6 m : limon graveleux à blocs avec passées limono-argileuses
- . de 5,6 à 8,4 m : sable et gravier
- . de 8,4 à 25 m : sable et gravier à galets

WD10

- . de 0 à 1,8 m : limon caillouteux beige
- . de 1,8 m à 6,8 m : éboulis à gros blocs, matrice argilo-sableuse
- . de 6,8 à 25 m : alluvions, sable, gravier et galets

WD11

- . de 0 à 2,4 m : limon graveleux et caillouteux
- . de 2,4 à 6 m : tuf
- . de 6 à 7,4 m : blocs de schiste
- . de 7,4 à 25 m : poudingue avec nombreux blocs de schiste noir puis poudingue compact

Radiana VIII

Situation géographique : à environ 50m de la berge SW du lac, très éloigné des autres forages.

Réalisation : du 21 octobre au 17 novembre 1994.

Profondeur : 126m.

Coupe géologique (ci-contre):

De 0 à 63m, seules des dépôts superficiels ont été traversés, une description un peu plus précise qu'à l'habitude est donnée :

- . de 0 à 21m : tufs et colluvions de pente
- . de 21 à 37m : dépôts glaciaires (cimentés à la base)
- . de 37 à 63m : éboulis polygéniques

On traverse ensuite le substratum :

- . de 63 à 83m : Trias composé de haut en bas de calcaire, gypse et dolomie
- . de 83 à 126m : socle cristallin micaschistique

Coupe technique :

- . tubage à l'avancement
- . rebouché après foration

Historique : rebouché après foration.

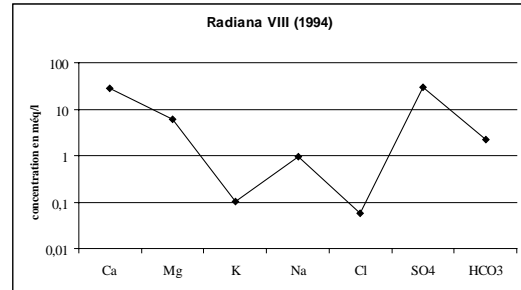
Débit artésien : très faible (quelques m³/h) dans le Trias mais conséquent dans les alluvions.

Exploitation :

- . mise en exploitation en 1990 au débit de 42m³/h.
- . 6 av. 1994 : autorisation provisoire d'exploiter RVII à un débit de 42m³/h .
- . en 1996, exploitation à un débit de 42m³/h (en même temps que RV à un débit de 20m³/h).

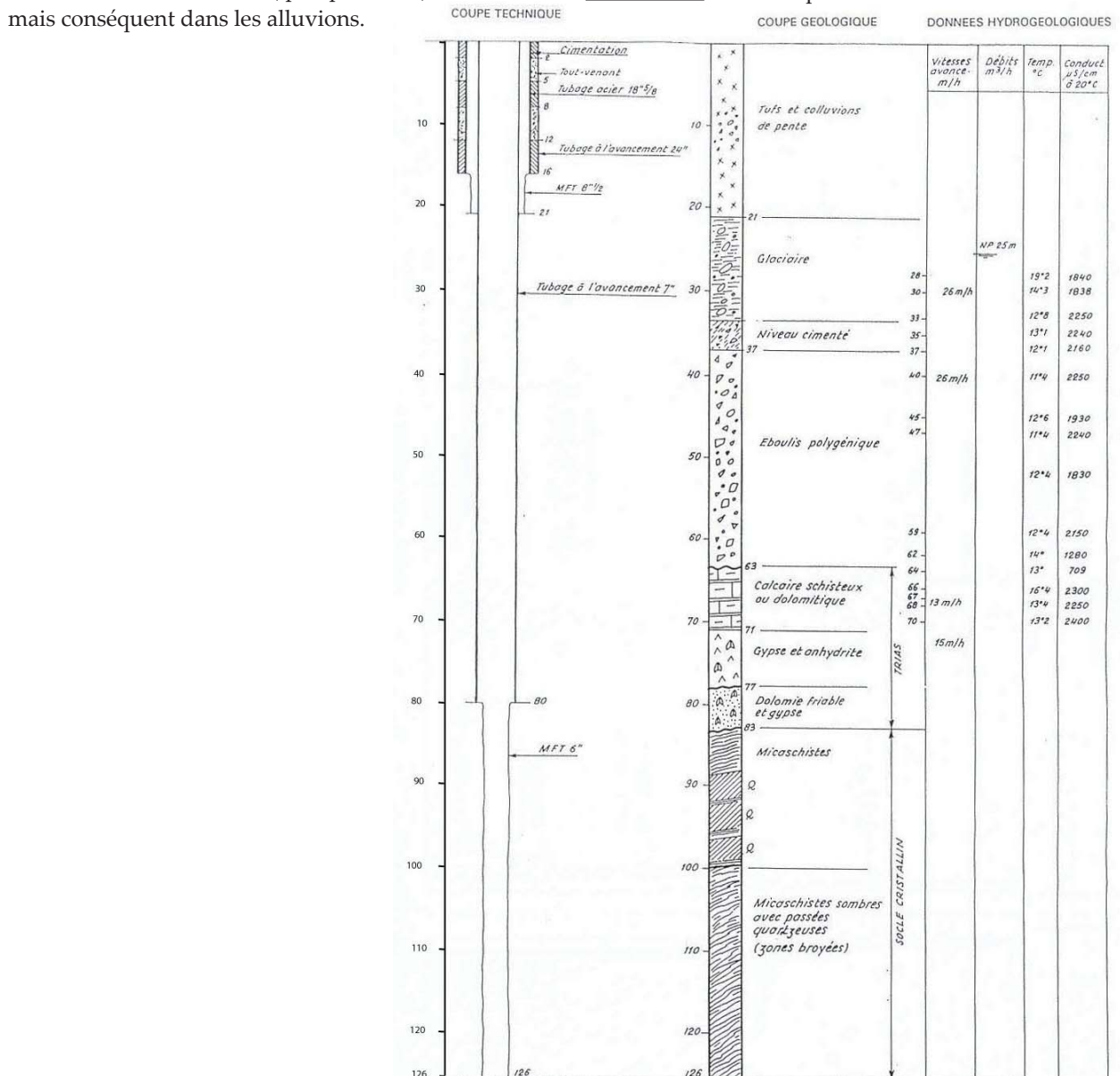
Eau captée :

température : de 11,4 à 19,2°C selon la profondeur.
minéralisation :



bactériologie : aucune analyse.

Etat actuel : cimenté après foration.



Radiana IX

Situation géographique : à environ 20m de la berge N du lac.

Réalisation : réalisé du 17 novembre au 15 décembre 1994. **Profondeur :** 104m.

Coupe géologique (ci-contre):

- . de 0 à 2m : terre végétale
- . de 2 à 7m : niveau cimenté
- . de 7 à 58m : alluvions à éléments polygéniques
- . de 58 à 84m : fluvio-glaciaire hétérogène à élément polygéniques
- . de 84 à 104m : micaschistes du socle

Coupe technique : forage non équipé.

Historique :

- . mars 1998 : opération ANTEA : obturation (graviers lavés, argile expansive, sable fin) après désinfection (air-lift, acidification, air-lift)
- . août-septembre 1998 cimentation en pression après désinfection par SOGREA

Débit artésien : débit non négligeable rencontré à 86m (pas de précision).

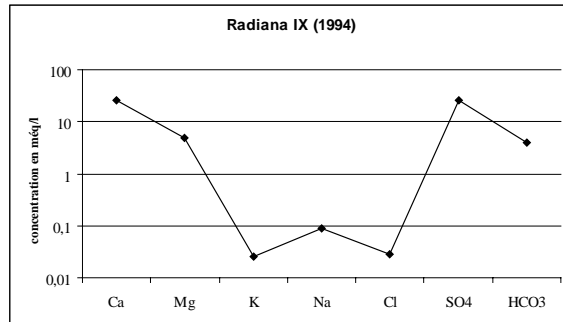
Exploitation :

non exploité car le faciès est trop éloigné de celui qui est autorisé.

Eau captée :

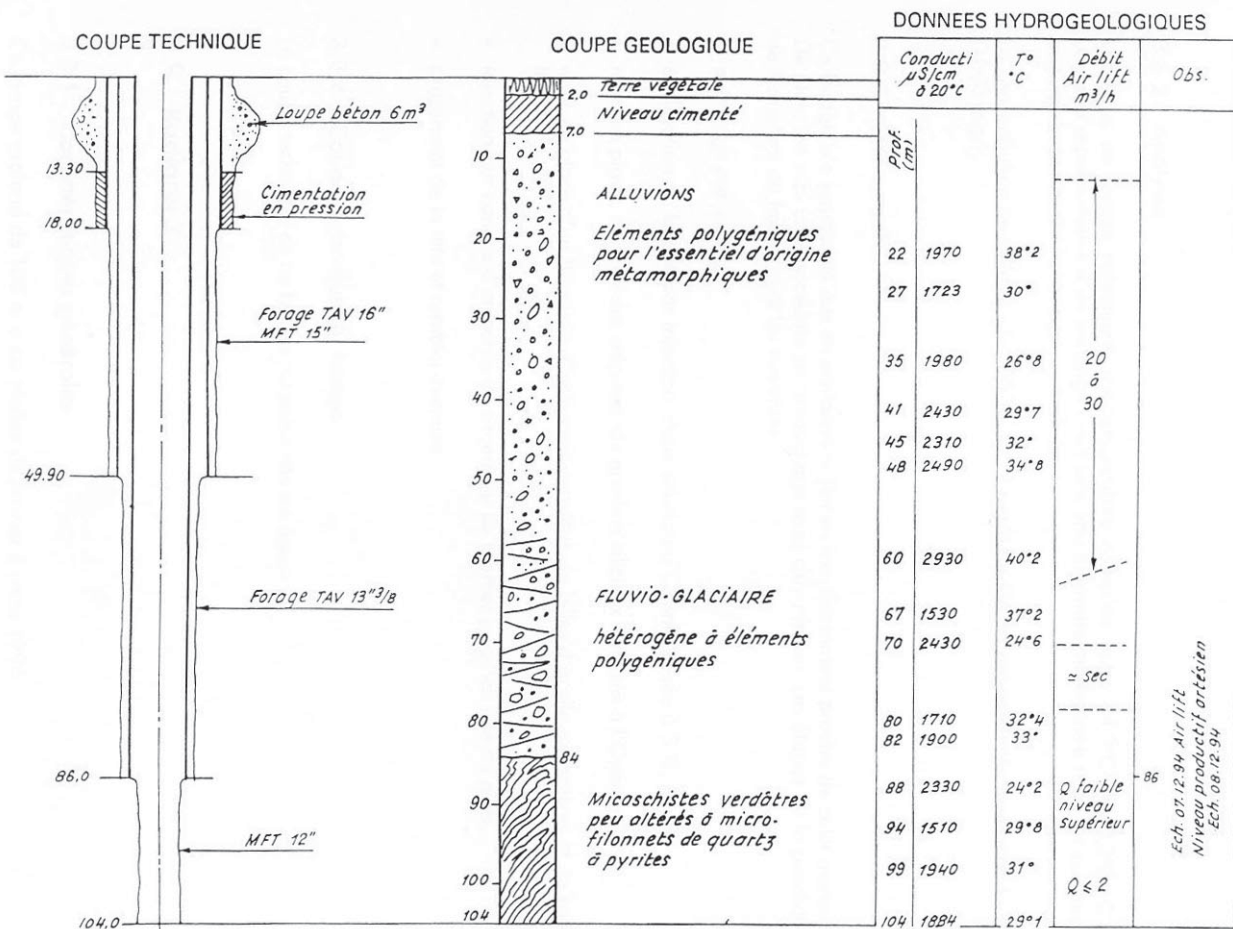
température : entre 24,2 et 40,2°C

minéralisation :



bactériologie : aucune analyse.

Etat actuel : cimenté en pression depuis 1998.



Radiana X

Situation géographique : à environ 10m de la berge SE du lac, proche de RIV. Coordonnées Lambert II : X=923 841 Y=2065 060 Z=437,05mNGF

Réalisation : réalisé du 2 janvier au 16 février 1996 par l'entreprise MASSE sous le contrôle d'ANTEA. Pendant la réalisation de ce forage, des bulles de gaz sont apparues dans le lac.

Profondeur : 105m.

Coupe géologique (ci-contre):

- réalisée à partir des cuttings remontés pendant la foration:

. de 0 à 50m : alluvions hétérogènes gris noirâtre à blocs, galets et graviers

. de 50 à 58m : zone indurée conglomératique à éléments carbonatés

. de 58 à 72m : alluvions hétérogènes gris noirâtre

. de 72 à 81m : calcaire gris-beige

. de 81 à 84m : zone silicifiée blanchâtre

. de 84 à 100m : formation sableuse à anhydrite

. de 100 à 105m : argilites jaune verdâtre

Les contrôles réalisés pendant la foration ont permis d'identifier une profondeur (50m) à partir de laquelle les eaux atteignent des valeurs de Na, conductivité, température et débit air-lift stables.

- interprétée à partir de la diagraphie γ ray réalisée en août 1998 sur le forage équipé :

seuls des figurés sont représentés mais la diagraphie γ ray semble donner la même coupe géologique du forage RX.

Coupe technique :

. de 0 à 47,2m : tube en inox 316L, 9''5/8

. de 41,9 à 105 m : tube inox 4''1/2 crépiné de 57,6 à 99,6m

. les télescopes ainsi que les espaces inter-annulaires sont cimentés

l'eau captée peut donc provenir de la nappe profonde et de la base des alluvions.

Après vérification de la coupe technique par diagraphie CBL et VDL, il est apparu que les cimentations inter-annulaires sont inefficaces et que l'eau thermique se perd entre 61 et 64m et qu'à partir de 61m, c'est l'eau de la nappe alluviale qui est captée.

Historique :

. 16 février 1996 : contrôle vidéo : aucune anomalie

. mars 1997 : pompages de qualification sur RX et RVII mené par ANTEA

- 11 mars : pompage par paliers sur RX avec RVII à un débit nominal de 43,5m³/h

- 12 mars : pompage par paliers sur RX avec RVII arrêté

- du 12 au 31 mars : pompage longue durée sur RX avec RVII arrêté

. automne 1997 : pompage de qualification mené par ANTEA

du 30/10 au 04/12 pompage de longue durée sur RX et RVII au débit nominal de 43,5m³/h

. en raison de la présence de legionella en RVII et RX au cours des essais de pompage, la demande d'autorisation d'exploiter n'a pas été déposée.

. mars 1998 : inspection vidéo : RAS

. mars 1998 : opération ANTEA : nettoyage et désinfection de RX (nettoyage haute pression avec désinfectant, air-lift, agents chimiques de régénération, neutralisation, air-lift dans l'intertubage, cimentation complémentaire dans l'intertubage, rinçage)

. août-sept.1998 : travaux de réhabilitation menés par SOGREAH : il était prévu de réaliser les mêmes travaux que pour RVII mais en raison des problèmes bactériologiques rencontrés en RVII, de la liaison directe établie entre ces deux forages et des

difficultés rencontrées pour extraire les crépines, RX a été complètement cimenté sous pression.

Pompage : l'eau est pompée mais aucune information trouvée

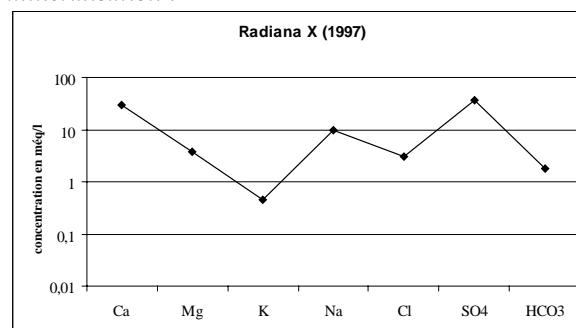
Débit artésien : 30m³/h

Exploitation : l'essai de qualification mené en décembre 1997 a été interrompu à cause de la présence de legionella pneumophilla. Le forage n'a donc jamais été exploité.

Eau captée :

température : après équipement du forage, 50°C à partir de 30m, 54°C à partir de 50m, au fond du forage la température décroît.

minéralisation :

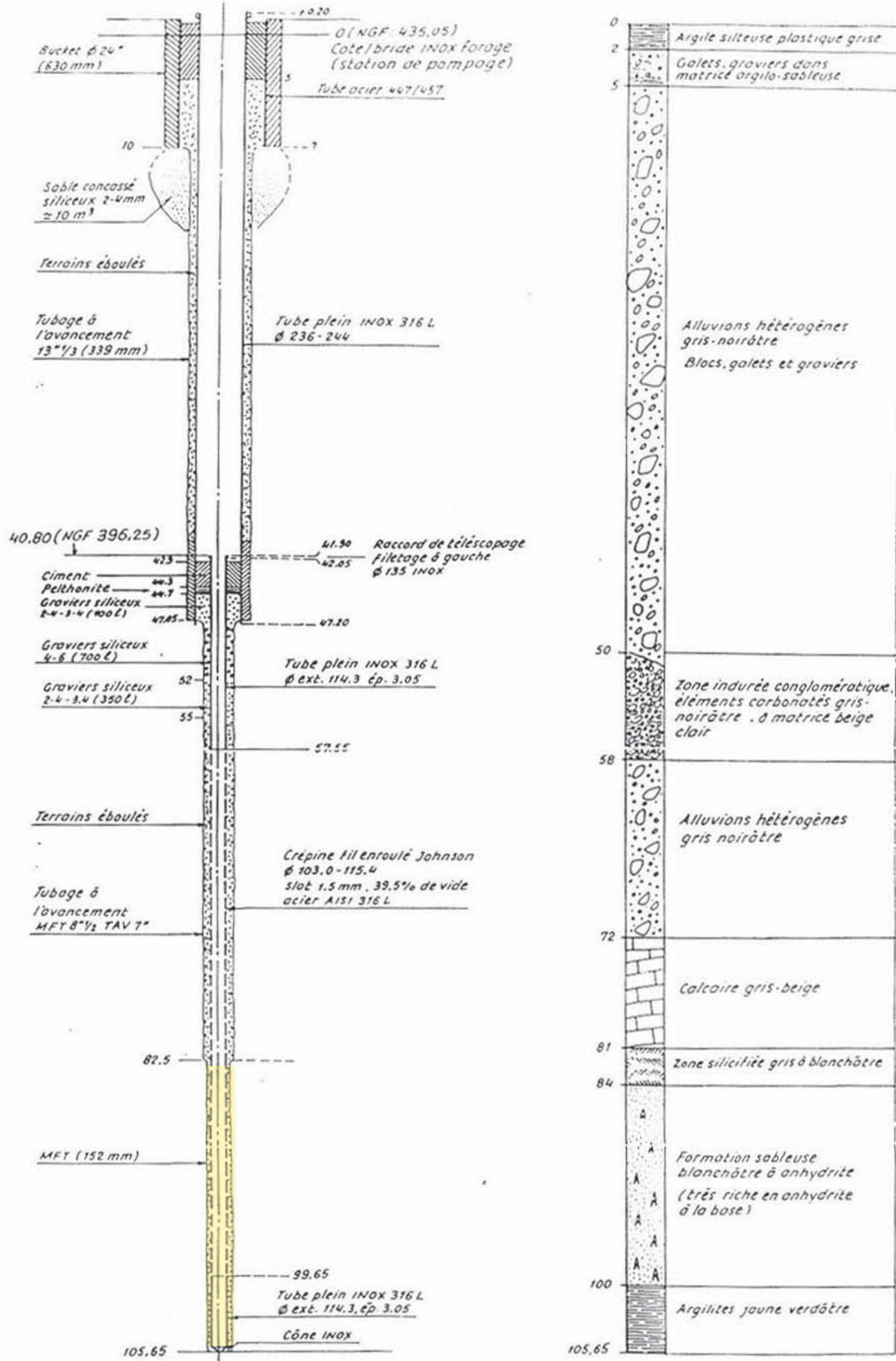


bactériologie :

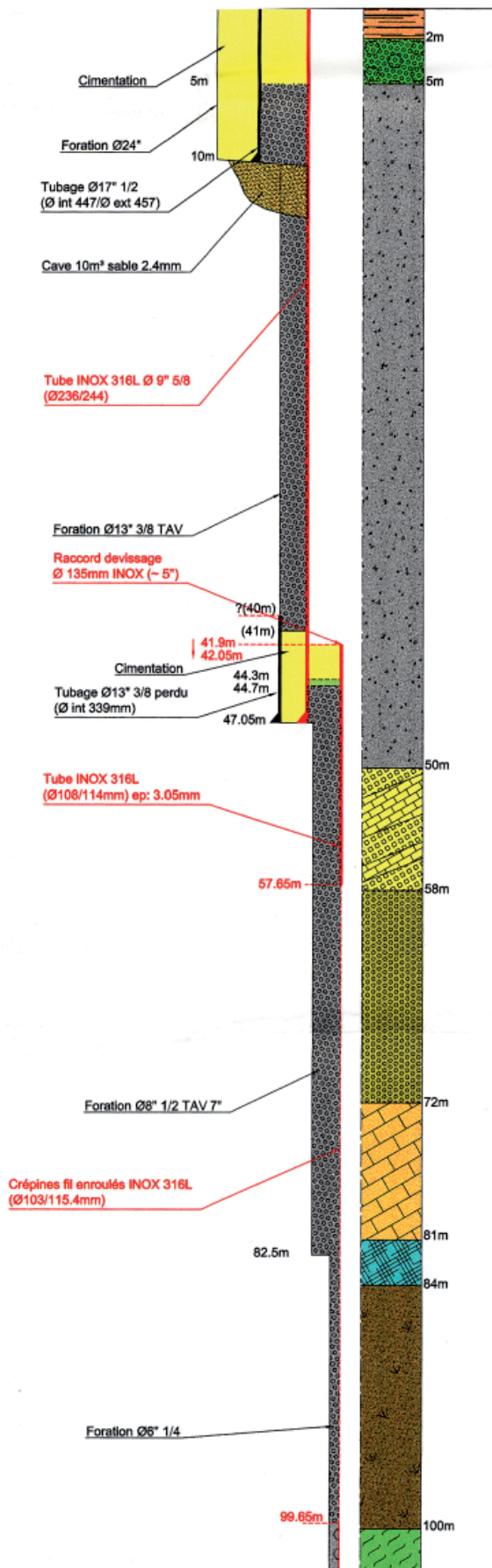
présence de légionelles mise en évidence en mars 1997 puis en novembre 1997.

Etat actuel : cimenté sous pression depuis 1998.

Radiana X



Radiana X



Radiana XI ou Natacha

Situation géographique : à environ 10m de la rive gauche de l'Isère. X = 923,85 Y = 65,864 Z = 437,35m

Réalisation : réalisé en septembre 1998 par l'entreprise COFOR.

Profondeur : 200m.

Coupe géologique (ci-contre):

-réalisée à partir des cuttings remontés pendant la foration :

. de 0 à 100 m : alluvions de l'Isère constituées de blocs, graviers et sables.

. de 100 à 191 m : anhydrites compactes.

. de 191 à 200m : dolomies altérées (cargneules) et niveaux de gypse.

Ce sont les dolomies altérées qui se sont révélées aquifères.

- interprétée à partir de la diagraphie γ ray réalisée sur le forage non équipé :

. de 0 à 100m : alluvions avec des zones plus ou moins cimentées

. de 100 à 120m : quartzites.

. de 120 à 128m : calcaires argileux.

. de 128 à 155m : gypse.

. de 155 à 162m : dolomies argileuses.

. de 162 à 190 : alternance de gypse et dolomies argileuses.

. de 190 à 200m : cargneules et niveaux argileux.

Plusieurs venues d'eau ont été rencontrées :

- dans les alluvions supérieures (non mesurables),

- cavité au sein des quartzites à 106m dans laquelle circulent des eaux minéralisées

- dans la "série carbonatée supérieure" principalement à la cote 119m

- deux bancs de dolomies argileuses karstifiées et aquifères à 192 et 195 m de profondeur

Coupe technique :

. 4 tubages inox emboîtés et cimentés en pression

. la partie 186-204m a été laissée en open-hole (trou ouvert)

Dans le rapport n° 100 638 cité plus haut, SOGREAH affirme que "ce type d'équipement confère au forage une grande protection et que RXI ne peut capter que des eaux thermales profondes circulant à 195m de profondeur."

Pompage : pas de pompage, débit bridé à 45m³/h

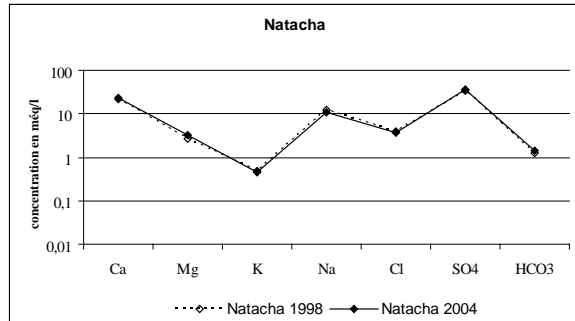
Débit artésien : 50m³/h

Exploitation : mars 2000 : autorisation pour 5 ans d'exploiter Natacha à un débit continu de 45m³/h.

Eau captée :

température : 63°C en 1998, 61°C en 2004.

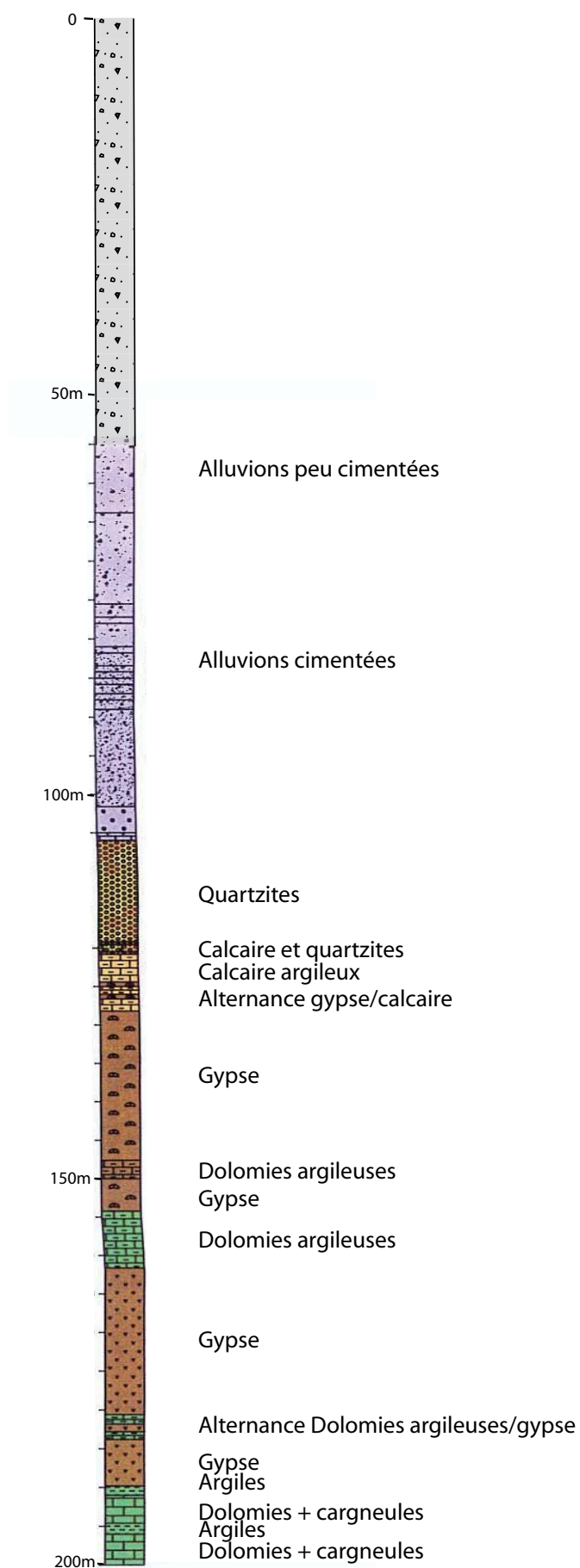
minéralisation :



bactériologie : les analyses réalisées jusqu'au 29 décembre 2004 sont toutes négatives.

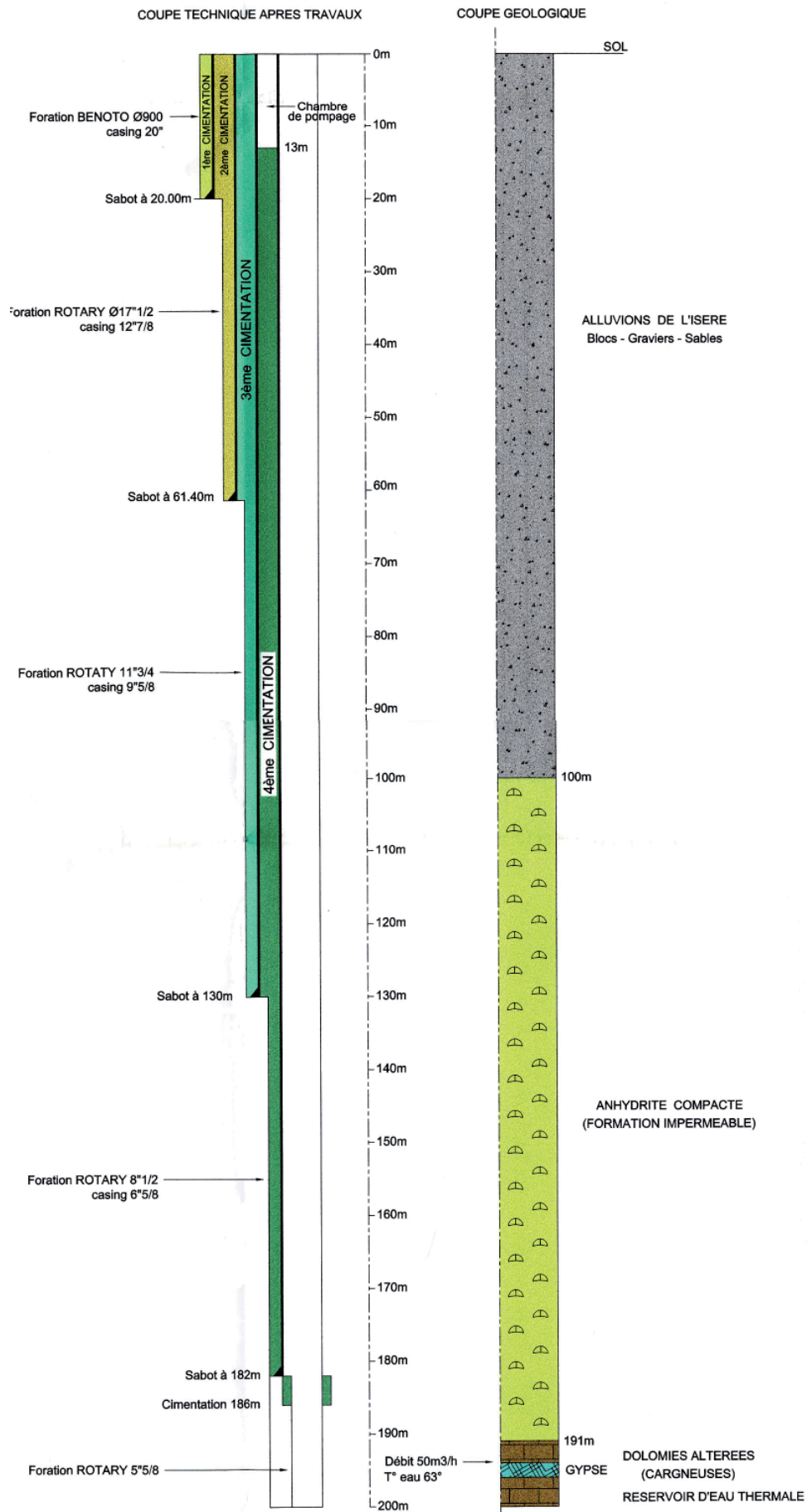
Etat actuel : seul forage exploité. L'ensemble de ses paramètres sont suivis depuis septembre 1998.

Radiana XI ou Natacha : coupe établie à partir des cuttings



Radiana XI ou Natacha : coupe établie à partir de la diagraphie gamma ray

RADIANA 11



3 piézomètres

Situation géographique :

Pz1 ou Pztaxi : à environ 30m de la berge SE du lac

Pz2 ou Pzposte : en face de l'établissement des thermes, à environ 30 m de l'Isère

Pz3 ou Pzoffice : à environ 30 m au S de Pztaxi

Réalisation : réalisés en juin 1998 par la société Hydroforage.

Profondeur : 21m

Coupe géologique (ci-contre):

Pz1 ou Pztaxi :

. de 0 à 1,2m : remblais et éboulis

. de 1,2 à 3,8m : limon argilo-sableux grisâtre

. de 3,8 à 12,6m : sable argileux brun-gris avec graviers et galets

. de 12,6 à 21m : sable gris avec galets et graviers

Pz2 ou Pzposte:

. de 0 à 4m : sable limoneux à galets et remblais

. de 4 à 7m : sable avec graviers et galets

. de 7 à 13m : sable gris avec passées plus argileuses avec graviers et galets moyennement roulés

. de 13 à 21m : sable gris propre à graviers et galets

Pz3 ou Pzoffice :

. de 0 à 2,7m : remblais et éboulis

. de 2,7 à 10,6m : sables et graviers argileux

. de 10,6 à 21m : sable gris avec graviers et galets

Coupe technique :

. PVC sur 20,4m

. 4 tubes crépinés de 2,85m

. 3 tubes lisses de 2,85m

. l'espace annulaire est rempli avec du sable sur 5,5m, puis par une couche d'argile de 0,5m et pur finir, le haut du forage est cimenté sur 5m.

Eau captée :

Pz1 ou Pztaxi : température de 15,7°C et conductivité de 857 $\mu\text{S/cm}$

Pz2 ou Pzposte : température de 12,8°C et conductivité de 845 $\mu\text{S/cm}$

Pz3 ou Pzoffice : température de 25,4°C et conductivité de 1670 $\mu\text{S/cm}$

Etat actuel : encore en place

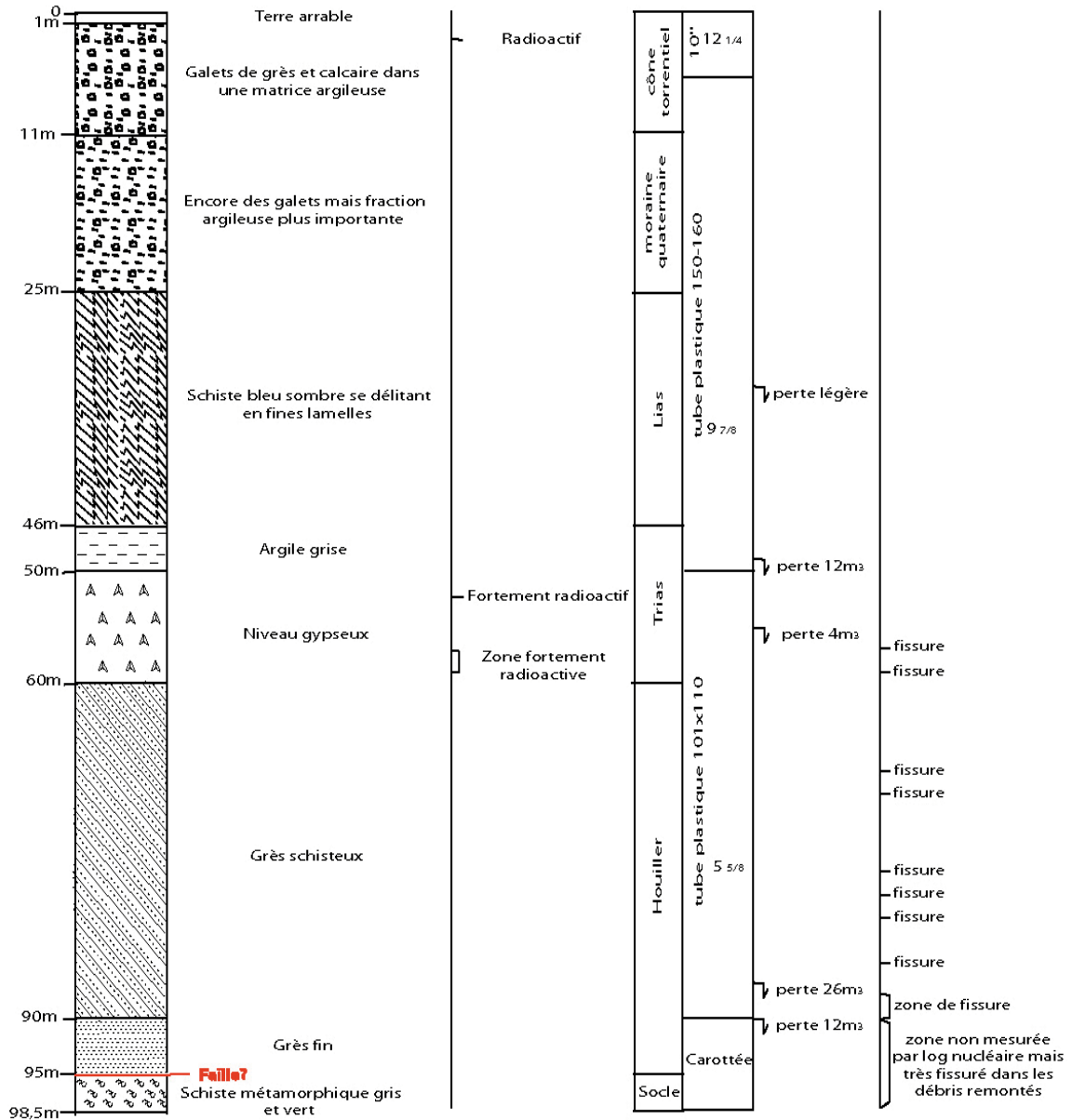
Sondage géotechnique de l'École à Petit Coeur

Situation géographique :

Profondeur : 98,5m

au centre de Petit Coeur, au NE du site de la Léchère

Forage de l'école de Petit Coeur extrait de la BSS du BRGM X=924 250 Y=66 680 Z=482m



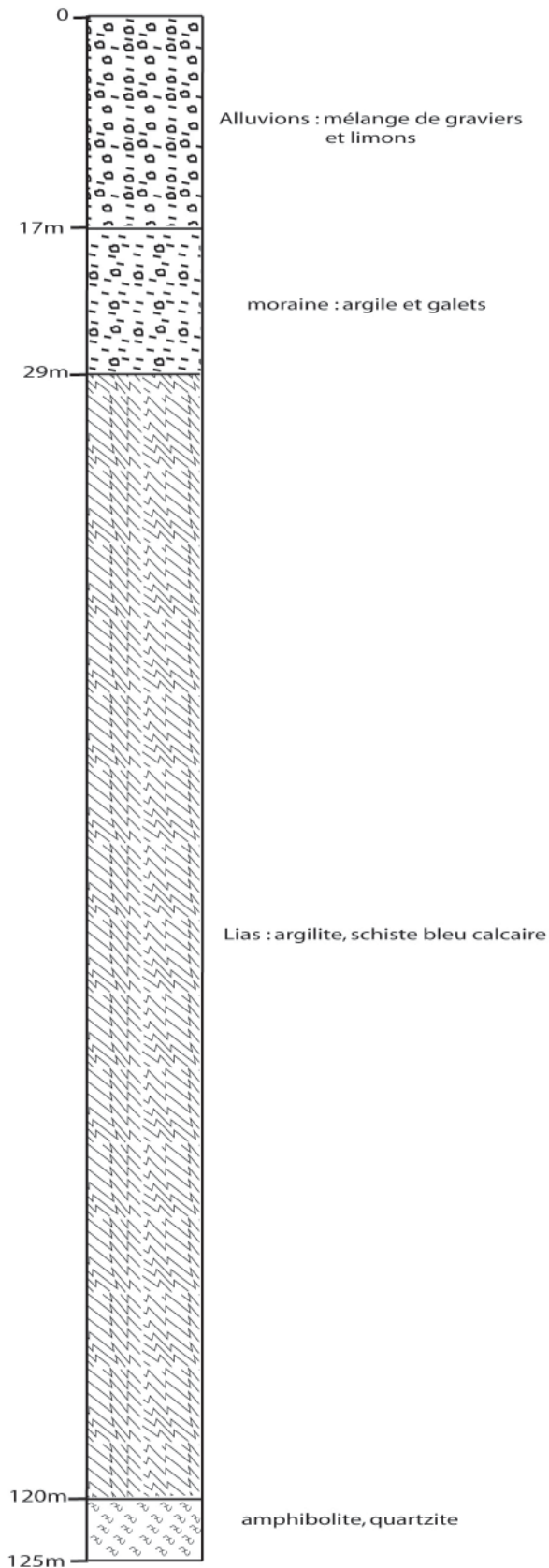
Sondage géotechnique de la cité ouvrière de Petit Coeur

Situation géographique :

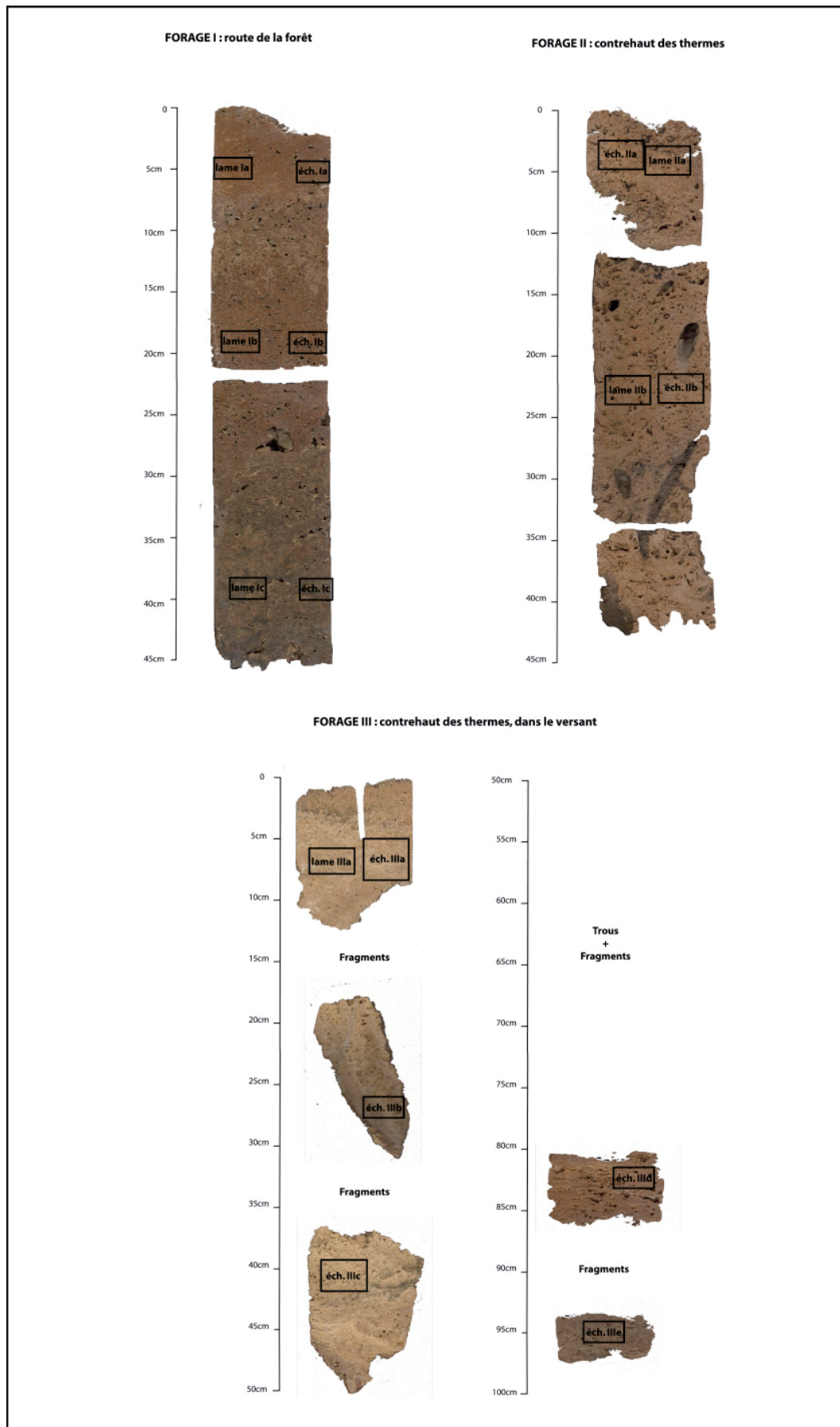
entre Petit Coeur et la Léchère

Profondeur : 125 m

Forage de la cité ouvrière de Petit Coeur extrait de la BSS du BRGM

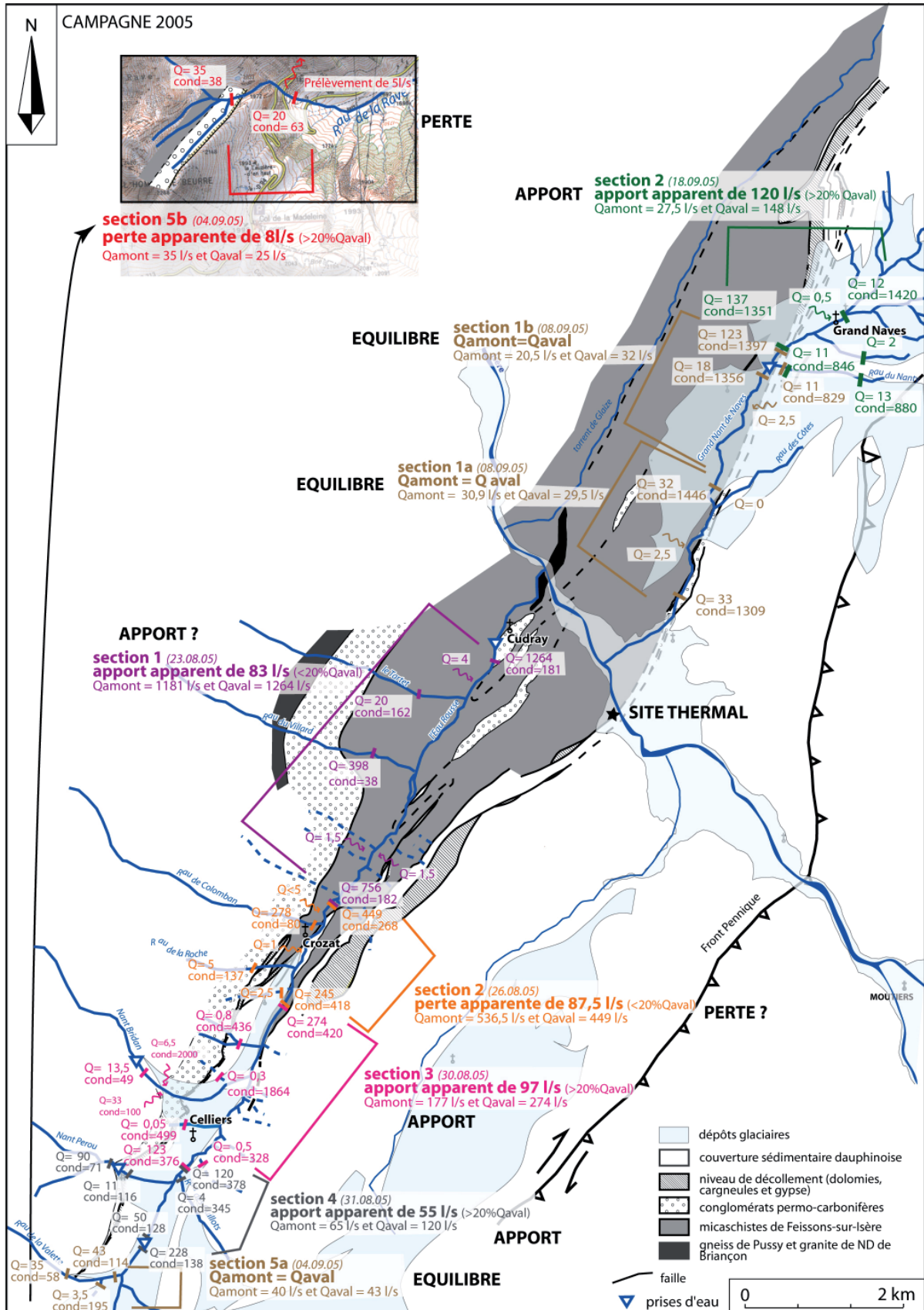


ANNEXE 3 CAROTTAGES REALISES DANS LES TRAVERTINS DE LA LECHERE

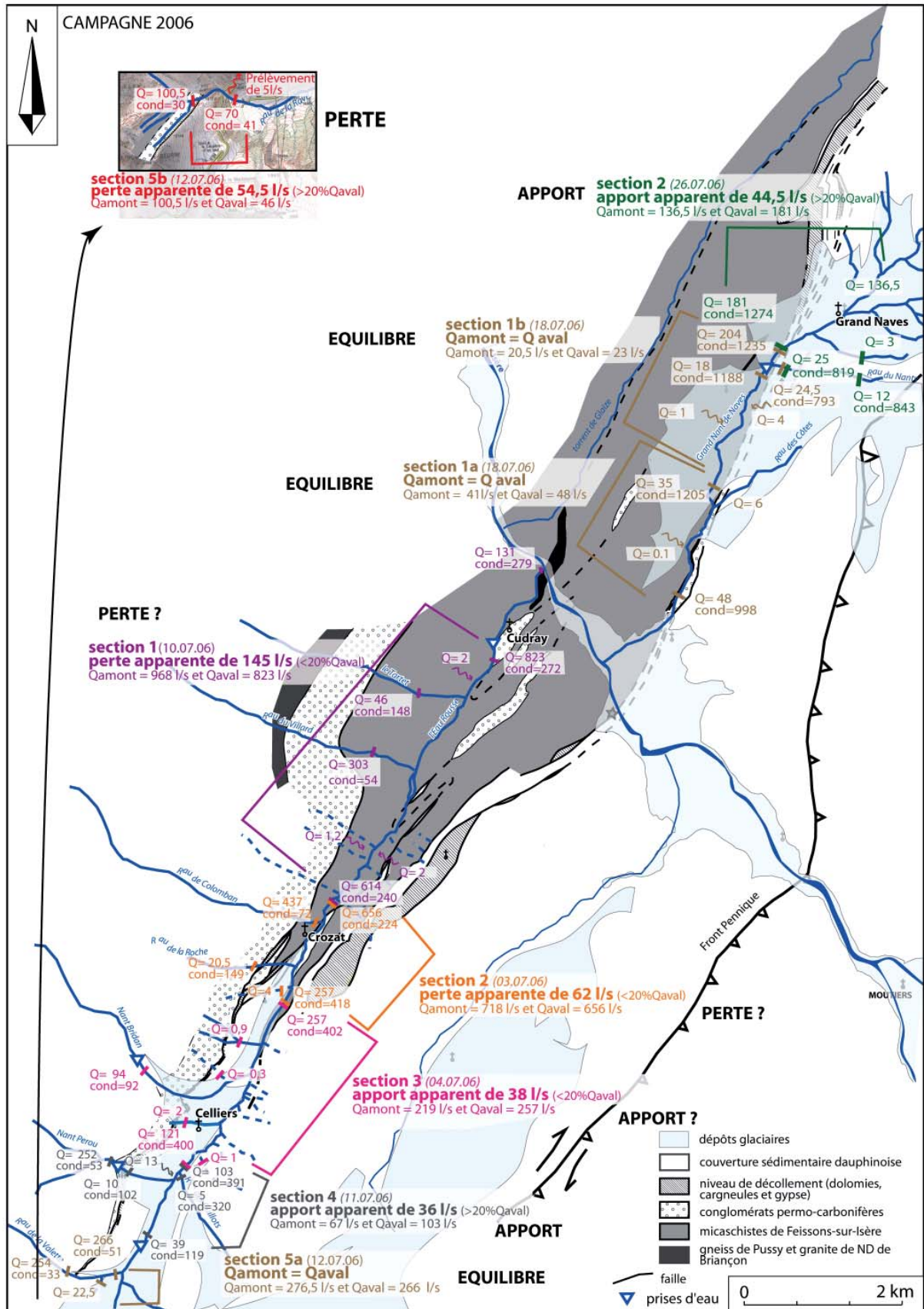


ANNEXE 4 RESULTATS DES CAMPAGNES DE JAUGEAGE

Résultats de la campagne réalisée durant l'été 2005, débits en l/s et conductivités en $\mu\text{S}/\text{cm}$. La différence entre le débit aval et la somme des débits amont est considéré comme significative si elle est supérieure à 20% du débit aval. Dans le cas contraire, la différence observée est notée avec un point d'interrogation.



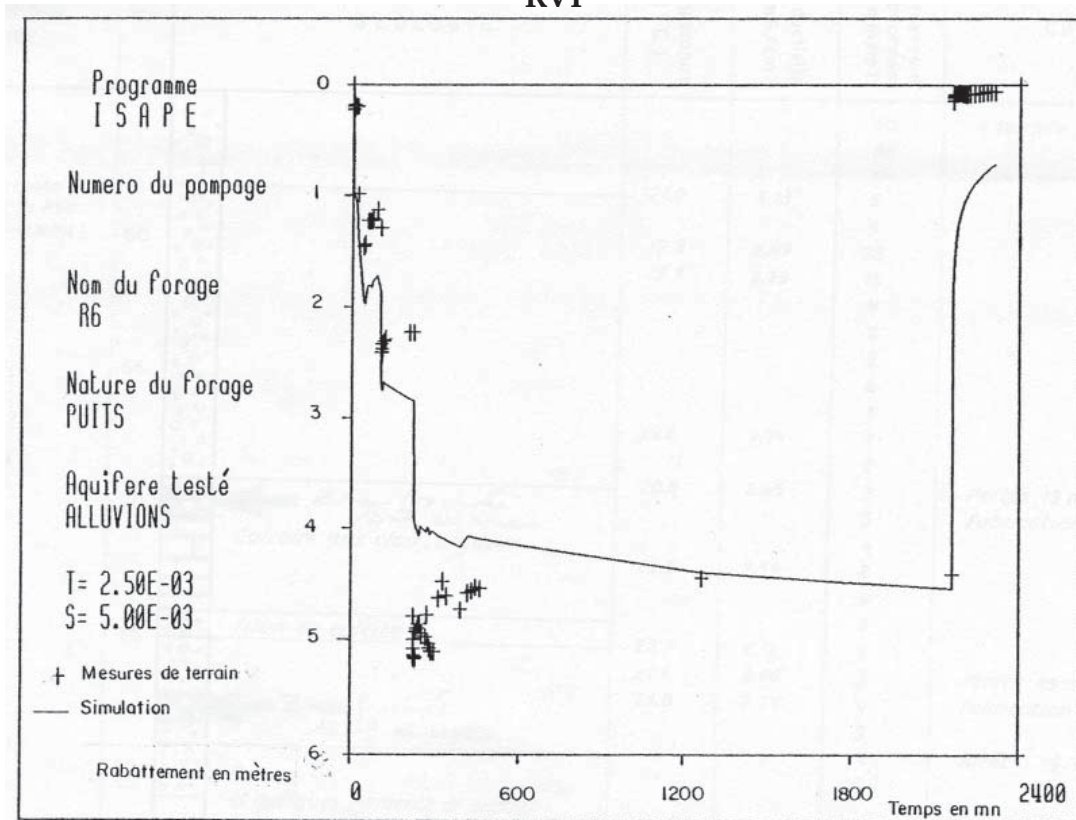
Résultats de la campagne réalisée durant l'été 2006, débits en l/s et conductivités en $\mu\text{S}/\text{cm}$. La différence entre le débit aval et la somme des débits amont est considéré comme significative si elle est supérieure à 20% du débit aval. Dans le cas contraire, la différence observée est notée avec un point d'interrogation.



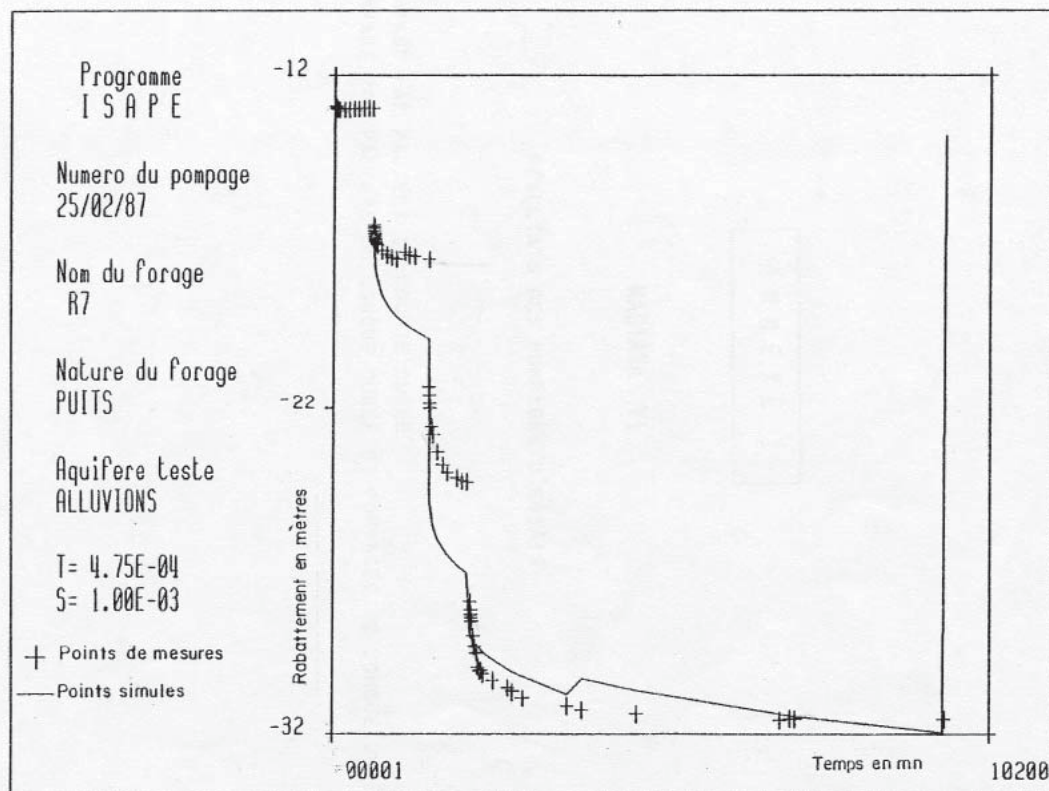
ANNEXE 5 ESSAIS PAR POMPAGE REALISES SUR LES FORAGES THERMAUX DU SITE DE LA LECHERE

Essais par pompage de 1987 (Eberentz, 1987)

RVI

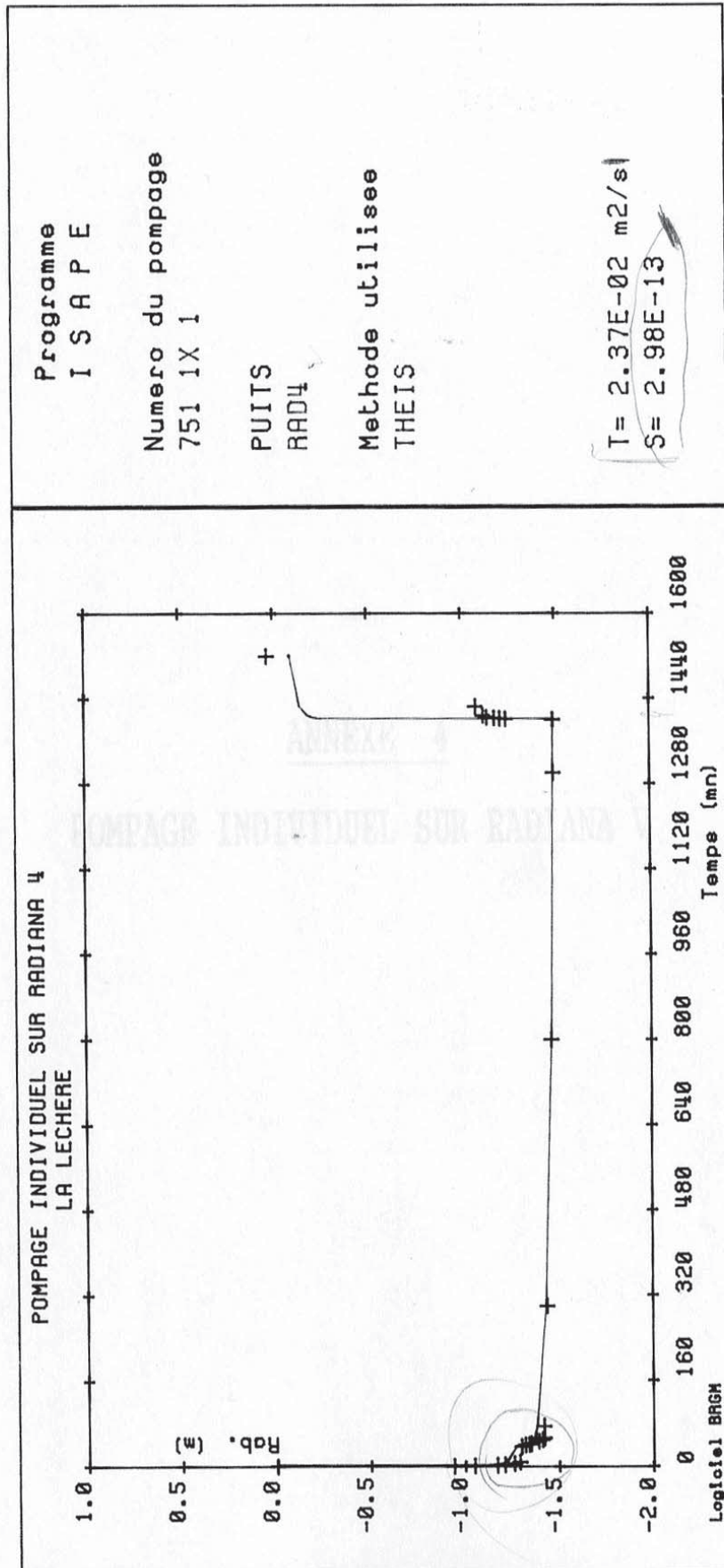


RVII

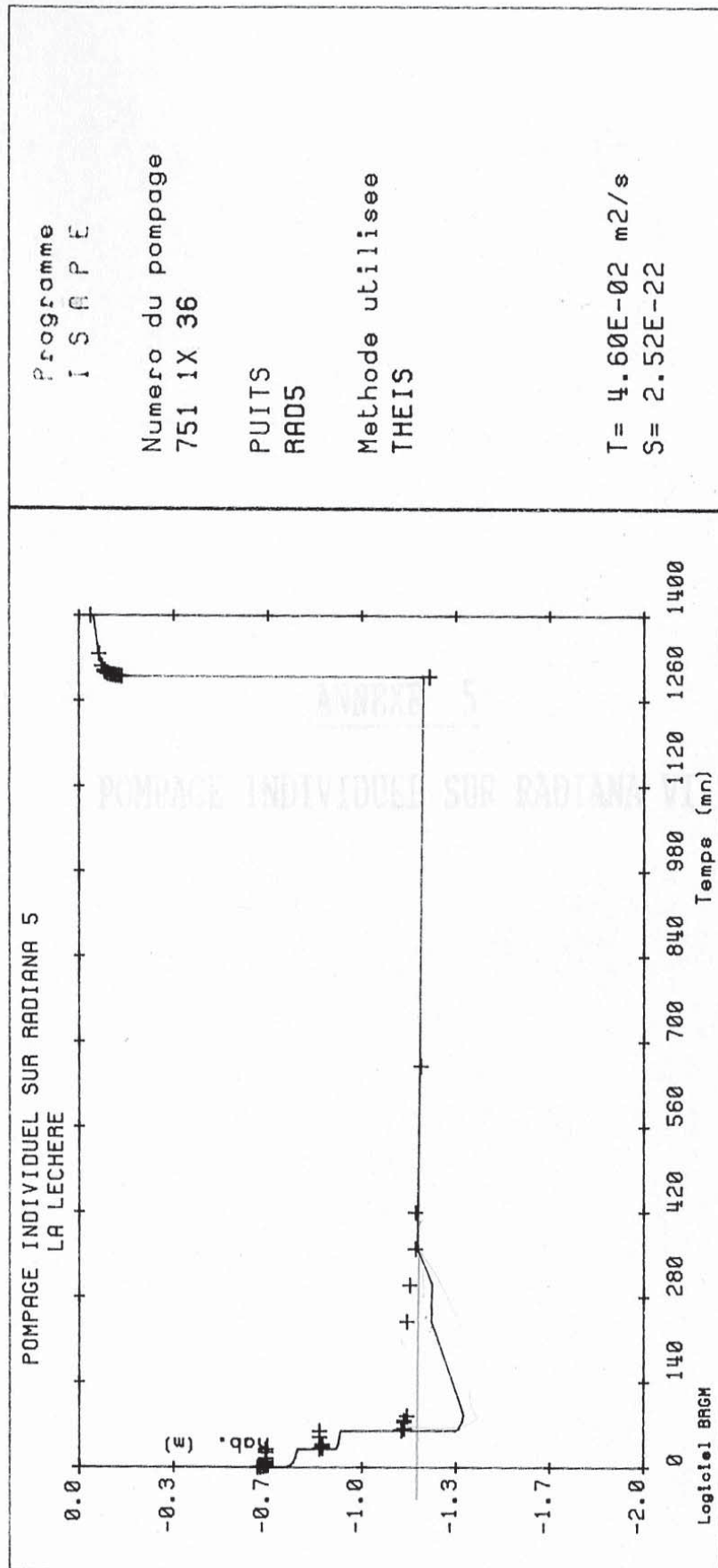


Essais par pompage de 1990 (Eberentz et Vaysse, 1990)

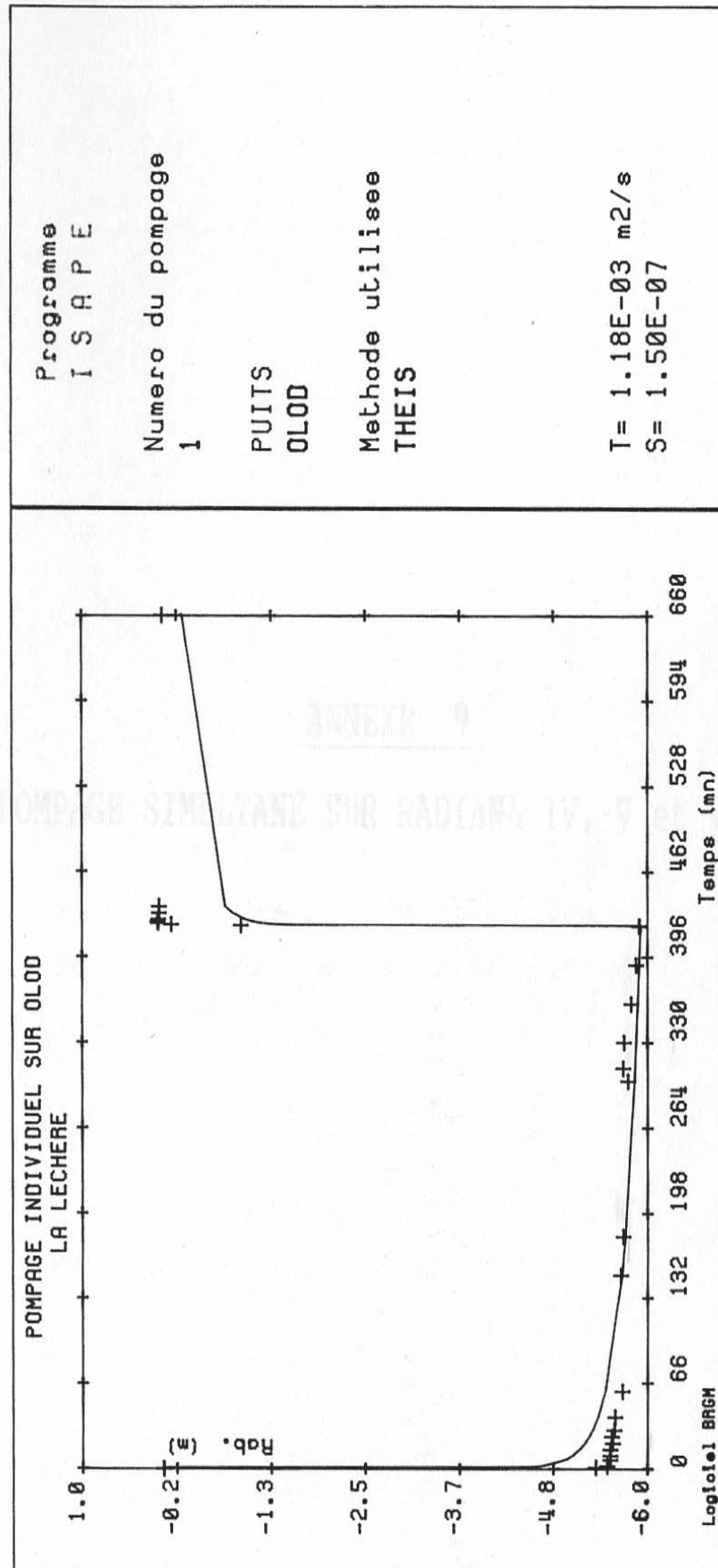
RIV



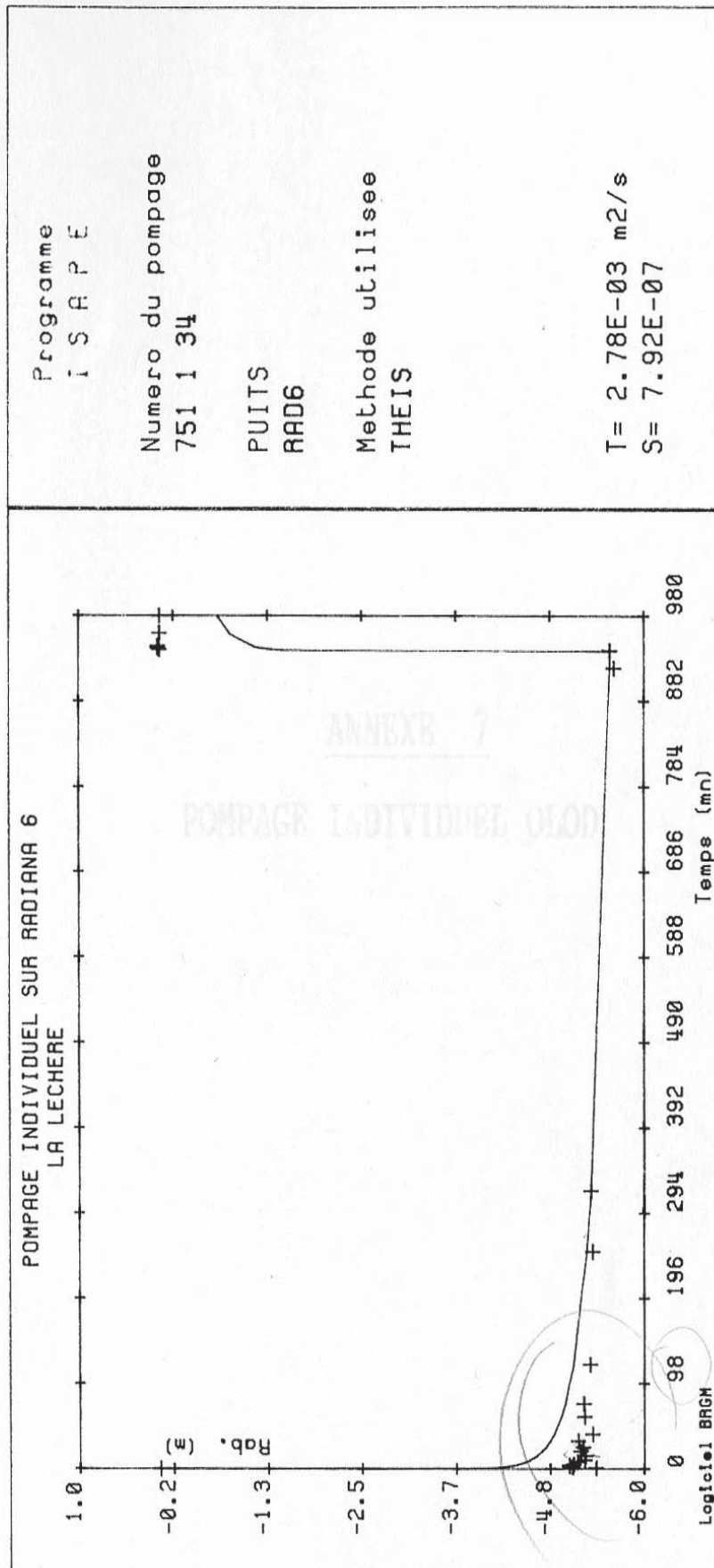
RV



Olod



RVI



ANNEXE 6

METHODOLOGIE DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES ET RESULTATS DE LA CAMPAGNE 2005-2006

Méthodologie

1) Mesures effectuées sur le terrain

Plusieurs paramètres nécessitent d'être mesurés directement sur le terrain afin de s'affranchir d'éventuelles évolutions des échantillons (changement de température, précipitations, etc...).

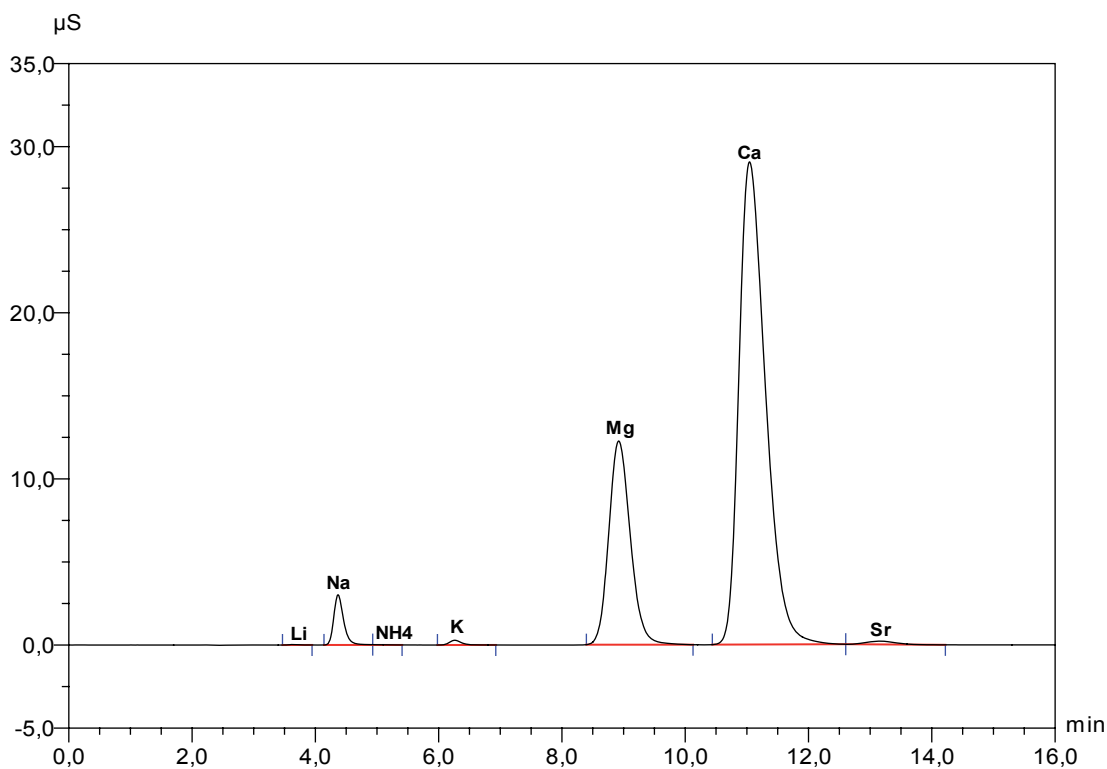
A l'aide d'un pH-conductimètre (pH/Cond 340i WTW) sont mesurés : la température en °C, le pH, la conductivité électrique à 25°C en $\mu\text{S}/\text{cm}$ et le potentiel redox (eH) en mV.

L'alcalinité est mesurée par dosage acido-basique à virage coloré en utilisant l'héliantine et l'acide sulfurique. Le virage n'étant pas très franc, l'erreur sur la mesure atteint ± 6 mg/l.

2) Eléments majeurs

Les teneurs en cations (Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+}) et les teneurs en anions (F^- , Cl^- , NO_3^- , Br^- , NO_2^- , PO_4^{2-} , SO_4^{2-}) ont été analysées au laboratoire Transferts lithosphériques (Saint Etienne, analystes : Stéphanie Gallino et Emilie Thiébaud formées par Bertrand Moine) par chromatographie ionique à détection conductimétrique (Dionex ICS 90). Les échantillons pour les cations ont été acidifiés au moment du prélèvement avec de l'acide méthane sulfonique afin de bloquer les phénomènes de précipitation. Avant analyse, les deux types d'échantillon ont été passés aux ultrasons puis dilués de 2 fois (Glaizette) à 30 fois (RVII et Natacha). Deux ml sont introduits dans l'appareil et seuls 50 μl sont injectés sur la colonne séparatrice. Pour les cations, l'éluant employé est de l'acide sulfonique et le régénérant du TBA-OH ; pour les anions l'éluant est du Na_2CO_3 et le régénérant de l'acide sulfurique. La calibration a été faite à partir de 5 solutions de compositions connues couvrant l'ensemble des teneurs à analyser. L'intégration des pics a été faite de manière reproductible et de façon à éliminer toute variation de conductivité inférieure à 0,01 $\mu\text{S}/\text{cm}$, proche du bruit de fond (voir exemple ci-dessous).

L'erreur sur la mesure due à l'appareil et à la méthode d'intégration est environ de 0,5% sur chacun des éléments; cette erreur est amplifiée par les facteurs de dilution. L'erreur sur les eaux thermales atteint donc 15%.



Résultats

Températures en °C, conductivités en $\mu\text{S}/\text{cm}$, concentrations en mg/l et balance en %. Les analyses avec une balance supérieure à 5% ont été soulignées en gris.

EAUX THERMALES	date	t °C	cond.	pH	eH	LI	Na	NH4	K	Mg	Ca	Sr	F	Cl	NO2	Br	NO3	PO4	S04	HCO3	balance	
Natacha (11)	13/09/05	58,0	2900	6,9		0,9	257,9	2,2	17,1	38,5	467,4	11,1	2,8	125,2	0,0	0,7	1,2	0,0	1599,3	87	-0,9	
	24/10/05	56,7	2950	7,2		0,9	260,1	3,3	17,5	31,1	467,7	11,0	2,9	124,6	0,0	0,2	0,7	0,0	1619,6	99	-2,2	
	23/11/05	56,0	2920	7,1		0,9	263,0	2,7	18,0	31,6	473,1	11,1	2,9	125,9	0,0	0,8	1,0	0,0	1605,0	87	-1,1	
	13/12/05	56,5	2930	7,1		0,9	284,5	4,0	17,5	31,7	482,1	12,4	3,0	123,9	0,0	0,7	0,1	0,0	1611,5	99	-0,6	
	20/01/06	55,5	2890	6,9		0,9	260,5	3,6	17,1	30,4	470,8	10,9	3,0	121,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1603,2	73	-0,9	
	03/03/06	55,5	2860	7,0		0,8	259,1	2,6	17,9	38,8	465,4	10,5	3,4	114,7	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	1546,1	77	1,0
	31/03/06	55,8	2880	7,1		0,9	242,2	1,7	16,5	35,4	486,3	7,8	3,1	112,5	0,0	0,4	0,0	0,0	1536,6	79	-2,0	
	04/05/06	55,8	2880	7,1		0,9	280,2	1,3	17,8	39,2	467,0	10,6	3,5	112,7	0,0	0,0	0,0	0,0	1534,0	67	2,0	
	31/05/06	51,9	2900	7,1	-17	0,9	259,8	1,5	17,7	39,0	467,2	10,1	3,0	112,6	0,0	0,0	0,0	0,0	1544,2	83	1,3	
	28/06/06	49,9	2880	7,6	-26	0,9	249,0	1,4	17,2	38,0	465,3	9,6	2,6	129,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1570,0	73	-0,7	
	31/08/06	57,8	2880	7,3	-13	0,9	257,8	3,8	17,6	39,1	458,7	8,5	3,0	111,5	0,9	6,8	0,1	0,0	1537,3	105	0,4	
	moyenne	55,4	2905	7,1	-19	0,9	257,6	2,6	17,5	35,7	465,6	10,3	3,0	119,4	0,1	0,9	0,3	0,6	1573,3	84	-0,3	
	écart type	2,5	32	0,2	7	0,0	6,5	1,0	0,4	3,7	11,3	1,3	0,2	6,7	0,3	2,0	0,4	1,9	34,6	12	1,3	
	RVII (11)	13/09/05	39,1	3110	7,0		0,7	195,4	1,1	13,2	48,3	587,9	11,6	2,3	86,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1722,8	120	1,6
24/10/05		40,2	3150	6,9		0,7	199,8	1,3	13,7	49,0	592,7	11,5	2,5	93,7	0,0	0,0	0,0	0,0	1830,5	127	-0,9	
23/11/05		42,3	3120	6,9		0,7	205,2	2,0	14,0	39,8	598,3	11,8	2,3	91,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1819,3	98	-0,2	
13/12/05		42,2	3150	6,9		0,8	204,0	3,0	13,9	39,4	592,9	11,2	2,4	94,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1820,5	105	-0,9	
20/01/06		41,6	3130	7,1		0,7	200,4	1,2	13,2	38,6	599,0	11,7	2,5	92,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1821,4	122	-1,2	
03/03/06		41,0	3110	6,8		0,9	287,6	2,0	19,1	66,7	797,9	15,0	2,6	92,8	6,0	0,0	0,0	0,0	1789,0	110	15,5	
31/03/06		42,2	3040	7,0		0,5	180,0	1,0	12,2	45,7	556,2	8,7	2,0	83,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1764,0	113	-2,4	
04/05/06		41,8	3090	6,9		0,7	186,6	1,2	13,3	49,5	579,4	11,6	1,9	85,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1764,4	110	-0,1	
31/05/06		42,2	3090	7,0	-8	0,7	196,0	1,1	20,2	49,9	581,4	10,6	2,2	84,8	0,0	0,8	0,0	1,5	1735,5	116	1,3	
28/06/06		44,1	3030	7,2	-11	0,7	190,2	1,1	14,1	47,8	571,1	10,4	4,0	92,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1787,3	95	-0,7	
31/08/06	43,0	3060	6,9	-2	0,7	191,0	0,8	12,9	50,2	585,2	8,7	1,9	81,9	0,0	28,7	6,7	0,0	1713,2	128	1,0		
moyenne	41,8	3098	7,0	-7	0,7	201,5	1,4	14,5	47,7	603,8	11,2	2,4	89,0	0,5	2,7	0,6	7,3	1775,3	113	0,9		
écart type	1,3	41	0,1	5	0,1	23,2	0,7	2,6	7,7	65,6	1,7	0,6	4,6	1,8	8,6	2,0	23,6	42,1	11	5,1		

CONTACT TRIASIQUE	date	t °C	cond.	pH	eH	Li	Na	NH4	K	Mg	Ca	Sr	F	Cl	NO2	Br	NO3	PO4	SO4	HCO3	balance	
RF (11)	13/09/05	11,7	1933	8,0		0,0	1,8	0,0	0,9	58,9	407,5	9,4	0,2	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	999,5	276	-0,7	
	24/10/05	10,8	1942			0,0	1,7	0,0	0,7	47,2	404,0	9,3	0,2	5,0	0,0	0,0	0,3	1,7	998,2		2,0	
	23/11/05	9,5	1967	7,2		0,0	2,1	0,0	1,9	50,1	435,0	10,5	0,2	5,4	0,0	0,0	0,5	0,0	1019,1	253	0,5	
	13/12/05	7,7	2540	7,9		0,0	1,7	0,0	0,7	48,7	423,2	10,0	0,2	3,6	0,0	0,0	0,2	0,0	1006,3	231	0,4	
	20/01/06	7,1	1959	7,2		0,0	1,6	0,0	0,8	47,7	420,9	9,7	0,2	6,1	0,0	0,0	0,7	2,7	1004,4	255	-1,1	
	03/03/06	6,9	1957	7,8		0,0	1,6	0,1	0,0	58,3	403,8	8,7	0,1	2,5	0,2	0,0	0,1	0,0	984,1	238	0,7	
	31/03/06	8,6	1656	7,9		0,0	2,0	0,1	1,1	61,3	443,0	7,8	0,2	2,2	0,2	0,0	0,0	0,0	775,1	255	14,0	
	04/05/06	11,2	1749	7,9		0,0	1,9	0,0	0,0	51,7	361,4	7,9	0,2	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	815,1	260	1,9	
	31/05/06	10,2	1790	7,9	-50		0,0	2,2	0,0	53,9	375,3	7,9	0,1	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	874,5	250	1,5	
	28/06/06	15,7	1770	8,1	-60		0,0	1,1	0,0	49,1	358,0	1,9	0,2	2,9	0,2	0,0	0,2	0,0	902,2	266	-3,5	
	31/08/06	12,4	1823	7,8	-44		0,0	2,3	0,0	54,9	384,2	7,7	0,0	3,6	0,2	0,0	0,0	0,0	893,7	267	1,1	
moyenne	10,2	1917	7,8	-51		0,0	1,8	0,0	52,9	401,5	8,3	0,2	3,8	0,1	0,0	0,4	0,0	933,8	255	1,5		
écart type	2,6	232	0,3	8		0,0	0,3	0,0	0,5	4,9	28,7	2,3	0,0	1,2	0,1	0,0	0,2	0,9	86,0	13	4,4	
galerie EDF F2 (11)	13/09/05	12,3	1638	7,1		0,0	1,8	0,1	0,8	58,8	318,3	6,7	0,2	10,1	0,0	0,0	0,7	6,2	738,0	325	-1,2	
	24/10/05	11,5	1765	7,0		0,0	1,4	0,1	0,5	35,5	225,3	4,6	0,2	10,1	0,0	0,0	0,7	6,2	738,0	292	-19,3	
	23/11/05	11,3	1712	7,1		0,0	1,9	0,1	0,7	48,5	320,0	7,7	0,2	4,4	0,1	0,0	0,6	1,0	738,6	294	-1,1	
	13/12/05	11,3	1689	7,0		0,0	1,8	0,1	0,7	48,8	327,7	7,2	0,2	5,3	0,0	0,0	0,0	0,0	737,4	292	0,1	
	20/01/06	10,4	1766	7,0		0,0	2,4	0,1	0,8	48,4	328,5	7,1	0,2	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	735,7	303	-0,2	
	03/03/06	10,2	1674	6,9		0,0	1,9	0,0	0,8	59,6	318,9	6,8	0,1	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	733,2	296	1,4	
	31/03/06	11,3	1628	7,1		0,0	2,2	0,0	0,9	59,9	315,6	6,2	0,2	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	707,7	299	2,2	
	04/05/06	10,6	1607	7,1		0,0	1,9	0,0	0,7	57,9	307,0	6,5	0,2	3,1	0,2	0,0	0,4	0,0	702,8	293	1,3	
	31/05/06	10,8	1601	7,2	-11		0,0	2,3	0,1	1,0	58,7	310,9	6,5	0,1	2,8	0,7	0,0	0,0	691,1	299	2,3	
	28/06/06	9,8	1606	7,3	-16		0,0	2,3	0,0	58,6	311,2	6,4	0,2	2,0	0,0	0,0	0,8	0,0	701,0	289	2,3	
	31/08/06	11,3	1627	6,9	-2		0,0	2,6	0,0	1,1	59,6	313,9	5,3	0,2	3,2	0,0	0,5	0,0	719,2	305	1,1	
moyenne	11,0	1685	7,1	-10		0,0	2,0	0,1	0,8	53,9	308,9	6,5	0,2	4,8	0,1	0,0	0,3	1,2	722,1	299	-1,0	
écart type	0,7	61	0,1	7		0,0	0,3	0,0	0,2	8,3	28,5	0,9	0,0	2,9	0,2	0,2	0,3	2,5	18,2	10	6,2	
galerie EDF V8 (11)	13/09/05	10,7	2610	7,5		0,0	1,8	0,1	2,2	84,8	597,7	13,3	0,2	4,8	0,0	0,0	0,4	0,0	1640,4	187	-1,1	
	24/10/05	11,1	2660	7,4		0,0	1,8	0,0	1,7	68,7	598,6	14,2	0,2	4,6	0,0	0,0	0,6	0,0	1642,8	192	-3,0	
	23/11/05	10,0	2720	7,4		0,0	2,1	0,1	2,4	70,1	605,1	13,9	0,2	4,0	0,0	0,0	0,3	0,0	1579,3	185	-0,4	
	13/12/05	11,4	2630	7,6		0,0	1,8	0,1	1,9	69,7	595,2	14,5	0,3	4,1	0,0	0,0	0,3	0,0	1631,4	199	-2,9	
	20/01/06	9,3	2690	7,5		0,0	3,5	0,4	4,0	69,8	597,6	13,4	0,2	3,3	0,0	0,0	0,3	0,0	1626,9	281	-4,1	
	03/03/06	8,8	2600	7,5		0,0	1,5	0,2	2,3	78,4	548,4	12,0	0,2	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1530,2	162	-1,4	
	31/03/06	10,4	2500	7,5		0,0	2,2	0,3	2,3	73,6	567,0	12,1	0,2	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	1441,0	165	2,1	
	04/05/06	9,6	2560	7,3		0,0	1,6	0,0	1,6	79,0	577,5	13,3	0,0	3,2	8,5	0,0	0,0	92,5	0,0	1609,2	171	-4,0
	31/05/06	10,2	2560	7,4	-22		0,0	2,7	0,0	4,1	80,5	585,1	12,7	0,3	3,0	0,0	0,0	0,3	0,0	1525,5	177	1,3
	28/06/06	10,2	2580	7,5	-29		0,0	4,0	0,0	3,1	82,6	585,0	12,8	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	1536,8	161	1,7
	31/08/06	10,7	2600	7,3	-22		0,0	2,2	0,0	1,9	86,4	593,1	10,9	0,2	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	1557,0	163	1,7
moyenne	10,2	2610	7,4	-24		0,0	2,3	0,1	2,5	76,7	586,4	13,0	0,2	3,1	0,8	0,0	8,6	0,0	1574,6	186	-0,9	
écart type	0,7	60	0,1	3		0,0	0,8	0,1	0,8	6,3	15,9	1,0	0,1	1,2	2,4	0,0	26,5	0,0	60,4	32	2,3	
galerie EDF V46 (11)	13/09/05	11,4	2330	7,2		0,0	1,6	0,0	1,0	67,4	515,6	11,7	0,2	5,1	0,2	0,0	0,9	0,0	1298,3	281	-1,1	
	24/10/05	11,2	2330	7,1		0,0	2,0	0,1	1,3	67,0	524,0	13,2	0,2	5,4	0,0	0,0	0,9	0,0	1324,6	281	-1,3	
	23/11/05	11,2	2360	7,0		0,0	1,7	0,0	1,2	56,7	535,5	12,6	0,2	3,8	0,0	0,0	0,6	0,0	1296,7	270	-0,6	
	13/12/05	11,1	2340	7,0		0,0	1,7	0,0	2,7	56,2	533,3	13,0	0,2	10,7	0,0	0,0	0,9	0,0	1285,2	235	0,3	
	20/01/06	11,2	2340	6,9		0,0	1,8	0,1	1,0	54,4	531,2	12,7	0,2	8,9	0,0	0,0	0,0	0,0	1305,5	194	0,3	
	03/03/06	11,3	2340	6,9		0,0	1,8	0,1	1,2	69,3	530,9	11,6	0,1	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	1228,5	266	3,3	
	31/03/06	13,2	2300	7,2		0,0	2,2	0,1	1,4	67,5	517,9	11,1	0,2	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1254,2	268	1,1	
	04/05/06	11,9	2280	7,2		0,0	1,8	0,1	1,2	66,0	503,9	11,8	0,2	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1227,7	251	1,2	
	31/05/06	11,5	2270	7,2	-12		0,0	3,0	0,1	1,5	66,2	510,8	11,1	0,3	0,7	0,0	0,0	0,0	1228,5	271	1,3	
	28/06/06	11,6	2280	7,4	-21		0,0	2,3	0,0	1,1	66,7	508,0	11,3	0,1	1,4	0,0	0,0	0,0	1231,1	261	1,2	
	31/08/06	12,0	2300	7,0	-4		0,0	3,8	0,0	2,9	67,7	514,8	9,8	0,2	2,4	0,0	0,0	0,0	1261,3	276	0,5	
moyenne	11,6	2312	7,1	-12		0,0	2,2	0,1	1,5	64,0	520,5	11,8	0,2	3,9	0,0	0,0	0,4	0,0	1267,4	259	0,6	
écart type	0,6	28	0,1	7		0,0	0,6	0,1	0,6	5,3	10,5	0,9	0,1	3,2	0,1	0,0	0,4	0,0	34,4	24	1,2	
VS (4)	13/09/05	11,2	2250	7,9		0,0	1,3	0,0	0,9	30,7	558,0	10,1	0,1	3,8	0,1	0,0	0,2	0,0	1407,1	67	-0,7	
	03/03/06	3,5	2270	8,0		0,0	1,1	0,1	0,9	30,8	548,7	8,8	0,1	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1396,5	70	-1,1	
	31/05/06	9,9	1692	7,7	-39		0,0	1,8	0,0	1,3	23,1	393,1	6,4	0,0	2,3	0,0	0,0	1,3	951,9	61	1,1	
	31/08/06	14,07	1407	7,4	-26		0,0	2,0	0,0	1,9	18,5	309,3	4,2	0,3	1,7	0,0	0,0	0,5	0,0	755,6	76	-0,5
	moyenne	8,2	1905	7,7	-33		0,0	1,5	0,0	1,3	25,8	452,3	7,3	0,1	2,6	0,0	0,0	0,5	0,0	1127,8	68	-0,3
écart type	4,1	426	0,3	9		0,0	0,4	0,0	0,5	6,0	121,7	2,6	0,1	0,9	0,1	0,0	0,6	0,0	326,4	6	1,0	

PIEZOMETRES	date	t °C	cond.	pH	eH	LI	Na	NH4	K	Mg	Ca	Sr	F	Cl	NO2	Br	NO3	PO4	S04	HCO3	balance
Pz OT surf (3)	13/12/05	9,0	1144	7,2		0,0	9,2	0,1	1,7	36,2	165,6	3,3	0,0	7,5	0,1	0,0	3,0	0,0	376,5	285	-4,6
	20/01/06	11,1	1149	7,1		0,0	8,9	0,1	1,7	36,2	193,0	3,3	0,0	7,0	0,0	0,0	1,8	0,0	309,1	322	4,1
	03/03/06	10,2	1144	7,1		0,0	9,0	0,3	1,9	44,8	187,6	3,1	0,0	7,1	0,0	0,0	2,9	0,0	369,2	280	3,4
	mojenne	10,1	1146	7,1		0,0	9,0	0,2	1,8	39,2	182,1	3,2	0,0	7,2	0,0	0,0	2,6	0,0	351,6	296	1,0
	écart type	1,1	3	0,1		0,0	0,1	0,1	0,1	4,9	14,5	0,1	0,0	0,3	0,1	0,7	0,0	0,7	0,0	37,0	23
Pz OT prof (8)	13/12/05	10,2	1243	7,2		0,0	9,5	0,1	1,8	36,2	190,2	3,4	0,0	7,4	0,1	0,0	2,4	0,0	364,8	295	0,6
	20/01/06	10,6	1148	7,2		0,0	9,1	0,0	1,8	35,8	189,8	3,1	0,1	9,8	0,0	0,0	2,9	1,9	368,4	317	-1,9
	03/03/06	10,2	1136	7,1		0,0	9,3	0,2	2,0	45,2	188,7	3,1	0,1	9,9	3,5	0,0	3,1	0,0	370,2	307	1,3
	31/03/06	12,8	1115	7,1		0,0	9,1	0,1	1,9	44,0	181,7	2,8	0,1	7,7	0,2	0,0	2,8	0,0	355,4	306	1,4
	04/05/06	14,9	112	7,3		0,0	11,4	0,1	2,4	54,0	221,1	3,6	0,0	8,3	0,2	0,0	3,1	0,0	385,1	281	10,6
	31/05/06	12,1	1117	7,2	-20	0,0	10,4	0,2	3,1	44,7	187,2	2,6	0,1	7,5	0,8	0,0	2,5	0,0	337,9	281	6,1
	28/06/06	14,3	1143	7,5	-18	0,0	9,5	0,0	2,1	43,1	181,3	2,8	0,1	8,8	0,3	0,0	1,8	0,0	337,9	303	2,7
	31/08/06	13,7	1059	7,0	-8	0,0	9,4	0,0	2,1	41,6	174,4	2,4	0,0	8,2	0,2	0,5	2,9	0,0	314,9	305	2,7
	mojenne	12,4	1009	7,2	-15	0,0	9,7	0,1	2,1	43,1	189,3	3,0	0,0	8,5	0,7	0,1	2,7	0,2	354,1	299	2,9
	écart type	1,9	366	0,1	6	0,0	0,8	0,1	0,4	5,7	13,9	0,4	0,0	1,0	1,2	0,2	0,5	0,7	22,3	13	3,8
Pz poste surf (10)	24/10/05	13,0	1620	7,3		0,0	11,7	0,1	1,7	28,9	176,0	3,6	0,2	14,5	0,1	0,0	1,3	0,0	403,8	188	13,2
	23/11/05	14,9	1280	7,3		0,0	10,4	0,1	1,9	38,8	227,1	5,0	0,3	11,0	0,1	0,0	1,7	0,0	534,8	210	-0,1
	13/12/05	13,7	1338	7,3		0,0	10,0	0,1	1,8	40,6	238,2	5,4	0,2	10,1	0,0	0,0	1,2	0,0	555,2	228	0,0
	20/01/06	12,4	233	7,1		0,0	2,4	0,0	2,0	6,5	43,1	0,9	0,1	1,8	0,0	0,0	0,6	0,1	82,7	76	-3,5
	03/03/06	12,7	1270	7,1		0,0	9,9	0,1	2,2	48,6	225,3	4,7	0,2	9,2	0,2	0,0	1,5	0,0	501,2	227	3,8
	31/03/06	13,0	1086	7,4		0,0	8,2	0,0	2,6	38,7	192,4	3,8	0,2	7,7	0,3	0,0	0,0	0,0	434,1	217	1,0
	04/05/06	16,6	1313	7,2		0,0	9,5	0,0	1,9	48,8	225,8	6,0	0,2	9,5	0,3	0,0	1,0	0,0	532,6	237	1,2
	31/05/06	14,5	1294	7,2		0,0	10,3	0,1	2,8	49,6	229,2	3,9	0,2	9,7	0,0	0,0	0,7	0,0	524,6	238	2,5
	28/06/06	16,5	1290	7,5	-26	0,0	9,8	0,2	2,3	48,5	225,9	4,9	0,2	8,1	0,0	1,8	0,0	1,1	511,9	232	3,0
	31/08/06	16,9	1281	7,0	-7	0,0	9,9	0,0	2,9	49,1	226,0	4,3	0,3	10,6	0,2	0,0	2,1	11,5	520,2	220	1,8
mojenne	14,4	1200	7,2	-17	0,0	9,2	0,1	2,2	39,8	200,9	4,2	0,2	9,2	0,1	0,0	1,2	1,2	460,1	207	2,3	
écart type	1,7	364	0,1	13	0,0	2,5	0,1	0,4	13,5	58,7	1,4	0,0	3,2	0,1	0,0	0,6	3,6	140,7	49	4,4	
Pz poste prof (11)	13/09/05	16,5	1347	7,2		0,0	9,5	0,0	1,7	50,2	223,0	5,1	0,2	10,3	0,0	0,0	1,2	0,0	563,8	250	-1,8
	24/10/05	15,0	1134	7,2		0,0	10,4	0,3	3,0	41,2	238,8	5,4	0,3	10,5	0,0	0,0	1,4	0,0	571,9	250	12,2
	23/11/05	13,0	1373	7,2		0,0	10,4	0,0	2,6	39,0	221,0	5,2	0,2	10,3	0,0	0,0	1,1	0,0	563,7	232	-4,0
	13/12/05	12,0	1487	7,2		0,0	10,2	0,1	1,7	40,8	228,1	5,4	0,3	10,2	0,0	0,0	1,4	0,0	565,1	242	-3,0
	20/01/06	12,7	1359	7,2		0,0	10,1	0,1	1,7	40,6	237,9	4,7	0,3	11,5	0,0	0,0	1,6	0,0	570,4	259	-2,8
	03/03/06	12,0	1353	7,1		0,0	10,3	0,1	1,9	50,5	236,7	5,0	0,2	9,2	0,0	0,0	0,8	0,0	547,8	249	1,8
	31/03/06	14,6	1354	7,1		0,0	10,5	0,1	2,0	51,0	234,6	4,8	0,3	10,2	0,2	0,0	0,8	0,0	549,1	250	1,4
	04/05/06	15,3	1340	7,2		0,0	10,1	0,1	2,4	48,8	225,8	4,8	0,2	9,7	0,3	0,0	1,0	36,4	548,5	207	-1,9
	31/05/06	14,5	1429	7,2		0,0	10,8	0,0	2,5	50,0	228,7	4,0	0,3	9,5	0,6	0,0	0,0	0,0	530,1	220	3,2
	28/06/06	16,2	1363	7,6	-31	0,0	10,5	0,0	2,3	49,1	227,2	4,9	0,1	9,9	0,2	0,0	0,9	0,0	517,3	220	3,6
31/08/06	15,1	1305	7,1	-9	0,0	10,6	0,0	2,6	49,9	226,1	4,3	0,4	10,5	0,0	1,7	2,0	0,0	522,1	238	2,1	
mojenne	14,3	1349	7,2	-20	0,0	10,3	0,0	2,2	46,5	229,8	4,9	0,3	10,2	0,1	0,2	1,1	3,3	550,0	238	1,0	
écart type	1,6	86	0,2	16	0,0	0,3	0,1	0,4	4,9	6,2	0,4	0,1	0,6	0,2	0,5	0,5	1,1	19,4	16	4,6	
Pz taxi surf (10)	24/10/05	12,9	1378	7,2		0,0	9,5	0,2	1,9	38,9	206,0	3,3	0,1	8,1	0,1	0,0	2,3	0,0	455,2	290	-2,3
	23/11/05	11,5	1234	7,2		0,0	9,1	0,1	1,7	38,9	199,6	4,3	0,0	8,1	0,2	0,0	2,9	0,0	437,2	285	-2,0
	13/12/05	11,3	320	7,7		0,0	16,3	0,1	2,0	2,6	25,2	0,4	0,1	12,4	0,2	0,0	6,7	0,2	27,6	71	0,2
	20/01/06	10,3	543	7,4		0,0	14,1	0,1	2,1	14,5	87,7	1,4	0,4	9,4	0,0	0,0	1,8	0,0	163,4	173	-2,9
	03/03/06	10,6	454	7,7		0,0	31,1	0,0	2,4	22,2	109,7	1,7	0,1	40,4	0,2	0,0	2,8	0,0	189,0	178	3,3
	31/03/06	11,3	836	7,2		0,0	19,9	0,2	2,1	26,3	123,1	1,9	0,1	21,4	0,2	0,0	2,6	0,0	226,6	207	2,1
	04/05/06	13,1	1085	7,3		0,0	12,0	0,0	1,8	39,4	171,7	3,0	0,1	10,8	0,2	0,0	2,8	0,0	356,3	261	0,9
	31/05/06	12,1	1155	7,4	-21	0,0	10,4	0,2	2,8	45,8	194,4	2,8	0,0	8,0	0,0	0,0	10,8	14,2	392,1	282	0,9
	28/06/06	14,5	1165	7,6	-20	0,0	9,8	0,1	2,4	46,1	196,1	3,6	0,1	8,4	0,0	0,0	1,9	0,0	385,5	292	3,3
	31/08/06	14,2	1157	7,0	-8	0,0	9,3	0,0	1,7	45,4	194,5	2,6	0,1	9,2	4,0	3,0	2,0	14,7	384,4	287	0,7
mojenne	12,2	933	7,4	-16	0,0	14,2	0,1	2,1	32,0	150,8	2,5	0,1	13,6	0,5	3,7	2,9	301,7	233	0,4		
écart type	1,4	370	0,2	7	0,0	6,9	0,1	0,3	15,0	61,4	1,2	0,1	10,2	1,2	0,9	2,9	6,1	141,2	74	2,2	
Pz taxi prof (10)	24/10/05	12,0	1246	7,2		0,0	9,4	0,1	1,7	38,9	194,1	3,8	0,1	7,6	0,2	0,0	2,6	0,0	449,0	315	-5,4
	23/11/05	10,8	1250	7,3		0,0	9,7	0,1	1,8	39,3	196,4	3,8	0,0	7,9	0,2	0,0	2,7	0,0	438,7	277	-2,0
	13/12/05	10,3	1221	7,2		0,0	9,5	0,1	1,7	38,5	186,3	3,8	0,0	7,8	0,2	0,0	2,2	0,0	426,2	276	-3,1
	20/01/06	10,2	1212	7,1		0,0	8,4	0,0	1,6	34,8	187,1	3,0	0,0	9,1	0,0	0,0	2,2	0,0	424,7	289	-5,8
	03/03/06	10,8	1202	7,1		0,0	9,0	0,1	2,2	46,5	201,4	3,6	0,0	8,1	0,1	0,0	1,9	0,0	399,4	289	3,3
	31/03/06	12,2	1171	7,0		0,0	9,2	0,1	1,9	57,7	243,7	3,5	0,0	7,6	0,0	0,0	2,1	0,0	393,8	306	12,2
	04/05/06	15,2	1169	7,2		0,0	8,8	0,0	2,0	44,3	188,8	3,0	0,1	7,7	0,3	0,0</					

NAPPE ALLUVIALE		date	t °C	cond.	pH	eH	Li	Na	NH4	K	Mg	Ca	Sr	F	Cl	NO2	Br	NO3	PO4	S04	HCO3	balance	
Bellecombe (3)		31/05/06	10,7	909	7,7	-36	0,0	12,8	0,0	1,2	25,2	153,1	2,3	0,0	14,8	0,0	0,0	7,2	0,0	277,7	201	3,0	
		28/06/06	13,4	766	7,9	-48	0,0	8,5	0,3	1,5	20,3	124,6	2,4	0,0	9,0	0,3	0,0	3,6	0,0	227,5	161	3,5	
		31/08/06	18,1	844	7,4	-27	0,0	7,8	0,0	1,1	22,1	143,0	2,1	0,1	9,8	0,0	0,0	1,6	0,0	293,9	137	3,1	
		moyenne	14,1	840	7,6	-37	0,0	9,7	0,1	1,3	22,5	140,2	2,3	0,1	11,2	0,1	0,0	4,1	0,0	266,3	166	3,2	
		écarttype	3,7	72	0,2	11	0,0	2,7	0,2	0,2	2,5	14,5	0,1	0,0	3,1	0,2	0,0	2,8	0,0	34,6	33	0,3	
Isère (6)		03/03/06	3,7	1093	7,7	7,7	0,0	20,9	0,0	1,8	31,6	176,7	3,5	0,1	27,1	0,0	0,0	6,5	0,0	389,4	152	3,2	
		31/03/06	4,0	555	7,7	7,7	0,0	7,4	0,3	1,6	13,5	89,6	1,0	0,0	12,0	0,0	0,0	2,4	0,0	127,9	163	1,6	
		04/05/06	11,0	628	8,1		0,0	5,9	0,2	1,1	17,1	101,9	1,7	0,1	8,4	0,3	0,0	3,5	0,0	170,2	146	3,8	
		31/05/06	15,1	695	8,3	-71	0,0	6,5	0,2	1,2	17,3	103,5	1,3	0,0	8,4	0,4	0,0	4,2	0,0	179,4	135	4,5	
		28/06/06	11,2	480	8,5	-81	0,0	6,0	0,4	1,7	19,6	115,0	2,1	0,1	6,4	0,2	0,0	1,6	0,0	227,5	132	3,4	
		31/08/06	9,0	690	8,1	-76	0,0	8,7	0,2	1,5	18,3	110,8	1,8	0,1	11,5	0,2	0,0	1,1	0,0	154,0	96	0,3	
	écarttype	5,0	239	0,4	7	0,0	6,0	0,2	0,3	7,2	34,6	0,9	0,0	7,9	0,2	0,0	2,0	0,0	208,1	138	2,8		
																				94,7	23	1,6	
CARBONATES		date	t °C	cond.	pH	eH	Li	Na	NH4	K	Mg	Ca	Sr	F	Cl	NO2	Br	NO3	PO4	S04	HCO3	balance	
Avignons (3)		13/09/05	13,8	496	8,2	8,2	0,0	17,5	0,2	1,3	10,3	74,4	0,7	1,3	5,1	0,1	0,0	2,7	0,3	56,4	195	7,2	
		31/05/06	8,7	334	8,1	-61	0,0	1,9	0,1	0,3	6,0	61,4	0,3	0,2	0,7	0,3	0,0	6,2	0,0	21,4	165	5,3	
		31/08/06	4,38	8,2	-71	0,0	1,1	0,0	0,2	8,9	80,8	0,3	0,0	1,2	1,2	0,1	0,0	2,0	0,0	59,6	205	1,4	
		moyenne	11,3	423	8,1	-66	0,0	6,9	0,1	0,6	8,4	72,2	0,4	0,5	2,4	0,2	0,0	3,6	0,1	45,8	188	4,6	
	écarttype	3,6	82	0,0	7	0,0	9,2	0,1	0,6	2,2	9,9	0,2	0,7	2,4	0,1	0,0	2,2	0,2	21,2	21	2,9		
Guillots (2)		13/09/05	7,6	310			0,0	0,9	0,0	0,5	4,5	59,6	0,5	0,0	0,7	0,1	0,0	0,9	0,0	26,9	116	15,3	
		03/03/06	0,0	321	8,2	8,2	0,0	0,9	0,1	0,3	4,3	60,9	0,4	0,0	0,4	0,2	0,0	2,6	0,0	25,7	249	-15,1	
		moyenne	3,8	316	8,2	8,2	0,0	0,9	0,0	0,4	4,4	60,2	0,4	0,0	0,5	0,1	0,0	1,8	0,0	26,3	182	0,1	
SOCLE		date	t °C	cond.	pH	eH	Li	Na	NH4	K	Mg	Ca	Sr	F	Cl	NO2	Br	NO3	PO4	S04	HCO3	balance	
Pont Botto (4)		13/09/05	10,8	103	8,2	8,2	0,0	0,9	0,0	1,2	1,1	17,5	0,2	0,0	0,2	0,1	0,0	1,7	0,0	4,6	46	7,8	
		03/03/06	4,7	111	8,1		0,0	1,0	0,1	1,3	1,2	17,9	0,2	0,0	0,4	0,2	0,0	1,7	0,0	5,4	49	6,0	
		31/05/06	7,2	103	8,4	-77	0,0	1,0	0,1	1,3	1,1	17,5	0,1	0,0	0,7	0,1	0,0	2,8	0,0	5,1	49	3,4	
		31/08/06	9,7	7,8	-51	0,0	1,0	0,0	1,3	1,0	16,2	0,1	0,0	0,4	0,2	0,5	2,3	0,0	4,4	46	3,1		
		moyenne	7,6	104	8,1	-64	0,0	1,0	0,1	1,3	1,1	17,3	0,2	0,0	0,4	0,1	0,1	2,1	0,0	4,9	48	5,1	
	écarttype	3,1	6	0,3	18	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8	0,0	0,0	0,2	0,1	0,3	0,5	0,0	0,5	1	2,2	
Glazette (4)		13/09/05	13,2	312			0,0	2,7	0,0	0,5	2,4	61,4	0,4	0,1	0,9	0,1	0,0	0,7	0,0	24,1	155	4,8	
		03/03/06	1,6	227	7,9		0,0	2,0	0,0	0,4	1,8	42,2	0,2	0,0	1,3	0,4	0,0	0,5	0,0	23,1	100	3,9	
		31/05/06	8,2	236	8,0	-53	0,0	2,9	0,2	1,1	1,9	45,4	0,2	0,1	1,3	0,1	0,0	0,2	0,0	22,1	100	9,2	
		31/08/06	266	7,8	-49	0,0	2,5	0,0	0,6	2,1	49,4	0,2	0,0	1,2	0,0	0,0	0,9	0,0	22,9	127	2,8		
	moyenne	7,7	260	7,9	-51	0,0	2,5	0,1	0,6	2,1	49,6	0,3	0,1	1,2	0,2	0,0	0,6	0,0	23,1	120	5,2		
	écarttype	5,8	38	0,1	3	0,0	0,4	0,1	0,3	0,3	8,4	0,1	0,0	0,2	0,2	0,0	0,3	0,0	0,8	0,8	2,6		
Tartet (2)		13/09/05	12,1	175	8,4		0,0	2,0	0,0	2,5	2,3	28,8	0,2	0,1	0,4	0,1	0,0	0,6	0,0	19,7	95	-5,9	
		03/03/06	1,3	193	7,9		0,0	2,3	0,4	2,4	2,5	31,0	0,2	0,1	0,7	0,1	0,0	0,9	0,0	28,1	68	5,0	
		moyenne	6,7	184	8,2		0,0	2,2	0,2	2,4	2,4	29,9	0,2	0,1	0,6	0,1	0,0	0,8	0,0	23,9	82	-0,5	
Sec des îles (2)		31/05/06	7,4	387	8,1	-62	0,0	2,2	0,5	1,8	7,7	65,6	0,9	0,0	1,1	0,1	0,0	2,5	0,0	106,9	94	2,6	
		31/08/06	4,24	7,6	-39	0,0	2,8	0,1	1,9	8,3	70,9	0,9	0,0	1,4	0,0	0,0	1,4	0,0	1,4	0,2	122,4	104	0,5
		moyenne	7,4	406	7,9	-51	0,0	2,5	0,3	1,9	8,0	68,3	0,9	0,0	1,3	0,1	0,0	1,9	0,1	114,7	99	1,6	

ANNEXE 7

FORMULES DE CALCULS GEOTHERMOMETRIQUES

Géothermomètre Na/K

a) Fournier, 1979

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1217}{1,483 + \log(\text{Na} / \text{K})} - 273,15$$

avec [Na] et [K] en mol/l

b) in Siméon, 1980

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{908}{0,7 + \log(\text{Na} / \text{K})} - 273,15$$

avec [Na] et [K] en mol/l

c) Michard, 1979

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{933}{0,993 + \log(\text{Na} / \text{K})} - 273,15$$

avec [Na] et [K] en mg/l

Géothermomètre Na/K/Ca

a) Fournier and Truesdell, 1973

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{2,24 + \log(\text{Na} / \text{K}) + \beta \log \sqrt{(\text{Ca} / \text{Na})}} - 273,15$$

avec $\beta = 1/3$ ou $4/3$ et [Na], [K] et [Ca] en mol/l

b) Fournier and Truesdell, 1973

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{2,47 + \log(\text{Na} / \text{K}) + \beta \log \sqrt{(\text{Ca} / \text{Na})} + 2,06} - 273,15$$

avec $\beta = 1/3$ si $\log \sqrt{(\text{Ca} / \text{Na})} + 2,06 > 0$
 et $\beta = 4/3$ si $\log \sqrt{(\text{Ca} / \text{Na})} + 2,06 < 0$
 et [Na], [K] et [Ca] en mol/l

Géothermomètre K/Mg

Giggenbach, 1988

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{4410}{14 - \log(K^2 / Mg)} - 273,15$$

avec [K] et [Mg] en mg/l

Géothermomètre à silice

Fournier and Truesdell, 1974

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1522}{5,75 + \log(\text{SiO}_2)} - 273,15$$

avec [SiO₂] en ppmGéothermomètre à quartz

Fournier, 1977

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1309}{5,19 + \log(\text{SiO}_2)} - 273,15$$

avec [SiO₂] en mg/lGéothermomètre à chalcédoine

Fournier, 1977

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1032}{4,69 + \log(\text{SiO}_2)} - 273,15$$

avec [SiO₂] en mg/lGéothermomètre Na/Li

Fouillac and Michard, 1981

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1000}{0,38 - \log(\text{Na} / \text{Li})} - 273,15$$

avec [Na] et [Li] en mol/l

ANNEXE 8

DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES DES FORAGES THERMAUX DE LA LECHERE

BSS : Banque du Sous-Sol

CRG : Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon

IHC : Institut d'Hydrologie et de Climatologie

IPL : Institut Pasteur de Lyon

LAM : Laboratoire de l'Académie de Médecine

LCAG : Laboratoire de Chimie Analytique de Grenoble

LNS : Laboratoire National de la Santé

LSEHL : Laboratoire Santé Environnement Hygiène de Lyon

Concentrations en mg/l

R I

référence	laboratoire	date	t°C en °C	χ à 25°C en $\mu\text{S}/\text{cm}$	RS à 110°C	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	Ca	Mg	K	Na	Li	Sr
courrier de A. Lepape	IHC	18/09/1925	52,8													
rap. BRGM n°84AGI385RHA	LAM	1930	54	3297	3007	41	97	113			546	52		268		
rap. BRGM n°84AGI385RHA	SRHN	24/04/1952		3285			105	154	1771		539	44	20	275		
rap. SOGREAH n° 100638R2	?	07/05/1952					105	154	1771		539	44	20	275		
courrier de A. Lepape	IHC	26/01/1954	53,8													
DRIRE	IPL	27/09/1954	54,2													
DRIRE	IPL	18/04/1955	50,5													
DRIRE	IPL	31/08/1955	56,7													
DRIRE	IPL	03/10/1955	55,6													
DRIRE	IPL	27/10/1955	56													
DRIRE	IPL	16/04/1956	54,6													
DRIRE	IPL	17/09/1956	55													
DRIRE	IPL	11/04/1957	54,6													
DRIRE	IPL	23/09/1957	54,2													
DRIRE	IPL	29/04/1958	55													
DRIRE	IPL	07/10/1958	53,5													
DRIRE	IPL	07/04/1959	53,7													
DRIRE	IPL	30/06/1959	55,2													
DRIRE	IPL	13/04/1960	53,8													
DRIRE	IPL	13/04/1961	52,4													
DRIRE	IPL	19/06/1961	55													
DRIRE	IPL	25/04/1962	54,2													
DRIRE	IPL	07/06/1962	54													
DRIRE	IPL	11/04/1963	53													
DRIRE	IPL	09/07/1963	54													
DRIRE	IPL	14/04/1964	53													
DRIRE	IPL	30/07/1964	53,5													
DRIRE	IPL	06/04/1965	52	3471			92		1670							
DRIRE	IPL	12/08/1965	53	3703			116									
DRIRE	IPL	26/04/1966	52,8	3186			101		1824							
DRIRE	IPL	23/08/1966	52	3410			101		1977							
DRIRE	IPL	18/05/1967	52,8	3212			88	156								
DRIRE	IPL	12/09/1967	53	3076			88	156	1960							
DRIRE	IPL	21/05/1968	54	3143			88	153								
DRIRE	IPL	24/09/1968	54	3212			98	149								
DRIRE	IPL	02/05/1969	52,5	3212			89	149								
DRIRE	IPL	03/09/1969	54,3	2914			85	156								
DRIRE	IPL	06/05/1970	53,5	2914			85	153								
DRIRE	IPL	03/09/1970	50,4	2982			92	156								
DRIRE	IPL	29/04/1971	53,6	3044			85	156								
DRIRE	IPL	27/07/1971	53,9	3420			85	156								
DRIRE	IPL	13/04/1972	53,2	3230			79	149								
DRIRE	IPL	24/08/1972	55,5	3230			82	152								
DRIRE	IPL	30/11/1972	55	3230			76	149								
DRIRE	IPL	03/05/1973	54	3420			98	121								
DRIRE	IPL	04/07/1973	54,5	3578			76	153								
DRIRE	IPL	05/12/1973	51,5	3143			79	121								
DRIRE	IPL	17/05/1974	55	3634			70	142								
DRIRE	IPL	20/09/1974	54	3524			79	195								
DRIRE	IPL	05/12/1974	51	3294			73	135								
DRIRE	IPL	22/05/1975	52	3322			85	133								
DRIRE	IPL	09/09/1975	54	3285			79	124								
DRIRE	IPL	09/12/1975	51	2936			82	107								
DRIRE	IPL	24/05/1976	52	3028			85	128								
DRIRE	IPL	02/09/1976	51	3160			92	178								
DRIRE	IPL	21/12/1976		3611			85	138								
DRIRE	IPL	19/04/1977	52	3400			83	108								
DRIRE	IPL	02/08/1977	53	3390			73	40								
DRIRE	IPL	05/04/1978	52,5	3268			76	130								
DRIRE	IPL	11/07/1978	51,5	3367			85	125								
DRIRE	IPL	12/12/1978	51	3221			82	140								
DRIRE	IPL	18/04/1979	49,5	3175			85	122								
DRIRE	IPL	10/07/1979	51	3268			85	130								
thèse d'Y. Siméon (1980)	LCAG	1978-1979									540		20	228	0,9	13
DRIRE	IPL	08/04/1980	47	2849			98	130								
DRIRE	IPL	08/07/1980	47	3239			92	125								
DRIRE	IPL	16/02/1994	33													

R II

référence	laboratoire	date	t°C en °C	pH	χ à 25°C en μS/cm	RS à 110°C	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	K	Na	Li	Sr	NH4
DRIRE	LAM	13/10/1949					55	45	119	1709			508	48	35	210			
DRIRE	LAM	13/10/1949					52	50	115	1658			495	46	33	215			
rap. SOGREAH n° 100638R2		24/04/1952							132	1576			482	47	17	247			
DRIRE	LAM	13/04/1953					54	44	123	1762			536	48	35	211			
courrier de A. Lepape	IHC	28/01/1954	47,7																
DRIRE	le Pape	01/09/1954																	
DRIRE	IPL	27/09/1954	52																
DRIRE	IPL	18/04/1955	51																
DRIRE	IPL	17/07/1955	50																
DRIRE	IPL	31/08/1955	52																
DRIRE	IPL	03/10/1955	52,3																
DRIRE	IPL	27/10/1955	54																
DRIRE	IPL	16/04/1956	53,8																
DRIRE	IPL	17/09/1956	53,6																
DRIRE	IPL	11/04/1957	53,7																
DRIRE	IPL	23/09/1957	52,2																
DRIRE	IPL	29/04/1958	54,6																
DRIRE	IPL	07/10/1958	54,6																
DRIRE	IPL	07/04/1959	55,5																
DRIRE	IPL	30/06/1959	53																
DRIRE	IPL	13/04/1960	54,4																
DRIRE	IPL	13/04/1961	54,4																
DRIRE	IPL	19/06/1961	54,2																
DRIRE	IPL	25/04/1962	52,8																
DRIRE	IPL	07/06/1962	54,5																
DRIRE	IPL	01/08/1962	53,8																
DRIRE	IPL	17/08/1962	54																
DRIRE	IPL	11/04/1963	53,3																
DRIRE	IPL	09/07/1963	51,8																
DRIRE	IPL	14/04/1964	53																
DRIRE	IPL	30/07/1964	53,8																
DRIRE	IPL	29/06/1965	51		3351			107											
DRIRE	IPL	12/08/1965	52		3727			104											
DRIRE	IPL	26/04/1966	54		3143			107		1816									
DRIRE	IPL	23/06/1966	53,5		3390			98		1977									
DRIRE	IPL	18/05/1967	50,5		3101			95	156	1776									
DRIRE	IPL	12/09/1967	55		2755			116	149	1844									
DRIRE	IPL	21/05/1968	56		2802			95	142										
DRIRE	IPL	24/09/1968	54		2997			98	142										
DRIRE	IPL	02/05/1969	55		3143			89	142										
DRIRE	IPL	03/09/1969	54,1		2795			92	149										
DRIRE	IPL	06/05/1970	54,7		2795			98	150										
DRIRE	IPL	03/09/1970	52,3		2795			116	149										
DRIRE	IPL	13/04/1972	54,5		3143			89	140										
DRIRE	IPL	27/07/1972	51,2		3322			98	149										
DRIRE	IPL	24/08/1972	49,5		2929			128	97										
DRIRE	IPL	03/05/1973	55,5		3143			92	153										
DRIRE	IPL	04/07/1973	54		3471			79	156										
DRIRE	IPL	17/06/1974	56		3461			77	142										
DRIRE	IPL	20/09/1974	53,5		3332			85	117										
DRIRE	IPL	22/05/1975	52,5		3322			85	133										
DRIRE	IPL	09/09/1975	35		3285			77	121										
DRIRE	IPL	24/05/1976	56		2982			73	128										
DRIRE	IPL	02/09/1976	49		3109			70	185										
DRIRE	IPL	19/04/1977	55		3400			71	135										
DRIRE	IPL	02/08/1977	37,5		3294			76	140										
DRIRE	IPL	05/04/1978	54		3175			82	125										
DRIRE	IPL	11/07/1978	53		3317			82	125										
DRIRE	IPL	18/04/1979	54,5		3130			85	127										
DRIRE	IPL	10/07/1979	55		3175			79	128										
DRIRE	IPL	08/04/1980	55		3317			85	135										
DRIRE	IPL	08/07/1980	51		3194			92	122										
DRIRE	IPL	09/12/1980	48		3086			90	130										
DRIRE	IPL	07/04/1981	44		3268			88	160										
DRIRE	IPL	07/07/1981	50,5		3230			104	127										
DRIRE	IPL	05/04/1982	51		3086			92	130										
DRIRE	IPL	05/07/1982	49		3175			88	130										
DRIRE	IPL	24/11/1982	51,8		3130			104	135										
DRIRE	IPL	14/03/1983	51,2		2924			70	125										
rap. BRGM n°84AGI385RHA	IPL	05/09/1983	54	7,1	3166	2973	45	95	95	1750	<1		535	42	18	216			1,5
DRIRE	IPL	05/09/1983					45	95	95	1750	<1		535	42	18	216			1,5
DRIRE	IPL	05/09/1983	50,7		3166			95	95										
DRIRE	IPL	12/01/1984					40	98	105	1725	<1		498	46	16	202			0,8
DRIRE	IPL	12/01/1984					35	116	100	1450	<1		420	45	15	239			1,0
DRIRE	IPL	14/03/1984					38	134	85	1675	<1		520	50	20	198			0,6
DRIRE	IPL	16/04/1984	51		2886			98	125										
DRIRE	IPL	12/06/1984	51		3130			104	136										
DRIRE	IPL	10/10/1984	48,6		3053			107	115										
rap. BRGM n° 85 SGN 089 RHA	IPL	09/12/1984	53,2				41	116	130	1721	0,0		524	47	18	259	1,0		9
DRIRE	IPL	11/03/1985	50,3		2924			110	105										
DRIRE	IPL	10/06/1985	48,1		2886			116	115										
DRIRE	IPL	07/10/1985	49,2		3221			113	115										
DRIRE	IPL	10/03/1986	51,1		2963			98	115										
DRIRE	LNS	21/04/1986	53,7	7,2	4520		48	90	124	1752	<0,2	2,7	518	44	18	253	1,0		9
DRIRE	IPL	09/06/1986	51,2		3130			101	140										
DRIRE	IPL	02/10/1986	49,6		3086			104	120										
DRIRE	IPL	08/04/1987	51,8		3175			95	123										
DRIRE	IPL	11/06/1987	50,1		3317			104	104										
DRIRE	IPL	07/10/1987	49		3175			110	112										
DRIRE	IPL	11/04/1988	46		3003			123	105										
DRIRE	IPL	05/05/1988	46		3003			126	104										
DRIRE	IPL	07/07/1988	46		3104			119	122										
DRIRE	IPL	13/10/1988	43		2916			121	112										
DRIRE	LSEHL	02/05/1989	43		2752	2702	39	121	104	1655	<1		515	47	14	216			1,0
DRIRE	LSEHL	19/07/1989	41		2646			138	92										
DRIRE	LSEHL	26/07/1990	40		2560			146	81										
DRIRE	LSEHL	11/10/1990	41		2737			128	95										
DRIRE	LSEHL	09/04/1991	45		2750			105	107										
DRIRE	LSEHL	30/07/1991	42		2389			134	93										

R II (suite)

référence	laboratoire	date	t°C en °C	pH	χ à 25°C en µS/cm	RS à 110°C	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	K	Na	Li	Sr	NH4
DRIRE	LSEHL	08/10/1991	41		2447			124	107										
DRIRE	IPL	06/05/1992	42		2415			145	90										
DRIRE	IPL	15/07/1992	36		2469			185	67										
DRIRE	IPL	13/10/1992	34	7,2	2554	2411	30	157	82	1557	<1	1,7	430	48	11	182			0,6
DRIRE	IPL	20/03/1993	45		3069			115	101										
DRIRE	IPL	27/07/1993	42		2813			138	90										
DRIRE	IPL	19/10/1993	39		2710			151	99										
DRIRE	IPL	19/10/1993	47		2924			134	100										
DRIRE	IPL	27/04/1994	45		3003			111	106										
DRIRE	IPL	20/10/1994	44		2923			119	100										
DRIRE	IPL	19/04/1995	43		3044			113	101										
DRIRE	IPL	21/06/1995	41	7,2	2784	2654	36	139	83	1530	<1	2,0	500	47	15	172	0,7		0,7
DRIRE	IPL	18/07/1995	40		2813			135	83										
DRIRE	IPL	17/10/1995	40		2785			132	85										
DRIRE	IPL	11/04/1996	43		2671			140	87										
DRIRE	IPL	11/07/1996	41		2805			139	88										
rap. ANTEA n° A08758	?	27/01/1997	50	6,9	3080														
rap. ANTEA n° A08759	?	27/01/1997	49,6	7,0	3080														
rap. ANTEA n° A08760	?	28/01/1997	49	6,8	2960														
rap. ANTEA n° A08761	?	28/01/1997	48,5	6,9	2900														
rap. ANTEA n° A08762	?	28/01/1997	48	7,0	2900														
rap. ANTEA n° A08763	?	28/01/1997	47	7,2	2900														
rap. ANTEA n° A08766	?	29/01/1997	47,2	6,8															
rap. ANTEA n° A08767	?	29/01/1997		6,9															
rap. ANTEA n° A08768	?	29/01/1997		6,8															
rap. ANTEA n° A08769	?	30/01/1997		6,8															
rap. ANTEA n° A08770	?	30/01/1997		6,8															
rap. ANTEA n° A08771	?	30/01/1997		6,8															
rap. ANTEA n° A08772	?	30/01/1997		6,9															
rap. ANTEA n° A08773	?	30/01/1997		7,0															
DDASS	?	09/10/1998					57	105	196	1596			475	39	15	286			
DDASS	?	23/12/1998	36																
DDASS	?	07/01/1999	36	7,2	2477		36	197	88	1198			397	49	11	145			
DDASS	?	19/01/1999	35,4	7,2	2388		34	204	82	1158			388	50	10	131			
DDASS	?	03/02/1999	35	7,1	2494		37	194	86	1231			409	51	10	137			
DDASS	?	17/02/1999	35	7,2	2470		34	195	85	1223			402	51	10	143			
DDASS	?	22/02/1999	36,2	7,2	2642		33	181	91	1337		1,7	441	53	11	146			0,5
DDASS	?	01/03/1999	38,8	7,2	2655		37	175	95	1397			447	51	11	160			
DDASS	?	07/04/1999	38																
DDASS	?	20/04/1999	41,8	7,2	2995		31	141	103	1658			497	53	12	184			13
DDASS	?	06/05/1999	43	7,3	2989		43	136	98	1694			543	52	12	174			9
DDASS	?	23/07/1999	42,2																1,6
DDASS	?	29/07/1999	41,4		2955			139	89	1681									
DDASS	?	05/08/1999	40,8																
DDASS	?	12/08/1999	41,3		2992		31	137	86	1656			524	53		164			
DDASS	?	17/08/1999	40,8																
DDASS	?	25/08/1999	40,6																
DDASS	?	02/09/1999	40,3																
DDASS	?	07/09/1999	40,2																
DDASS	?	15/09/1999	39,7																
DDASS	?	22/09/1999	39,1		2820		34	151	80	1576			513	53		150			
DDASS	?	29/09/1999	38,5																
DDASS	?	05/10/1999	40,4																
DDASS	?	14/10/1999	39,9																
DDASS	?	20/10/1999	39		2814		37	151	80	1543			459	52		153			
DDASS	?	27/10/1999	39,1																
DDASS	?	03/11/1999	38,8																
DDASS	?	09/11/1999	38,9		2756		39	154	80	1566			499	52		162			
DDASS	?	03/02/2000	35,3		2270		33	198	60	1176			388	43		113			
DDASS	?	02/03/2000	29		1995		21	233	47	969			323	44		84			
DDASS	?	31/01/2001	30	6,8	2245		28	212	54	1185			385	50	9	104			
DDASS	?	20/06/2001	27,4	7,0	2122		21	220	45	1014			359	50	6	86			
DDASS	?	05/09/2001	30,5	7,0	2298		23	202	51	1190			406	55	8	107			
DDASS	?	14/11/2001	29,3	7,0	2188		25	216	48	1205			371	49	9	100			
DDASS	?	15/01/2002	28,8	7,0	2125		24	219	47	1133			372	50	9	95			
DDASS	?	04/04/2002	28,6	7,0	2107		24	219	47	1082			370	50	8	96			
DDASS	?	25/07/2002	28,7	7,0	2037		21	220	48	1067			386	48	8	92			
DDASS	?	08/10/2002	29,2	6,9	2180		27	50	1107				374	50	8	98			
rap. SOGREAH n°730118R5	?	08/01/2003	28,7	6,9	2096		21	46	1026				372	50	8	92			
rap. SOGREAH n°730118R6	?	08/04/2003	29,4		2175		25	46	1087				376	50	7	91			
rap. SOGREAH n°730118R7	?	10/07/2003	27,9	7,1	2070		24	43	1026				366	50	7	84			
rap. SOGREAH n°730118R8	?	23/10/2003	27,3	7,1	2087		22	43	1020				377	55	7	86			
DDASS	LSEHL	08/04/2004	27,5	7,0	2150		22	43	1050				355	48	6	79			
DDASS	LSEHL	06/07/2004	31,4	7,1	2280		24	50	1149				417	53	9	109			
DRIRE	LSEHL	05/10/2004	30,4	6,95	2236		23	48	1137				408	56	8	100			

R III

référence	laboratoire	date	t°C en °C	pH	χ à 25°C en µS/cm	RS à 110°C	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	K	Na	Li	Sr	NH4
rap. BRGM n°87 SGN 376 RHA	LAM	13/10/1949	51				52	50	115	1658			495	46	33	215			
rap. SOGREAH n°100638R3	?	25/02/1952						104	132	1677			511	44	17	253			
BSS du BRGM	LAM	1953		7,2		2894		90	123	1762			536	48	35	211			
courrier de A. Lepape	IHC	29/01/1954	51,8																
courrier de A. Lepape	IHC	30/01/1954	52,8																
DRIRE	IPL	27/09/1954	52																
DRIRE	IPL	18/04/1955	52,2																
DRIRE	IPL	31/08/1955	54,2																
DRIRE	IPL	03/10/1955	53																
DRIRE	IPL	27/10/1955	54,2																
DRIRE	IPL	16/04/1956	55																
DRIRE	IPL	17/09/1956	51																
DRIRE	IPL	11/04/1957	48																
DRIRE	IPL	23/09/1957	50,3																
DRIRE	IPL	29/04/1958	53																
DRIRE	IPL	07/10/1958	50,7																
DRIRE	IPL	04/11/1958	49,6																
DRIRE	IPL	06/01/1959	50,3																
DRIRE	IPL	07/04/1959	52,5																
DRIRE	IPL	22/05/1959	52,4																
DRIRE	IPL	30/06/1959	50,5																
DRIRE	IPL	13/04/1960	51,2																
DRIRE	IPL	13/04/1961	51																
DRIRE	IPL	19/06/1961	51,2																
DRIRE	IPL	25/04/1962	52																
DRIRE	IPL	07/06/1962	51																
DRIRE	IPL	11/04/1963	51																
DRIRE	IPL	09/07/1963	49																
DRIRE	IPL	14/04/1964	50																
DRIRE	IPL	30/07/1964	49																
DRIRE	IPL	06/04/1965	50,9		3143			116		1334									
DRIRE	IPL	12/08/1965	48		3440			122											
DRIRE	IPL	26/04/1966	51,3		2944			128		1536									
DRIRE	IPL	23/08/1966	52		3239			116		1850									
DRIRE	IPL	18/05/1967	53		3020			110	153	1632									
DRIRE	IPL	12/09/1967	50		2809			116	149	1653									
DRIRE	IPL	21/05/1968	49		2775			140	128										
DRIRE	IPL	24/09/1968	49,5		2815			140	121										
DRIRE	IPL	02/05/1969	53		2982			104	128										
DRIRE	IPL	03/09/1969	49,1		2795			116	146										
DRIRE	IPL	06/05/1970	52		2788			116	142										
DRIRE	IPL	03/09/1970	46,8		2795			122	142										
DRIRE	IPL	29/04/1971	51,4		2850			116	142										
DRIRE	IPL	27/07/1971	52		3060			116	142										
DRIRE	IPL	13/04/1972	54		3060			103	142										
DRIRE	IPL	24/08/1972	46,1		2929			140	107										
DRIRE	IPL	30/11/1972	50		2944			116	131										
DRIRE	IPL	03/05/1973	54,3		3322			116	130										
DRIRE	IPL	04/07/1973	48		3143			113	128										
DRIRE	IPL	05/12/1973	49		2836			113	92										
DRIRE	IPL	17/06/1974	48,5		3876			116	110										
DRIRE	IPL	20/09/1974	46		2836			128	85										
DRIRE	IPL	05/12/1974	50		3028			104	114										
DRIRE	IPL	22/05/1975	47		2907			119	98										
DRIRE	IPL	09/09/1975	48,5		2982			113	103										
DRIRE	IPL	09/12/1975	51		2795			107	99										
DRIRE	IPL	24/05/1976	45,5		2544			128	79										
DRIRE	IPL	02/09/1976	47,5		2795			122	135										
DRIRE	IPL	21/11/1976	47		3194			119	100										
DRIRE	IPL	19/04/1977	53		3303			85	130										
DRIRE	IPL	02/08/1977	50		3028			70	115										
DRIRE	IPL	05/04/1978	45,5		2886			119	93										
DRIRE	IPL	11/07/1978	48		3044			110	103										
DRIRE	IPL	12/12/1978	51,5		3044			101	115										
DRIRE	IPL	18/04/1979	49		2963			101	115										
DRIRE	IPL	10/07/1979	48		3003			98	113										
DRIRE	IPL	11/12/1979	49		2778			101	111										
DRIRE	IPL	08/04/1980	51		3130			104	107										
DRIRE	IPL	08/07/1980	44		2982			122	97										
DRIRE	IPL	09/12/1980	48		2924			111	112										
DRIRE	IPL	07/04/1981	48		3086			107	120										
DRIRE	IPL	07/07/1981	50		3095			122	105										
DRIRE	IPL	08/12/1981	48		3003			101	110										
DRIRE	IPL	05/04/1982	49,5		2963			113	110										
DRIRE	IPL	05/07/1982	47,2		2963			116	100										
DRIRE	IPL	14/03/1983	46		2677			134	90										
DRIRE	IPL	21/09/1983	44,7																
rap. SOGREAH n°100638R2		09/12/1983					44	146	93	1606	0,0		520	56	14	180	0,6		
rap. BRGM n°84AGI385RHA	IPL	12/01/1984		7,1	3968	2843	40	98	105	1725	<1	2,2	498	46	16	202			0,8
rap. BRGM n°87 SGN 376 RHA	IPL	13/01/1984				2843	40	98	105	1725	<1		498	47	16	202			0,8
DRIRE	IPL	16/04/1984	43		2743			131	82										
DRIRE	IPL	12/06/1984	47,3		2987			122	110										
DRIRE	IPL	10/10/1984	47,6		3053			122	100										
rap. BRGM n°85 SGN 089 RHA	IPL	09/12/1984	43,9			44	146	93	1606	0,0			520	56	14	180	0,6	12	
DRIRE	IPL	11/03/1985	38,6		2924			143	72										
DRIRE	IPL	10/06/1985	42,2		2792			134	85										
DRIRE	IPL	07/10/1985	47,2		3086			122	90										
référence de L'AM du 14.09.1987	LNS	21/04/1																	

R IV

référence	laboratoire	date	t°C en °C	pH	χ à 25°C en μS/cm	RS à 110°C	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	K	Na	Li	Sr	NH4
rap. BRGM n°84AGI385RHA	LAM	1953	51	7,2	2849	2895		90	123	1762	0,0		536	48	35	211			
courrier de A. Lepape	IHC	27/01/1954	55,5																
courrier de A. Lepape	IHC	26/09/1954																	
DRIRE	IPL	27/09/1954	50,6																
DRIRE	IPL	18/04/1955	50,5																
DRIRE	IPL	31/08/1955	52,2																
DRIRE	IPL	03/10/1955	52,9																
DRIRE	IPL	27/10/1955	53																
DRIRE	IPL	16/04/1956	53,4																
DRIRE	IPL	17/09/1956	49,4																
DRIRE	IPL	11/04/1957	53,8																
DRIRE	IPL	23/09/1957	47,9																
DRIRE	IPL	29/04/1958	53,4																
DRIRE	IPL	07/10/1958	49																
DRIRE	IPL	07/04/1959	53																
DRIRE	IPL	30/06/1959	49,5																
DRIRE	IPL	24/07/1959	49																
DRIRE	IPL	31/07/1959	48,6																
DRIRE	IPL	31/07/1959			3186														
DRIRE	IPL	13/04/1960	51,4																
DRIRE	IPL	13/04/1961	51,4																
DRIRE	IPL	19/06/1961	48,8																
DRIRE	IPL	25/04/1962	51,5																
DRIRE	IPL	07/06/1962	49																
DRIRE	IPL	11/04/1963	50,8																
DRIRE	IPL	09/07/1963	43																
DRIRE	IPL	14/04/1964	50																
DRIRE	IPL	30/07/1964	48																
DRIRE	IPL	06/04/1965	50,8		3143			116		1334									
DRIRE	IPL	12/08/1965	48		3322			140											
DRIRE	IPL	26/04/1966	50		2982			128		1536									
DRIRE	IPL	23/08/1966	42		3168			125		1890									
DRIRE	IPL	18/05/1967			2974			119	135	1680									
DRIRE	IPL	12/09/1967	48		2809			116	135										
DRIRE	IPL	21/05/1968	47		2802			134	124										
DRIRE	IPL	24/09/1968	47		2815			134	121										
DRIRE	IPL	02/05/1969	50		2982			116	128										
DRIRE	IPL	06/05/1970	47,3		2788			134	142										
DRIRE	IPL	03/09/1970	47		2795			125	142										
DRIRE	IPL	03/09/1970	49,1		2795			116	146										
DRIRE	IPL	29/04/1971	50,5		2850			113	142										
DRIRE	IPL	27/07/1971	48		3044			128	142										
DRIRE	IPL	13/04/1972	50		2907			104	124										
DRIRE	IPL	24/08/1972	46,4		2929			134	99										
DRIRE	IPL	30/11/1972	51		2944			110	125										
DRIRE	IPL	03/05/1973	50		3230			101	166										
DRIRE	IPL	04/07/1973	47,5		3101			119	131										
DRIRE	IPL	05/12/1973	50		2802			113	121										
DRIRE	IPL	17/06/1974	49		3060			113	110										
DRIRE	IPL	20/09/1974	46		2836			128	134										
DRIRE	IPL	05/12/1974	50		3028			101	121										
DRIRE	IPL	22/05/1975	46,5		2907			122	95										
DRIRE	IPL	09/09/1975	48		2982			116	103										
DRIRE	IPL	09/12/1975	51		2795			104	85										
DRIRE	IPL	24/05/1976	46		2544			134	114										
DRIRE	IPL	02/09/1976	48		2795			116	135										
DRIRE	IPL	21/12/1976	47		3060			122	103										
DRIRE	IPL	09/04/1977	53		3303			85	110										
DRIRE	IPL	02/08/1977	51		3028			76	118										
DRIRE	IPL	05/04/1978	46		2924			119	95										
DRIRE	IPL	11/07/1978	47		3044			116	105										
DRIRE	IPL	12/12/1978	52		3044			95	115										
thèse d'Y. Simeon (1980)	LCAG	1978-1979							114				510		18	198	0,9	12	
DRIRE	IPL	18/04/1979	50		2963			98	115										
DRIRE	IPL	10/07/1979	48		3003			98	120										
DRIRE	IPL	11/12/1979	49		2813			104	11										
DRIRE	IPL	08/04/1980	51		3130			101	107										
DRIRE	IPL	08/07/1980	44		2966			122	97										
DRIRE	IPL	09/12/1980	48		2924			111	107										
DRIRE	IPL	07/04/1981	48		3086			107	120										
DRIRE	IPL	07/07/1981	43		3003			134	100										
DRIRE	IPL	08/12/1981	49,5		3003			101	110										
DRIRE	IPL	05/04/1982	47		2849			116	95										
DRIRE	IPL	05/07/1982	42,2		2849			134	90										
DRIRE	IPL	24/11/1982	47,7		2924			122	115										
rap. BRGM n°84AGI385RHA	IPL	14/03/1983	43,5	7,2	2886	2865	38	134	85	1675	<1		520	50	20	198			0,6
DRIRE	IPL	05/09/1983	44,4		3053			128	100										
DRIRE	IPL	16/04/1984	44,5		2778			128	85										
DRIRE	IPL	12/06/1984	37,7		2792			152	90										
DRIRE	IPL	10/10/1984	44,2		3053			122	100										
rap. BRGM n° 85 SGN 089 RHA	?	03/12/84	46,4	7,0	2674		46	140	110	1618	0,0		500	51	14	214	0,8	11	
rap. BRGM n° 85 SGN 089 RHA	?	04/12/1984	45,3	7,0			44	140	103	1585	0,0		502	53	15	196	0,7	11	
rap. SOGREAH n° 100638R2		09/12/1984					44	140	103	1585			502	53	15	196	0,7	11	
DRIRE	IPL	11/03/1985	44,4		3003			125	97										
DRIRE	IPL	10/06/1985	41,6		2778			137	83										
DRIRE	IPL	07/10/1985	45,5		3086			125	96										
rap. SOGREAH n° 100638R2		15/10/1985						132	105	1640	0,4		511	47	15	211			
DRIRE																			

R V

référence	laboratoire	date	t°C en °C	pH	χ à 25°C en μS/cm	RS à 110°C	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	K	Na	Li	Sr	NH4
rap. BRGM n°84AGI385RHA	IPL	12/01/84		7,2	2665	2542	35	116	100	1450	<1	2,1	420	45	15	239			1,0
DRIRE	IPL	16/04/84	47		2710			131	105										
DRIRE	IPL	12/06/84	46,8		2834			137	111										
DRIRE	IPL	10/10/84	47		2886			131	100										
rap. BRGM n° 85 SGN 089 RHA		05/12/84	47,5				46	140	110	1535	0,0		475	52	15	211	0,7	11	
rap. BRGM n° 85 SGN 089 RHA		07/12/84	46,9				44	140	100	1517	12,9		470	51	15	193	0,7		
DRIRE	IPL	11/03/85	47,2		2924			131	92										
DRIRE	IPL	10/06/85	47,6		2778			128	100										
DRIRE	IPL	07/10/85	47,2		2924			140	92										
rap. SOGREAH n°100638 R2		15/10/85		7,2				142	102	1522	0,6		472	47	14	209			
rap. SOGREAH n°100638 R2		07/12/85					44	140	100	1517	12,9		470	51	15	193	0,8	10	
DRIRE	IPL	10/03/86	49,8		2849			125	102										
référence de L'AM du 14.09.1987	LNS	21/04/86	46,3	7,2	2908		39	147	98	1608	0,6	2,1	504	47	14	202	0,8	9	
DRIRE	IPL	09/06/86	48,4		2924			119	120										
DRIRE	IPL	02/10/86	47,4		2849			128	97										
DRIRE	IPL	08/04/87	50,8		3130			119	146										
DRIRE	IPL	11/06/87	50,5		3268			106	101										
DRIRE	IPL	07/10/87	45		3086			122	100										
DRIRE	IPL	05/05/88	52		3130			116	106										
DRIRE	IPL	07/07/88	31		3095			129	113										
DRIRE	IPL	12/10/89	42		2743			117	102										
DRIRE	IPL	09/11/89	47		2690			129	110										
rap. SOGREAH n°100638 R2		17/01/90					38	117	96	1545	<1		550	46	14	211			0,9
rap. SOGREAH n°100638 R2		18/01/90					36	134	84	1490	1,1		530	47	13	184			0,8
rap. SOGREAH n°100638 R2		30/01/90					29	162	74	1420	1,8		510	50	13	150			0,6
rap. SOGREAH n°100638 R2		12/02/90					30	167	74	1440	1,5		515	49	26	165			0,5
DRIRE	IPL	26/07/90	48		2730			120	102										
DRIRE	IPL	11/10/90	30	7,2	2710	2871	39	119	107	1602	<1		510	45	18	225			1,1
rap. SOGREAH n°100638 R2		17/01/91					41	106	118	1785	<1		550	47	17	225			0,9
DRIRE	IPL	13/01/93	47																
DRIRE	IPL	02/06/93	47		3130	2834	37	125	116	1606	1,0	2,2	530	46	14	200			0,8
DRIRE	IPL	27/07/93	46		2813			131	92										
DRIRE	IPL	16/02/94	50																
DRIRE	IPL	27/04/94	48		2886			129	91										
DRIRE	IPL	07/09/94	44																
DRIRE	IPL	20/09/94	46																
DRIRE	IPL	05/10/94	44																
DRIRE	IPL	20/10/94	47		2963			121	102										
DRIRE	IPL	21/06/95	46	7,5	2765	2644	36	139	77	1562	<1	2,0	512	48	14	160	0,7		0,6
DRIRE	IPL	18/07/95	44		2743			140	83										
DRIRE	IPL	18/07/95	44																
DRIRE	IPL	11/07/96	48		2799			142	80										

R VI

référence	laboratoire	date	t°C en °C	pH	χ à 25°C en μS/cm	RS à 110°C	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	K	Na	Li	Sr	NH4
rap. BRGM n°87 SGN 376 RHA	IPL	02/12/86						122	100	1650	<1		520	52	19,2	202,5			
rap. BRGM n°87 SGN 376 RHA	IPL	02/12/86						122	100	1750	<1		520	51,5	18,4	218,5			
rap. BRGM n°87 SGN 376 RHA	IPL	02/12/86						140	90	1650	<1		510	52	16,8	186,3			
rap. BRGM n° 87 SGN 376 RHA	IPL	00/00/87	45,2	7,4			40	128	92	1650	<1		510	50	11	202			
rap. BRGM n° 87 SGN 376 RHA	IPL	23/03/87					38	140	80	1550	<1		480	47,5	10	175			0,7
DRIRE	IPL	07/10/87	45		3175			119	99,2										
DRIRE	IPL	11/04/88	46		3003			127	92										
DRIRE	IPL	05/05/88	44		2886			140	76,6										
DRIRE	IPL	07/07/88	42		2939			140	80										
DRIRE	IPL	13/10/88	44		2879			126	93										
DRIRE	IPL	02/05/89	40		2737			136	80										
DRIRE	IPL	19/07/89	42		2677			142	75										
DRIRE	IPL	12/10/89	45		2827			113	98										
DRIRE	IPL	26/07/90	40		2480			148	69										
DRIRE	IPL	11/10/90	40	7,2	2225	2692	31,9	148	71	1467	<1		490	53	14	160			0,5
DRIRE	IPL	09/04/91	41		2590			135	78										
DRIRE	IPL	30/07/91	42																
DRIRE	IPL	30/07/91	42		2349			145	74										
DRIRE	IPL	08/10/91	42		2389			139	86										
DRIRE	IPL	06/05/92	43	7,4	2497	2780	35	142	80	1625	<1	1,8	521	55,5	12,6	168			0,5
DRIRE	IPL	15/07/92	43		3028			141	77										

R VII

référence	laboratoire	date	t°C en °C	pH	X à 25°C en µS/cm	RS à 110°C	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	K	Na	Li	Sr	NH4
rap. BRGM 87 SGN 376 RHA		1987		7,7	2940		51	98	125	1800	<1		535	38	15	263			
DRIRE	IPL	07/10/87	54,0		3317				107										
DRIRE	IPL	11/04/88	53,0		3086				109										
DRIRE	IPL	05/05/88	54,0		3175				116										
DRIRE	IPL	07/07/88	51,0		3239				116										
DRIRE	IPL	13/10/88	53,0		3078				113										
DRIRE	IPL	02/05/89	53,0		2995				104										
DRIRE	IPL	19/07/89	53,0		3044				101										
DRIRE	IPL	12/10/89	56,0		3011				93										
autorisation d'exploiter RVII (1993)	IPL	03/05/90	54,0		3095				98										
DRIRE	IPL	26/07/90	55,0		2987				88										
DRIRE	IPL	11/10/90	56,0		2924	3107	50,3	89	126	1700	<1		550	40,5	20	250			1,2
DRIRE	IPL	09/04/91	56,0		2886				94										
DRIRE	IPL	30/07/91	56,0		2757				99										
DRIRE	IPL	08/10/91	55,0		2723				89										
DRIRE	IPL	06/05/92	57,0	7,4	2778	3110	50	94	122	1750	<1		560	41,5	18,2	250			1,2
DRIRE	IPL	06/05/92	57,0	7,4	2778	3110		94	122	1750	<1	2,5	560	41,5	18,2	250			1,2
DRIRE	IPL	15/07/92	55,0		3451				95										
DRIRE	IPL	13/10/92	56,0	7,4	3175	3092	49	96	120	2060	<1	2,4	580	42	16	262			1,1
DRIRE	IPL	20/04/93	54,0		3239				104										
DRIRE	IPL	02/06/93	54,0	7,2	3472	3138	45	100	142	1767	<1	2,4	580	42	16	235			0,9
DRIRE	IPL	27/07/93	55,0		3221				96										
DRIRE	IPL	19/10/93	56,0		3317				95										
DRIRE	IPL	16/02/94	56,0																
DRIRE	IPL	27/04/94	55,0		3211				99										
DRIRE	IPL	27/04/94	55,0		3275				98										
rap. SOGREAH n°100638R2	LNEHT	28/06/94	54,7		3130				101				565	41	15,4	238			
DRIRE	IPL	20/10/94	54,0																
DRIRE	IPL	20/03/95	54,0																
DRIRE	IPL	19/04/95	53,0		3175				106										
DRIRE	IPL	21/06/95	52,0		3115	3060	41,3	109	107	1770	<1	2,1	610	44	18,4	212	0,8		0,9
DRIRE	IPL	18/07/95	52,0		3086				109										
DRIRE	IPL	15/09/95																	
DRIRE	IPL	17/10/95	53,0		3061				107										
DRIRE	IPL	11/04/96	54,0		3053				107										
DRIRE	IPL	11/07/96	50,0		3193				104										
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	24/03/97					41,2	116	97	1760	<1		580	44	15,2	208	0,8		0,9
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	28/10/97																	
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	03/11/97	47,0				41	122	107	1814	<1		628	48	16,1	197,6	0,7		0,9
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	06/11/97	48,0				42	121	95	1768	<1		616	50	16	227	0,7		0,9
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	13/11/97	51,0				42	113	102	1822	<2		610	48	15	221	0,7		0,9
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	27/11/97					39	114	113	1829			625	49	15	208	0,7		
DDASS	LSEHL	23/12/98	29,0																
DDASS	LSEHL	07/01/99	46,0	7,1	3272		42,5	143	132	1784			576	50,3	14,8	254			
DDASS	LSEHL	19/01/99	44,9	7,2	3283		49,7	141	129	1840			582	51,4	14,6	204			
DDASS	LSEHL	03/02/99	47,8	7,2	3246		51,3	135	125	1815			574	49,7	14,6	209			
DDASS	LSEHL	17/02/99	49,8	7,2	3237		50,2	129	124	1787			577	49,3	15,1	210,9			
DDASS	LSEHL	22/02/99	48,0	7,2	3251		45,7	132	118	1825			594	49,8	15	206,8			
DDASS	LSEHL	01/03/99	45,9	7,2	3095		43,8	147	99	1811			595	52,5	12,3	174			
DDASS	LSEHL	07/04/99	36,2																
DDASS	LSEHL	20/04/99	15,2	7,2	3071		37	145	91	1785			569	49,1	11,3	166			13,3
DDASS	LSEHL	06/05/99	44,7	7,3	3052		40,8	146	87	1765			553	50,4	11,7	163			10,3
DDASS	LSEHL	02/06/99	34,3	7,3	3065		35,6	143	89	1802			595	54,3	13,2	175			9,2
DDASS	LSEHL	16/06/99	43,2	7,3	3060		37,8	146	84	1752			542	48,2	11,2	154			9,6
DDASS	LSEHL	30/06/99	42,8	7,3	3051		42,1	147	84	1798			540	49,1	11,5	162,5			9,1
DDASS	LSEHL	13/07/99	42,8	7,2	3014		35,3	145	85	1802			573	50	11,5	159			8,9
DDASS	LSEHL	23/07/99	42,8																
DDASS	LSEHL	29/07/99	42,6																
DDASS	LSEHL	05/08/99	42,7																
DDASS	LSEHL	12/08/99	42,5		3096		38,8	143	82	1762			575	50,7		167,7			
DDASS	LSEHL	17/08/99	42,6																
DDASS	LSEHL	25/08/99	42,7																
DDASS	LSEHL	02/09/99	42,6																
DDASS	LSEHL	07/09/99	42,6																
DDASS	LSEHL	15/09/99	42,8																
DDASS	LSEHL	22/09/99	42,0		3063		41,9	139	86	1796			589	49,8		168			
DDASS	LSEHL	29/09/99	43,2																
DDASS	LSEHL	05/10/99	43,0																
DDASS	LSEHL	14/10/99	42,5																
DDASS	LSEHL	20/10/99	42,9		3061		37,2	138	86	1756			577	49,8		171			
DDASS	LSEHL	27/10/99	42,7																
DDASS	LSEHL	03/11/99	42,8																
DDASS	LSEHL	09/11/99	42,9		3010		35,1	138	86	1796			582	50,3		178			
DDASS	LSEHL	07/12/99	42,8		3110		40,1	135	89	1830			579	49,5		176			
DDASS	LSEHL	23/12/99	29,0																
DDASS	LSEHL	03/02/00	41,2		3054		40,2	133	88	1844			560	49,2		171			
DDASS	LSEHL	02/03/00	41,2		3075		30,2	139	80	1780			560	48,5		154			
DDASS	LSEHL	24/03/00																	
DDASS	LSEHL	29/03/00	42,0	7,3	3019		42,4	140	80	1778			561	51,3		185			
DDASS	LSEHL	26/04/00	42,20	7,0	3018		39,7	138	82	1769			580	50,6	21,9	184			
DDASS	LSEHL	23/05/00	42,4	7,1	3048		38	136	84	1796			574	49,1	16,5	173			

R VII (suite)

référence	laboratoire	date	t°C en °C	pH	χ à 25°C en μS/cm	RS à 110°C	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	K	Na	Li	Sr	NH4
DDASS	LSEHL	14/11/01	45.1	7.0	3095		43	128	85	1880			550	46.9	14.7	192			
DDASS	LSEHL	11/12/01	45.5	7.0	3046		47	123	88	1759			574	48.7	16.8	190			
DDASS	LSEHL	15/01/02	45.1	7.0	3033		39.6	126	87	1806			548	48	13.7	178			
DDASS	LSEHL	07/02/02	45.6	6.9	2973		43.2	121	86	1745			566	46.8	14.4	200			
DDASS	LSEHL	06/03/02	45.7	6.9	3006		40.7	129	84	1780			617	47	12.6	175			
DDASS	LSEHL	04/04/02	44.9	7.0	2692		42.8	129	84	1799			577	46.5	13.8	187			
DDASS	LSEHL	15/05/02	46.2	7.1	3058		44.9		89	1826			553	47.4	16	193			
DDASS	LSEHL	20/06/02	46.4	7.0	3063		44.9		93	1807			556	45.3	14.3	206			
DDASS	LSEHL	25/07/02	47.2	7.1	2926		35.8	124	90	1779			548	46.8	14.6	183.2			
DDASS	LSEHL	06/08/02	46.5	6.9	2980		41.7	121	91	1825			548	45	12.8	192			
DDASS	LSEHL	05/09/02	47.9		3103		44.5	118	95	1821			569	47.1	15	205			
DDASS	LSEHL	08/10/02	47.5	6.9	3071		45.5		95	1855			561	46	14.4	196.2			
DDASS	LSEHL	28/11/02	46.7		2969		41.9	157	88	1830			569	47.6	13	182			
DDASS	LSEHL	11/12/02	47.7		2958		47.5	110	92	1792			571	46.4	14.7	192			
DDASS	LSEHL	08/01/03	44.6		3028		41	133	81	1786			588	50.6	12.9	172			
DDASS	LSEHL	06/02/03	46.8		3043		34.6	122	87	1796			587	49.9	15.3	188.2			
DDASS	LSEHL	05/03/03	46.6	6.9	2918		28.8	122	91	1846			572	47.8	13.5	186			
DDASS	LSEHL	08/04/03			2028		40.8	133	81	1754			553	47.6	11.8	168			
DDASS	LSEHL	12/05/03	44.5	6.9	2995		34.5	131	84	1814			582	48.8	12.2	169			
DDASS	LSEHL	11/06/03	45.1	7.0	3035		39.2	131	82	1782			594	50.2	13	177			
DDASS	LSEHL	10/07/03	45.0	6.9	3028		40.8		84	1793			557	47.1	13.3	172			
DDASS	LSEHL	26/08/03	45.6	7.0	2965		41.8	126	85	1771			584	48.6	13.2	180			
DDASS	LSEHL	23/09/03	46.0	7.0	3084		37.8	126	88	1783			562	47.1	12.6	181			
DDASS	LSEHL	23/10/03	45.6	7.0	3085		39.2	122	87	1757			596	49.7	13.6	190			
DDASS	LSEHL	12/11/03	45.2	7.0	3099		53	122	86	1774			574	48.7	13.6	181			
DDASS	LSEHL	17/12/03	45.8	7.0	3123		42	123	95	1794			601	50.7	13.4	192			
DDASS	LSEHL	12/01/04	45.8	6.9	3079		43.7	123	89	1763			552	45.7	13	179			
DDASS	LSEHL	10/02/04	44.8	7.1	2670		56.1		85	1800			634	50.6	14.3	199			
DDASS	LSEHL	10/02/04	44.8	7.1	3090		56.1	127	85	1800			634	50.6	14.3	199			
DDASS	LSEHL	16/03/04	46.0		3123		37.4	122	90	1824			578	46	13.4	187			
DDASS	LSEHL	08/04/04	46.6	7.0	3120		41.7	121	89	1778			554	42	13.3	193			
DDASS	LSEHL	06/05/04	46.2	7.1	2750		41.9	123	89	1803			572	45.7	13.3	183			
DDASS	LSEHL	09/06/04	47.4	7.1	3080		38.6	120	89	1806			563	47.4	13.9	177			
DDASS	LSEHL	06/07/04	47.0	7.1	2760		30.2	120	87	1733			597	47.8	14.4	206			
DDASS	LSEHL	25/08/04	47.0	7.1	3100		37.4	122	92	1819			592	47.4	14.1	195			
DDASS	LSEHL	21/09/04	46.5	7.1	3100		40.7	118	92	1877			563	50.2	13.6	191			
DRIRE	LSEHL	05/10/04	47.3	7.0	3111		37.4	119	92	1828			588	49.8	13.9	198.4			
DRIRE	LSEHL	30/11/04	47.5	6.9	3243		43.9	118	91	1809			639	50	15	205			
DRIRE	LSEHL	29/12/04	47.3	7.0	3231		46.6	117	91	1791			580	46.9	13.8	195			

R VIII

référence	laboratoire	date	t°C en °C	pH	χ à 25°C en μS/cm	RS à 110°C	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	K	Na	Li	Sr	NH4
rap. SOGREAH n°100638R2		1994					22	138	2	1456		0,3	557	73	4	22	0,1	13,1	

R IX

référence	laboratoire	date	t°C en °C	pH	χ à 25°C en μS/cm	RS à 110°C	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	K	Na	Li	Sr	NH4
rap. SOGREAH n°100638R2		1995	22				10	240	1	1272		0,3	514	60	1	2	0,1	11	

R X

référence	laboratoire	date	t°C en °C	pH	χ à 25°C en μS/cm	RS à 110°C	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	K	Na	Li	Sr	NH4
DRIRE	IPL	11/07/1996	35																
rap. ANTEA n° A08759	?	27/01/97 17h00		6,9	3170														
rap. ANTEA n° A08760	?	28/01/1997	54,3	7,0	3100														
rap. ANTEA n° A08761	?	28/01/1997	52	6,4	3100														
rap. ANTEA n° A08762	?	28/01/1997	54,7	6,6	3100														
rap. ANTEA n° A08763	?	28/01/1997	54	7,1	3100														
rap. ANTEA n° A08766	?	29/01/1997	53	6,9	3100														
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	12/03/1997	54				44	107	105	1740	<1		580	44	17	225	0,8		1,0
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	24/03/1997	52				43	111	102	1780	<1		580	42	17	214	0,8		0,9
rap. ANTEA n° A12556/A	?	03/11/1997	51				46	104	118	1839			601	44	18	228	0,7		
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	03/11/1997	51				46	104	118	1839	<2		601	44	18	227,6	0,7		1,0
rap. ANTEA n° A12556/A	?	06/11/1997	53				46	402	107	1851			613	47	18	259	0,7		
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	06/11/1997	52				46	102	107	1851	<1		613	47	18	259	0,7		1,0
rap. ANTEA n° A12556/A	?	13/11/1997	53				43	407	117	1810			610	48	15	233	0,7		
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	13/11/1997	53				43	107	117	1810	<2		610	48	15	233	0,7		0,9
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	18/11/1997	52																226
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	18/11/1997	52																234
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	19/11/1997	53																234
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	19/11/1997	52																235
rap. ANTEA n° A12556/A	?	20/11/1997	53				38	108	103	1850			571	48	14	230			-
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	20/11/1997	53				38	108	103	1850	<2		571	48	14	218	0,8		0,9
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	20/11/1997	53																233
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	21/11/1997	53																256
rap. ANTEA n° A12556/A	?	27/11/1997					45	108	117	1848			636	48	16	208			
rap. ANTEA n° A11930/A	LSEHL	27/11/1997					45	108	117	1848			636	48	16	208	0,8		

Natacha

référence	laboratoire	date	t°C en °C	pH	χ à 25°C en µS/cm	RS à 110°C	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	K	Na	Li	Sr	NH4
rap. SOGREAH n° 100 638	?	23/09/98	63				47	77	136	1670			437	33	19	282			
rap. SOGREAH nov. 2000	?	24/09/98	59,6		2880														
rap. SOGREAH nov. 2000	?	30/09/98	53,6		3180														
DDASS	LSEHL	13/10/98	63				50	98	158	1600			451	40	19	265			
DDASS	LSEHL	15/10/98	61				58	94	150	1567			439	39	32	292			
DDASS	LSEHL	20/10/98	63	7,3	3320		52	98	165	1620			464	39	19	275			
DDASS	LSEHL	24/10/98			2941	2547	50	103	177	1500			441	41	19	263			
DDASS	LSEHL	04/11/98			2908		57	116	208	1576			457	44	22	276			
rap. SOGREAH nov. 2000	?	06/11/98	62,9																
DDASS	LSEHL	13/11/98			2948	2084	55	120	227	1667			482	41	25	283			
rap. SOGREAH nov. 2000	?	18/11/98	63																
DDASS	LSEHL	20/11/98	62	7,1	3274	2819	64	126	203	1612			466	44	20	262			
rap. SOGREAH nov. 2000	?	03/12/98																	
DDASS	LSEHL	17/12/98	62	7,1	3254	2767	64	120	197	1595			461	42	21	282			
rap. SOGREAH nov. 2000	?	23/12/98	61				68		188	1586		2,8	465	45	19	283			
rap. SOGREAH nov. 2000	?	29/12/98	62				60		186	1584		3,3	453	41	19	281			
DDASS	LSEHL	07/01/99	61	7,1	3198	2821	58	112	178	1578		3,3	454	41	19	288			
DDASS	LSEHL	14/01/99	61	7,2	3164	2743	61	111	175	1586		3,1	454	42	19	285			
DDASS	LSEHL	19/01/99	61,2	7,2	3204	2752	66	109	174	1611		3,1	460	42	20	277			
DDASS	LSEHL	28/01/99	62,2	7,3	3169	2730	57	106	170	1611		3,0	455	40	19	276			
DDASS	LSEHL	03/02/99	61,6	7,2	3155	2769	58	103	164	1562			451	41	19	276			
DDASS	LSEHL	11/02/99	61,4	7,2	3137	2766	56	103	165	1615		3,2	452	41	20	283			
DDASS	LSEHL	22/02/99	61,4	7,2	3154	2798	58	99	156	1594		3,1	455	41	19	280			
DDASS	LSEHL	01/03/99	61,6	7,3	3108	2775	62	100	156	1631		3,0	463	41	19	271			
DDASS	LSEHL	11/03/99	61,4	7,2	3086	2747	53	100	150	1598		2,8	452	41	19	271			
DDASS	LSEHL	24/03/99	59,7	7,3	3118	2741	54	100	148	1614		3,1	441	40	19	267			
DDASS	LSEHL	07/04/99	60,4	7,4	3128	2897	45	95	150	1597		2,5	447	39	19	267			
DDASS	LSEHL	20/04/99	60,6	7,3	3094	2802	42	96	146	1607		3,3	439	40	19	271			
DDASS	LSEHL	06/05/99	60,4	7,4	3089	2752	60	95	139	1571			443	39	18	260			
DDASS	LSEHL	20/05/99	60,6	7,3	3106	2784	51	95	140	1599		3,1	468	42	18	269			
DDASS	LSEHL	02/06/99	61,3	7,4	3083	2762	53	92	142	1627		3,2	473	43	21	286	0,7	11	
DDASS	LSEHL	10/06/99	60,8	7,4	3092	2780	57	94	137	1586			458	42	18	258			
référence de l'AM du 22 sept,2000	?	14/06/99	60,4			2723	53	101	145	1622	<1		457	41	19	274	0,9	8	2,3
DDASS	LSEHL	16/06/99	60,3	7,4	3088	2799	62	93	139	1599		2,9	480	41	18	250			
rap. SOGREAH nov. 2000	?	30/06/99	60,3		3081		54		138	1612		2,7	440	39	17	266			
DDASS	LSEHL	13/07/99	60,3	7,4	3042	2764	51	92	139	1627		3,0	460	40	18	258			
DDASS	LSEHL	23/07/99	60,8																
DDASS	LSEHL	29/07/99	60,2																
DDASS	LSEHL	05/08/99	61																
DDASS	LSEHL	12/08/99	61,3		3110	2781	57	90	134	1578			448	39		264			
DDASS	LSEHL	17/08/99	61,2																
DDASS	LSEHL	25/08/99	60,6																
DDASS	LSEHL	02/09/99	59,6																
DDASS	LSEHL	07/09/99	61,5																
DDASS	LSEHL	15/09/99	60,8																
DDASS	LSEHL	22/09/99	61		3058	2778	50	89	135	1613			462	38		252			
DDASS	LSEHL	29/09/99	60,8																
DDASS	LSEHL	05/10/99	61,2																
DDASS	LSEHL	14/10/99	61,2																
DDASS	LSEHL	20/10/99	61		3050	2756	48	87	134	1583			515	39		262			
DDASS	LSEHL	27/10/99	60,8																
DDASS	LSEHL	03/11/99	61,3																
DDASS	LSEHL	09/11/99	61,7		3007	2745	50	87	132	1600			454	40		273			
rap. SOGREAH nov. 2000	?	07/12/99	61,1		3080		53		136	1643			445	39		260			
DDASS	LSEHL	03/02/00	60,7		3044	2738	55	87	131	1647			462	39		258			
DDASS	LSEHL	02/03/00	60,7		3082	2742	49	89	128	1644			446	38		242			
DDASS	LSEHL	29/03/00	61,3		3025	2748	58	87	128	1627			444	21	22	272			
rap. SOGREAH nov. 2000	?	10/04/00	60,5										437	40	25	286			
DDASS	LSEHL	26/04/00	61	7,1	3018	2764	52	89	125	1606			464	41	19	243			
DDASS	LSEHL	23/05/00	60,6	7,1	3019	2794	53	87	131	1672			453	39	18	255			
DDASS	LSEHL	28/06/00	60,8	7,2	2938	2754	54	87	125	1618			458	39	20	270			
DDASS	LSEHL	20/07/00	61		2999	2761	55	87	123	1605			457	36	22	252			
DDASS	LSEHL	21/08/00	61	7,2	2989	2777	52	87	127	1651			459	39	18	261			
DDASS	LSEHL	26/09/00	61,1	7,2	3049	2772	50	87	123	1625			483	39	17	250			
DDASS	LSEHL	23/10/00	61,2	7,1	3018	2752	55	85	125	1645			452	38	21	270			
DDASS	LSEHL	23/11/00	60,8	7,3	3057	2742	53	86	122	1637			439	39	18	265			
DDASS	LSEHL	20/12/00	61		2949	2749	50	87	122	1617			443	39	15	264			
DDASS	LSEHL	31/01/01	60,8	6,8	3048	2720	53	86	122	1656			476	40	18	247			
DDASS	LSEHL	20/02/01	61,2	7	3002	2755	55	86	124	1624			459	39	20	277			
DDASS	LSEHL	28/03/01	61	7,1	2989	2751	47	87	122	1631			426	37	19	244			
DDASS	LSEHL	24/04/01	61,1	6,9	3022	2751	51	88	118	1567			460	39	18	245			
DDASS	LSEHL	17/05/01	61,4	7,1	3008	2767	51	89	127	1579			461	39	19	251			
DDASS	LSEHL	20/06/01	61,1	7	3034	2764	49	88	118	1592			454	38	15	243			
DDASS	LSEHL	12/07/01	62,7	7,2	2788	2760	60	89	120	1629			456	40	20	269			
DDASS	LSEHL	09/08/01	60,7	7,1	2941	2812	53	90	118	1609			471	41	24	272			
DDASS	LSEHL	05/09/01	61,3	0	3015	2764	53	88	119	1636			464	42	18	258			
DDASS	LSEHL	16/10/01	60,6	6,9	3026	2783	56	88	121	1649			458	40	19	269			
DDASS	LSEHL	14/11/01	61,4	7	3018	2727	54	88	116	1704			457	39	22	265			
DDASS	LSEHL	11/12/01	61,2	6,9	2960	2732	58	87	116	1599			463	40	22	249			
DDASS	LSEHL	15/01/02	61	7	2955	2733	50	85	120	1672			459	41	20	245			
DDASS	LSEHL	07/02/02	61	6,9	2895	2726	53	87	117	1636			455	39	22	293			
DDASS	LSEHL	06/03/02	61,4	7,1	2946	2754	52	86	117	1615			451	38	17	240			
DDASS	LSEHL	04/04/02	61,2	7	2943	2667	54	88	119	1639			448	37	19	256			
DDASS	LSEHL	15/05/02	61,4	7	2969	2748	55		118	1603			448	38	22	257			
DDASS	LSEHL	20/06/02	60,9	7	2780	2759	54		122	1618			451	39	18	263			
DDASS	LSEHL	20/07/02	61,4	7,1	2860	2765	46	85	121	1632			440	37	17	240			
rap. SOGREAH n° n°0730118R2	LSEHL	25/07/02	61,4	7,0	2860	2765	46		121	1632			440	37	17	240			
DDASS	LSEHL	06/08/02	60,																

Nat (suite)

référence	laboratoire	date	t°C en °C	pH	χ à 25°C en μS/cm	RS à 110°C	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	K	Na	Li	Sr	NH4
rap. SOGREAH n° 0730118R5	LSEHL	14/03/03	60,6		2825		48	88	126	1730			465	39	18	269			
	DDASS	08/04/03			2989	2720	52	84	118	1587			439	37	17	241			
	DDASS	12/05/03	61	6,9	2024	2777	51	73	120	1614			473	38	17	246			
	DDASS	11/08/03	61	7,1	2980	2748	50	84	117	1593			474	40	17	257			
	DDASS	10/07/03	60,9	6,9	2963	2819	47		120	1599			445	37	18	236			
	DDASS	26/08/03	61,3	7,1	2894	2741	32	84	118	1577			471	39	18	247			
	DDASS	23/09/03	61,1	7	3010	2714	48	87	119	1576			452	38	17	244			
	DDASS	23/10/03	61,2	7	3011	2763	50	85	118	1579			476	40	18	253			
	DDASS	12/11/03	60,8	6,9	3004	2734	56	87	117	1576			458	39	18	239			
	DDASS	17/12/03	60,8	7,1	2985	2772	54	84	104	1379			484	41	17	255			
	DDASS	12/01/04	61	6,9	2847	2756	55	87	117	1548			453	37	17	237			
	DDASS	10/02/04	61,1	7	3079	2708	70	87	116	1598			505	40	19	268			
	DDASS	16/03/04	61		3038	2743	47	85	118	1606			458	38	17	244			
	DDASS	08/04/04	61,3	7	3039	2793	54	85	118	1592			438	34	18	263			
	DDASS	06/05/04	60,8	7,1	3003	2740	51	85	116	1553			454	37	17	242			
	DDASS	09/06/04	61,2	7,1	3050	2737	48	85	115	1557			451	37	17	245			
	DDASS	06/07/04	60,8	7,1	3063	2747	51	85	100	1329			464	37	18	262			
	DDASS	25/08/04	61,2	7	2930	2775	50	93	117	1579			487	40	18	257			
	DDASS	21/09/04	60,6	7	3098	2756	50	84	118	1635			449	41	17	243			
	DDASS	09/10/04	61,3	7	2984	2751	48	84	122	1638			457	39	18	246			
	DDASS	30/11/04	61,2	6,78	2860	2732	56	84	117	1587			501	42	19	255			
	DDASS	29/12/04	61,2	7,05	2890	2741	55	89	129	1728			463	38	17	248			
analyse AFSSA	?	20/04/04	59,7	7,1	3030	2695	65	92	122	1560	<1	3,0	471	38	18	256	0,9	11	1,2
analyse AFSSA	?	25/10/04	60,2	7,2	2790	2738	57	90	122	1570	<1	3,1	478	38	17	254	1,1	11	1,2

Olod

référence	laboratoire	date	t°C en °C	pH	χ à 25°C en μS/cm	RS à 110°C	SiO2	HCO3	Cl	SO4	NO3	F	Ca	Mg	K	Na	Li	Sr	NH4
courrier de A. Lepape	IHC	28/01/54	32,5																
	DRIRE	27/09/54	33																
	DRIRE	18/04/55	35																
	DRIRE	17/07/55	34																
	DRIRE	31/08/55	34																
	DRIRE	03/10/55	34,6																
	DRIRE	27/10/55	35,2																
	DRIRE	16/04/56	35,6																
	DRIRE	17/09/56	33,4																
	DRIRE	01/04/57	34																
	DRIRE	23/09/57	30,4																
	DRIRE	29/04/58	33,5																
	DRIRE	07/10/58	33,5																
	DRIRE	06/01/59	35,2																
	DRIRE	07/04/59	36																
	DRIRE	30/06/59	31																
	DRIRE	13/04/60	34,6																
	DRIRE	29/06/60	31,4																
	DRIRE	19/06/61	34																
	DRIRE	12/09/67	37		2280			186	76	1170									
	DRIRE	03/09/70	35,4		2194			189	79										
	DRIRE	27/07/71	34		2236			220	78										
	DRIRE	13/04/72	42		2643			183	87										
	DRIRE	24/08/72	37,5		2550			180	73										
	DRIRE	03/05/73	43					159	80										
	DRIRE	04/07/73	40		2673			150	82										
	DRIRE	17/06/74	44		2584			137	85										
	DRIRE	20/09/74	39		2474			162	75										
	DRIRE	22/05/75	45		2584			152	91										
	DRIRE	09/09/75	44,5		2485			165	84										
	DRIRE	24/05/76	44		2326			153	92										
	DRIRE	02/09/76	48		2383			146	94										
	DRIRE	19/04/77	48,5		2795			131	105										
	DRIRE	02/08/77	45		2485			155	70										
	DRIRE	11/07/78	45		2554			152	86										
	DRIRE	18/04/79	51		2778			116	106										
	DRIRE	10/07/79	43		2646			156	87										
	DRIRE	08/04/80	50		2924			113	105										
	DRIRE	08/07/80	40		2305			140	81										
	DRIRE	07/04/81	47,5		2813			128	96										
	DRIRE	07/07/81	42		2584			165	88										
	DRIRE	05/04/82	48,5		2778			122	110										
	DRIRE	05/07/82	42,3		2554			152	86										
	DRIRE	24/11/82	44,8		2525			159	90										
	DRIRE	14/03/83	46,4		2415			152	90										
	DRIRE	05/09/83	40,4		2554			162	85										
	DRIRE	16/04/84	41		2364			98	86										
	DRIRE	12/06/84	42,3		2480			134	90										
	DRIRE	10/10/84	41		2554			156	84										
rap. BRGM n°85 SGN 089 RHA		10/12/84	44				30,8	171	86	1331	0,0		422	48	13,8	174	0,6	6,8	
	DRIRE	11/03/85	42,8		2584			165	85										
	DRIRE	10/06/85	42,8		2469			168	85										
	DRIRE	07/10/85	41,2		2584			183	80										
	DRIRE	10/03/86	42,1		2415			168	80										
	DRIRE	09/06/86	40		2525			162	84										
	DRIRE	11/06/87	43,2		2743			156	86										

ANNEXE 9

ANALYSES CHIMIQUES DES ROCHES DU SECTEUR ETUDIE

Echantillons de roches du socle

	métagranite de la route de Bonneval	leucogranite de ND Briançon	cataclasite de la route de Naves	gneiss granitique clair de la route de Naves	amphibolite de la route de Naves	métagranite de Glaizette	micaschistes de la galerie EDF	orthogneiss de la Bieltaz	granite de la Lauzière	tuffs volcano-sédimentaires de la Bieltaz	micaschistes de la Bieltaz	amphibolite de la Bieltaz
	ET.04.02	ET.04.05	ET.04.09	ET.04.11	ET.04.12	B72	B75	LA.05.02	LA.05.03	LA.05.04	LA.05.05	LA.05.06
Majeurs en %												
SiO ₂	69,41	74,23	59,95	67,21	54,49	66,39	66,51	74,18	75,28	63,52	63,28	59,31
Al ₂ O ₃	15,73	14,63	15,95	15,39	15,91	16,41	15,82	13,65	13,53	15,91	16,11	17,73
Fe ₂ O ₃	2,77	0,64	6,90	5,08	8,46	4,91	3,90	1,23	1,01	7,00	4,69	6,39
MnO	0,03	0,02	0,12	0,05	0,16	0,09	0,03	0,02	0,03	0,10	0,05	0,12
MgO	0,83	0,21	3,22	1,96	5,44	2,15	2,15	0,51	0,53	2,81	3,27	3,56
CaO	0,67	0,64	2,91	0,71	7,39	0,38	0,80	0,62	0,44	1,09	0,90	3,14
Na ₂ O	6,09	3,53	2,09	1,96	1,13	4,50	1,20	3,86	3,91	2,12	4,31	3,80
K ₂ O	3,41	4,81	3,59	3,79	3,55	2,31	5,05	4,86	4,78	3,60	4,71	2,80
TiO ₂	0,43	0,07	0,91	0,68	0,92	0,62	0,81	0,19	0,19	0,77	0,84	0,79
P ₂ O ₅	0,12	0,22	0,24	0,25	0,23	0,17	0,21	0,06	0,06	0,14	0,37	0,31
PF	0,58	1,12	3,78	2,67	2,40	2,17	2,93	0,77	0,58	3,00	1,59	2,35
Total	100,07	100,11	99,66	99,74	100,08	100,11	99,41	99,96	100,35	100,05	100,12	100,29
Traces en ppm												
As	1	< L.D.	7	11	7	15	2	< L.D.	3	< L.D.	8	2
Ba	813	247	710	930	792	461	8751	396	405	535	1022	601
Cd	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
Co	1	0	19	9	22	11	7	3	2	19	8	17
Cr	8	7	83	70	186	61	128	24	16	84	84	89
Cs	6	5	10	7	6	6	29	5	4	10	15	29
Cu	4	< L.D.	68	25	38	12	46	20	9	55	7	84
Ga	24	20	22	23	21	16	21	21	20	21	24	26
Ge	1	2	2	1	2	1	1	1	1	2	1	1
Hf	11	1	6	5	3	4	5	5	5	4	8	5
Nb	14	12	12	13	8	9	11	17	14	9	15	11
Ni	< L.D.	< L.D.	33	29	38	30	35	10	9	44	25	34
Pb	14	17	20	12	5	26	8	18	22	5	5	49
Rb	84	226	163	151	149	84	204	232	238	149	174	166
Sb	0	< L.D.	2	2	1	0	1	2	1	6	3	17
Sm	12	2	4	7	6	7	7	2	2	6	9	5
Sr	136	82	223	65	387	125	232	146	133	100	203	369
Ta	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Th	18	3	5	10	2	8	12	41	46	7	22	9
U	4	2	1	2	1	2	3	8	8	2	7	3
V	18	2	115	81	178	68	140	14	11	115	68	107
W	1	3	1	2	2	2	8	1	1	2	9	1
Zn	57	19	102	84	102	85	56	17	19	98	48	101
Zr	414	37	228	196	134	141	193	129	125	167	310	168
Terres Rares en ppm												
La	54,5	6,6	20,2	35,4	17,4	34,3	39,8	30,0	26,4	26,3	59,9	24,8
Ce	116,0	13,4	41,5	71,8	39,3	70,8	76,9	51,8	46,8	56,4	121,4	50,8
Pr	13,9	1,5	5,0	8,6	5,4	8,4	9,2	5,1	4,6	6,7	14,2	5,9
Nd	53,6	5,5	20,1	32,6	23,6	32,7	36,0	16,0	14,8	26,3	52,0	22,1
Sm	11,7	1,6	4,2	7,1	6,1	6,6	7,2	2,4	2,2	5,6	8,8	4,6
Eu	1,1	0,3	1,3	1,2	1,3	1,1	1,8	0,4	0,4	1,3	1,5	1,1
Gd	10,4	1,6	4,1	6,3	6,2	5,4	6,0	1,5	1,3	5,1	5,6	3,8
Tb	1,7	0,3	0,7	1,1	1,0	0,8	0,9	0,2	0,2	0,8	0,7	0,6
Dy	10,3	1,9	4,4	6,0	6,2	4,4	5,2	1,1	0,9	4,7	3,6	3,2
Ho	2,0	0,3	0,9	1,1	1,2	0,9	1,0	0,2	0,2	1,0	0,6	0,6
Er	5,7	0,6	2,8	2,8	3,4	2,4	2,7	0,7	0,5	2,7	1,6	1,7
Tm	0,9	0,1	0,4	0,4	0,5	0,3	0,4	0,1	0,1	0,4	0,2	0,2
Y	58,3	10,3	26,4	31,5	34,5	23,5	29,1	7,2	5,3	27,6	18,6	17,7
Yb	5,7	0,4	3,0	2,6	3,1	2,4	2,7	0,8	0,5	2,8	1,5	1,6
Lu	0,8	0,1	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,1	0,1	0,5	0,2	0,2
Total	346,5	44,5	135,6	208,7	149,6	194,3	219,3	117,7	104,2	168,1	290,4	138,9

PF : perte au feu, LD : limite de détection

Echantillons de roches du Permo-Carbonifère

	métarhyolite le Crey	conglomérat du houillier	niveau psammitique houillier	schistes bitumineux sur la route de Cudray	schistes compacts du Permien Cudray	schistes violets Permien chapelle Cudray	schistes à galets de la route du col de la Madeleine	amphibolite de l'Homme de Beurre	conglomérat ou cataclasite de l'Homme de Beurre
	ET.04.01	ET.04.03	ET.04.04	ET.04.06	ET.04.07	ET.04.08	ET.04.13a	ET.04.14	ET.04.16
Majeurs en %									
SiO ₂	66,85	76,43	67,25	49,77	66,05	68,11	71,43	55,72	72,03
Al ₂ O ₃	13,96	12,04	16,39	25,21	16,10	15,59	15,41	17,38	15,03
Fe ₂ O ₃	2,55	3,46	5,43	10,33	5,78	5,38	3,45	8,56	1,86
MnO	0,06	0,04	0,05	0,14	0,08	0,06	0,01	0,13	0,02
MgO	1,30	1,07	1,49	2,61	1,72	1,64	1,29	4,53	0,86
CaO	2,90	0,28	0,27	0,15	0,52	0,41	0,09	1,72	0,34
Na ₂ O	3,95	2,36	2,25	0,49	3,12	2,38	0,23	2,56	2,72
K ₂ O	3,96	2,53	3,97	5,35	3,44	3,37	4,22	4,10	5,42
TiO ₂	0,46	0,42	0,62	1,02	0,80	0,70	0,62	1,35	0,54
P ₂ O ₅	0,19	0,10	0,09	0,16	0,22	0,20	0,10	0,25	0,04
PF	4,44	1,74	2,43	4,82	2,32	2,50	3,55	3,74	1,73
Total	100,61	100,48	100,25	100,06	100,14	100,33	100,41	100,04	100,59
Traces en ppm									
As	2	2	9	15	10	16	45	39	8
Ba	736	555	676	514	652	538	499	970	1250
Cd	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0	< L.D.
Co	5	6	10	13	12	6	2	21	4
Cr	30	53	73	137	60	55	72	125	48
Cs	5	11	16	15	7	6	30	9	19
Cu	9	22	< L.D.	16	22	18	13	61	49
Ga	18	16	22	36	23	23	22	24	20
Ge	1	1	2	3	1	1	2	2	2
Hf	6	4	6	3	7	6	6	4	6
Nb	16	8	10	17	15	14	11	8	14
Ni	11	21	30	43	23	21	16	60	15
Pb	10	8	8	24	19	10	17	6	19
Rb	160	109	179	251	126	133	258	199	212
Sb	3	0	1	1	0	0	10	22	8
Sm	8	6	6	9	10	8	7	5	6
Sr	346	95	86	80	133	90	36	226	148
Ta	2	1	1	1	1	2	1	1	1
Th	35	11	12	18	17	15	13	4	27
U	9	2	3	3	3	3	4	2	13
V	32	58	93	142	82	70	75	171	48
W	2	1	5	2	2	3	5	9	4
Zn	18	57	66	135	81	77	45	110	22
Zr	196	144	226	118	275	232	213	176	230
Terres Rares en ppm									
La	55,5	34,2	37,1	57,6	51,5	41,1	36,2	19,5	43,9
Ce	113,4	69,2	74,4	110,5	108,3	87,5	73,9	43,4	89,2
Pr	12,4	8,0	8,5	12,6	12,8	10,3	8,6	5,5	10,3
Nd	44,3	29,9	32,5	46,3	49,3	38,5	32,4	23,0	36,7
Sm	7,7	6,0	6,4	8,6	9,9	7,6	6,6	5,1	6,2
Eu	1,1	1,0	1,2	1,7	1,5	1,3	1,2	1,4	1,1
Gd	5,0	4,6	5,5	6,5	8,3	6,1	5,4	4,3	3,5
Tb	0,7	0,7	0,8	0,9	1,3	0,9	0,9	0,7	0,5
Dy	3,8	4,0	4,9	5,0	7,2	5,4	5,0	4,0	2,4
Ho	0,7	0,8	1,0	0,9	1,4	1,0	1,0	0,8	0,4
Er	1,8	2,1	2,6	2,5	3,6	2,8	2,7	2,2	1,2
Tm	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2
Y	20,6	22,9	27,6	26,1	39,3	28,4	29,3	22,4	11,8
Yb	1,9	2,1	2,7	2,5	3,5	2,8	2,7	2,2	1,2
Lu	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2
Total	269,6	186,2	206,0	282,4	298,8	234,6	206,5	135,2	208,7

PF : perte au feu, LD : limite de détection

Echantillons de roches de la couverture sédimentaire (Trias et Jurassique)

	190 rhétien : quartzites	cagneules (chesalet)	16-8 domérien-toarcien : schistes calc. à pyrites	gypse (gal. EDF)	19 aalénien : schistes silico-alumineux	11-5 hettangien-carixien : calcaire gris en dalles	dolomies	tuffs
	B18	B76b	B78	B79b	B82	B84	B85	B86
Majeurs en %								
SiO ₂	82,17	12,56	13,09	< L.D.	64,38	10,70	1,11	2,49
Al ₂ O ₃	9,34	2,35	5,40	0,02	19,83	4,59	0,69	1,02
Fe ₂ O ₃	1,42	1,15	3,39	< L.D.	4,79	1,78	0,51	0,95
MnO	0,03	0,18	0,13	0,00	0,02	0,09	0,02	0,01
MgO	0,72	6,28	1,80	0,28	0,37	1,79	20,16	0,47
CaO	0,13	39,09	40,87	33,02	0,29	44,21	31,15	52,67
Na ₂ O	1,34	0,08	0,12	< L.D.	0,81	0,20	0,09	< L.D.
K ₂ O	2,87	0,95	0,83	< L.D.	2,87	0,73	0,15	0,20
TiO ₂	0,15	0,11	0,26	< L.D.	1,17	0,19	0,06	0,05
P ₂ O ₅	0,04	0,04	0,09	< L.D.	0,12	0,06	< L.D.	< L.D.
PF	1,53	37,51	33,74	21,20	5,63	35,93	45,82	41,42
Total	99,74	100,30	99,72	54,52	100,28	100,27	99,76	99,26
Traces en ppm								
As	4	79	10	< L.D.	32	2	< L.D.	8
Ba	362	77	75	< L.D.	340	120	17	37
Cd	< L.D.	1	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
Co	6	3	9	0	9	5	1	2
Cr	17	14	37	< L.D.	129	24	7	8
Cs	6	3	4	< L.D.	8	4	0	2
Cu	10	17	20	< L.D.	14	16	4	10
Ga	10	3	8	< L.D.	28	6	0	1
Ge	2	0	1	< L.D.	3	1	0	0
Hf	4	1	1	< L.D.	8	1	0	0
Nb	3	2	4	< L.D.	22	4	1	1
Ni	14	14	32	4	15	51	7	11
Pb	8	39	12	< L.D.	31	7	13	4
Rb	94	34	46	1	125	36	9	12
Sb	1	3	0	< L.D.	1	0	4	1
Sm	4	1	4	0	6	3	0	1
Sr	15	131	801	1361	264	1328	453	2309
Ta	0	0	0	< L.D.	2	0	0	0
Th	11	2	3	0	17	3	1	1
U	2	3	1	0	3	2	3	1
V	15	24	50	< L.D.	167	34	10	12
W	1	1	1	< L.D.	2	0	3	0
Zn	19	106	63	< L.D.	39	54	24	18
Zr	169	32	46	< L.D.	281	31	14	9
Terres Rares en ppm								
La	21,1	4,9	20,3	0,2	46,5	15,2	1,8	2,9
Ce	42,4	10,7	34,5	0,3	105,6	22,2	3,4	4,6
Pr	5,0	1,2	4,6	0,0	11,0	3,4	0,4	0,6
Nd	18,8	4,7	18,4	0,1	39,5	13,9	1,4	2,5
Sm	3,7	1,0	4,1	0,0	6,3	3,4	0,3	0,6
Eu	0,8	0,2	0,7	< L.D.	0,9	0,7	0,1	0,1
Gd	3,5	0,9	4,2	0,0	3,9	3,7	0,2	0,6
Tb	0,6	0,1	0,6	< L.D.	0,7	0,6	0,0	0,1
Dy	3,4	0,8	3,7	0,0	4,6	3,5	0,2	0,5
Ho	0,7	0,1	0,7	< L.D.	1,0	0,7	0,0	0,1
Er	2,0	0,4	2,0	< L.D.	3,0	2,2	0,1	0,3
Tm	0,3	0,1	0,3	< L.D.	0,5	0,3	0,0	0,0
Y	20,8	4,4	23,7	< L.D.	27,7	25,6	1,0	3,2
Yb	1,9	0,4	2,0	0,0	3,3	2,0	0,1	0,3
Lu	0,3	0,1	0,3	< L.D.	0,5	0,3	0,0	0,0
Total	125,3	30,2	120,1	0,7	255,1	97,6	8,9	16,4

échantillon		Li en ppm	B en ppm	Br en ppm
B79	gypse (gal EDF)	<10	<20	<2
B85	dolomies	14	<20	<2
B84	11-5 hettangien carixien	96	<20	<2
B72	métagranite de Glaizette	103	<20	<2
B75	micaschistes (gal EDF)	299	<20	<2
LA.05.03	granite de la Lauzière	15	<20	<2

ANNEXE 10

ANALYSES DES ELEMENTS TRACES DES EAUX DES FORAGES THERMAUX DE LA LECHERE

	Eléments traces en µg/l																									
	Ag	Al	As	B	Ba	Br	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	I	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sn	Sr	V	W	Zn	
RII																										
13/10/49											2200															
13/10/49											3100															
13/04/53											3500															
05/09/83											580					100										
05/09/83											580				100											
05/09/83											<100				110											
12/01/84											200				130											
14/03/84											<100															
09/12/84	0	0	0	1632	18		0	0	0	0	0	308		950	0	0	0	120	0	0	0	8532	0	0	72	
21/04/86	<5	30	<5	1360		700	<1			<5	4	400		1000	80		5					9000			50	
02/05/89			<10									800			100											
13/10/92	<0,001	<0,01									<0,05	150			<50										<0,05	
21/06/95	<1	<10									<50	550		650	80										<50	
22/02/99				660									500									12600				
20/04/99																						9460				
06/05/99																										
RIII																										
13/10/49												3100														
09/12/83				1740										600												
12/01/84			<seuil									<100			110										<seuil	
13/01/84												<100			110											
09/12/84	0	168	288	1744	56		0	0	264	160	40	808		600	116	0	5888	168		176	664	11900	0	720	8424	
21/04/86	<5	35	<5	910		300	<1			<5	34	20		600	100			1				9400				
RIV																										
1953												2400														
14/03/83												<100			130											
03/12/84	0	0	0	1776	32		0	0	0	0	0	76		800	112	0	0	0	0	0	0	10830	0	0	176	
04/12/84	0	0	0	1616	28		0	0	0	0	0	0		700	148	0	264	0	0	0	0	10770	0	0	432	
09/12/84				1600										700								10800				
21/04/86	<5	12	<5	900		200	<1			<5	8	40		700	400			2				9100			72	
19/01/90				900										700								9100				
1978-1979	0,893			1548									330,2						111,15							
RV																										
12/01/84			<seuil									200			130										<seuil	
05/12/84	0	0	0	1740	40		0	0	0	0	0	0		700	160	0	0	0	0	0	0	10570	0	0	168	
07/12/84	0	0	0	1576	36						88			700	136										0	
15/10/85											40				150										0	
07/12/85				1600										800								10100				
10/03/86																										
21/04/86	<5	10	<5	970		300	<1			<5	6	40		800	300			3				8600			15	
17/01/90		<10										<100			150											
18/01/90												<100			200											
30/01/90		<10										<100			150											
12/02/90		30										100			100											
11/10/90		<10										<100			50											
17/01/91		50										100			250										<50	
02/06/93	<1	<10									<50	100		650	250										<50	
21/06/95	<1	<10									<50	<50			210										<50	
RVI																										
23/03/87												100			<200											
11/10/90		<10										<100			50											
06/05/92	<1	<10									<50	100			100										<50	

		Eléments traces en µg/l																											
		Ag	Al	As	B	Ba	Br	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	I	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Sn	Sr	V	W	Zn			
RVII	11/10/90		36										<100			<50											<50		
	06/05/92	<1	<10									<50	<100			<50											<50		
	06/05/92	<1	<10									<50	<100			50											<50		
	13/10/92	<1	21									<50	50			<50											650		
	02/06/93	<1	10									<50	100			40											<50		
	21/06/95	<1	20									<50	60		800	40											<50		
	24/03/97											<50	70		770	40													
	03/11/97											70	60		650	30													
	06/11/97											60	50		650	30													
	13/11/97											80	80		690	30													
	20/11/97																												
	20/04/99						0																	13300					
	06/05/99						0																	10300					
	02/06/99						0																	9200					
16/06/99						0																	9560						
30/06/99						0																	9140						
13/07/99						0																	8930						
RVIII	1994				54										60														
RIX	1994				58										50														
RX	12/03/97												<50		800	150													
	24/03/97														820	30													
	03/11/97														730	40													
	03/11/97											80			730	40													
	06/11/97														730	40													
	06/11/97														730	40													
	13/11/97														690	30													
	13/11/97														690	30													
	20/11/97														770	30													
	27/11/97														790	30													
Nat	09/10/98												62																
	07/04/99						0																						
	20/04/99						0																						
	20/05/99						0																						
	02/06/99						0																						
	14/06/99			<5	1480		0	<1			<1	<5	22		650	88			<10				10500				<5		
	16/06/99						0								900								7900						
	13/07/99			<2			0																						
	20/04/04		12	<1	1280	35	1100	<0.5			<1	<3	7		900	60			<2	<3			10900				<25		
	25/10/04		11	<1	1305	20	1100	<0.5			<1	<3	10		1100	64			<2	<3			11000				<25		

ANNEXE 11
ANALYSES UTILISEES POUR LE CALCUL DES GRADIENTS ISOTOPIQUES EN
RIVE DROITE ET RIVE GAUCHE DE L'ISERE (Dray, 2003)

nom de la source	date de prélèvement	altitude en m	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ vs SMOW	$\delta\text{D}\text{‰}$ vs SMOW
RIVE DROITE				
Villargerel	18/08/1999	718	-12,2	-89,5
Ronchat	18/08/1999	1176	-12,3	-89,6
Terreaux	18/08/1999	1740	-13,3	-96,1
Plan Bernard	18/08/1999	2025	-13,4	-94,2
Pointe Dzonfié	18/08/1999	2220	-13	-93,4
le Crozet	27/06/2000	930	-11,7	-83,3
Sous Fontaine	27/06/2000	1090	-12,3	-90,3
Ronchat	27/06/2000	1180	-12,8	-91,9
Violard	27/06/2000	1370	-11,6	-82,4
Sous Roc Marchant	27/06/2000	1460	-12,9	-94,4
Terreaux	27/06/2000	1680	-13,3	-97,3
Plan Bernard	27/06/2000	1916	-13,2	-95,9
Nant du Beurre	27/06/2000	2080	-13,2	-95,4
RIVE GAUCHE				
Sous Rognolet, Nant Bridan	01/08/2000	2337	-10,78	-75,3
Pic de la Lauzière	01/08/2000	2300	-11,93	-86,4
Sous petit Château, Valerre	01/08/2000	2293	-11,93	-86
Sous rocher du pays, Nant Pérou	01/08/2000	2830	-11,85	-85,5
l'homme de Beurre	01/08/2000	2106	-11,95	-85,6
Sous col de la Madeleine	01/08/2000	1800	-12,26	-87,4
la Pecy	11/10/2000	1600	-12,18	-88,6
le Villaret	11/10/2000	1050	-12,07	-87,2
Piste Crozat	11/10/2000	1070	-12,07	-74,7

ANNEXE 12

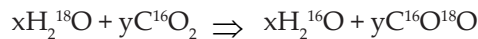
METHODOLOGIE DES ANALYSES DES ISOTOPES STABLES ET RESULTATS

Tous les échantillons d'eau utilisés pour déterminer les compositions isotopiques ont été conservés à l'abri de l'air. Les analyses ont été faites au laboratoire Transferts lithosphériques de Saint Etienne (analystes : Stéphanie Gallino et Emilie Thiébaud formées par Chrisophe Renac et Viviane Berthon). La description de cette méthodologie est reprise en partie de la thèse de Gal (2005).

1) Récupération des gaz à analyser pour $\delta^{18}\text{O}$, δD et $\delta^{13}\text{C}$

- Equilibration $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$ - $\text{CO}_{2(g)}$ pour déterminer $\delta^{18}\text{O}$ sur $\text{CO}_{2(g)}$

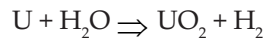
Pour l'analyse, les incondensables et le CO_2 de l'échantillon sont éliminés. Cette eau purifiée est ensuite mise en présence de CO_2 pur durant 10 à 12 h à 25°C pour atteindre un stade d'équilibre (Epstein et Mayeda, 1953) :



Après cette équilibration, l'eau est piégée dans un bain éthanol + azote (-80°C) et une partie du CO_2 libéré est scellé dans une ampoule en pyrex.

- Obtention de $\text{H}_{2(g)}$ à partir d'eau pour déterminer δD

Les incondensables et le CO_2 de l'échantillon sont éliminés puis l'eau purifiée est réduite sur de l'uranium métal à 750-800°C :



L'hydrogène ainsi produit est piégé par adsorption physique sur du charbon actif plongé dans l'azote liquide puis analysé directement au spectromètre de masse.

- Obtention de $\text{CO}_{2(g)}$ à partir d'eau pour déterminer $\delta^{13}\text{C}$

Sur le terrain, on ajoute à l'échantillon d'eau de la soude pour atteindre un pH supérieur à 12 afin de mettre sous forme libre les ions CO_3^{2-} . Ceux-ci sont précipités par ajout de chlorure de baryum sursaturé (Olive, 1999). On obtient donc un précipité de carbonate de baryum (BaCO_3).

Ce précipité est ensuite rincé à l'eau permutée (pour baisser le pH à 7), séché et broyé. La réaction entre ce précipité et l'acide phosphorique pendant une nuit, sous vide et à 25°C, produit un dégagement de CO_2 :



La solution est ensuite gelée dans un bain d'azote liquide et les incondensables sont éliminés, le passage de la solution dans un bain éthanol + azote (-80°C) va libérer le CO_2 que l'on va sceller dans une ampoule en pyrex.

2) Problème méthodologique $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$

Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ obtenues à St-Etienne pour les eaux thermales sont appauvries par rapport à celle des autres laboratoires (cf. partie IV, §IV.1.1). Ceci peut s'expliquer (i) soit par une quantité insuffisante de BaCl_2 ajoutée, ne permettant pas de précipiter tous les bicarbonates à la suite des sulfates, (ii) soit d'une perturbation de la signature isotopique par la présence de CH_4 .

(i) En effet, lors de nos prélèvements, la quantité de BaCl_2 à ajouter a été calculée en prenant en compte uniquement la concentration en HCO_3 des eaux, en ajoutant une marge de sécurité. Or la quantité de BaCl_2 à ajouter doit prendre en compte la concentration en HCO_3 mais aussi en SO_4 . Comme les sulfates précipitent en premier, notre protocole ne nous aurait permis de récupérer qu'une partie des carbonates. Du fait du fractionnement du à la précipitation, la valeur de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$ obtenue est donc erronée par rapport aux valeurs obtenues au CRG de Thonon. La méthode directe par attaque acide (utilisée par le laboratoire Hydroisotop) ne nécessitant pas la réalisation de précipité, elle permet de s'affranchir des problèmes amenés par la présence de sulfates.

(ii) Lors des analyses effectuées à St-Etienne, il a été observé que les échantillons d'eau thermale présentent des signatures de moins en moins négatives en fonction du temps écoulé depuis le prélèvement (Renac, communication personnelle). Ceci semble indiquer que la présence de CH_4 dans l'eau thermale serait responsable de la signature isotopique très négative obtenue à St-Etienne.

Les analyses effectuées dans le cadre de ce travail ne nous permet pas de trancher pour l'une ou l'autre de ces hypothèses. Par mesure de précaution, nous n'utiliserons pas les valeurs de ^{13}C obtenues à St-Etienne pour les eaux sulfatées.

3) Spectrométrie de masse et standards internationaux

Les rapports isotopiques des gaz analysés (CO_2 ou H_2) sont déterminés sur un spectromètre de masse à source gazeuse (Isoprime Micromass "dual inlet"). Le spectromètre utilisé possède trois détecteurs qui servent à déterminer l'abondance des masses 44, 45 et 46 pour le CO_2 (fonction de la combinaison entre les atomes ^{12}C et ^{13}C et ^{16}O , ^{17}O et ^{18}O) et des masses 2, 3 ou 4 pour le H_2 (^1H , ^2H). Des comparaisons successives sont faites entre un gaz de travail et un gaz inconnu (échantillon).

Les rapports isotopiques R ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$ et $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) sont exprimés par rapport aux références internationales :

- ‰ vs SMOW (Standard Mean Oceanic Water) pour $\delta^{18}\text{O}$ et δD ;

- ‰ vs PDB (PeeDee Belemnite) pour $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$.

avec $\delta = [(R_{\text{échantillon}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}] * 1000$

Pour retrouver le $\delta^{18}\text{O}$ de l'échantillon, les étapes sont les suivantes :

- étape 1 :

Prendre en compte le facteur de fractionnement α de l'équilibration $\text{H}_2\text{O}_{(l)}-\text{CO}_{2(g)}$:

$$\delta_{\text{vrai}} = [\delta_{\text{mesuré}} - 1000 * (\alpha - 1)] / \alpha$$

$\alpha = 1,04115$ pour cette équilibration (Brenninkmeijer et al., 1983)

- étape 2 :

Pour chaque série analysée, au moins deux standards sont passés au spectromètre :

SMOW : $\delta^{18}\text{O} = 0$ ‰ vs SMOW (standard international)

SLAP : $\delta^{18}\text{O} = -55,5$ ‰ vs SMOW (standard international)

OMER : $\delta^{18}\text{O} = 1$ ‰ vs SMOW (standard interne)

SLIM : $\delta^{18}\text{O} = -27$ ‰ vs SMOW (standard interne)

Les valeurs mesurées sont alors corrigées par rapport à ces standards afin d'obtenir un $\delta^{18}\text{O}$ en ‰ vs SMOW.

Pour retrouver le δD de l'échantillon, il suffit d'appliquer l'étape 2 avec :

SMOW : $\delta\text{D} = 0$ ‰ vs SMOW (standard international)

SLAP : $\delta\text{D} = -428$ ‰ vs SMOW (standard international)

OMER : $\delta\text{D} = 7$ ‰ vs SMOW (standard interne)

SLIM : $\delta^{18}\text{O} = -187$ ‰ vs SMOW (standard interne)

Les valeurs mesurées sont alors corrigées par rapport à ces standards afin d'obtenir un δD en ‰ vs SMOW.

Pour retrouver le $\delta^{13}\text{C}$ de l'échantillon, il suffit de soustraire à toutes les valeurs la différence entre valeur mesurée et valeur théorique du standard international NBS ($\delta^{13}\text{C} = 1,95$ ‰ vs PDB).

Les erreurs pour chacune des valeurs isotopiques mesurées sont les suivantes :

- erreur $\delta^{18}\text{O}$: 0,1 ‰ vs SMOW

- erreur : δD : 1 ‰ vs SMOW

- erreur $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$: 0,03 ‰ vs PDB pour la précision de la mesure et 0,2 ‰ vs PDB en prenant en compte l'erreur amenée par la réalisation du précipité

Résultats

	Echantillon	$\delta^{18}\text{O} \text{‰ vs SMOW}$	$\delta\text{D} \text{‰ vs SMOW}$	$\delta^{13}\text{C} \text{‰ vs PDB}$
campagne des 13 et 14/09/05	Perou amont	-12,1		
	Perou aval	-12,2		
	Pont Botto	-12,3		
	VS	-12,7		
	Avignons	-12,8		
	Glazette	-11,0		
	RVII	-12,6		
	Natacha	-12,8		
	RF bac	-12,4		
	RF Ironic	-12,5		
	V46	-12,5		
	V8	-12,2		
	F2	-12,3		
	RVII			-14,37
	Natacha			-18,09
	RF bac			-8,60
	Pz poste prof			-8,70
Pz taxi prof			-9,52	
Pz OT prof			-10,04	
V46			-9,18	
F2			-11,03	
campagne des 19 et 20/01/06	Guilots	-12,1	-89	-7,69
	Pont Botto	-11,9	-87	
	VS	-12,2	-89	-18,69
	Tartet	-11,6	-82	-11,32
	Glazette	-11,4	-82	-9,59
	Isère	-13,0	-93	-7,77
	RVII	-12,2	-88	-15,16
	Natacha	-12,6	-90	-17,64
	RF bac	-11,9	-95	-7,32
	Pz poste surf	-12,6	-93	-14,86
	Pz poste prof	-12,5	-92	-9,00
	Pz taxi surf	-12,3	-88	-10,43
	Pz taxi prof	-12,1	-96	-10,07
	Pz OTsurf	-12,6	-90	-9,51
	Pz OT prof	-11,9	-88	-10,01
	V46	-12,1	-87	-7,97
	V8	-11,9	-87	-12,40
F2	-11,9	-85	-8,49	
campagne du 31/03/2006	Natacha			-14,29
	Natacha dégaz			-18,43
campagne des 31/05/2006	Isère	-12,8		
	RVII	-12,8		
	Natacha	-12,5		
	RF bac	-12,0		
	Pz poste surf	-12,8		
	Pz poste prof	-13,2		
	Pz taxi surf	-12,2		
	Pz taxi prof	-12,1		
	Pz OT prof	-13,0		
	Bellecombe	-12,6		
	V46	-11,8		
	V8	-11,8		
	F2	-12,3		
	Glazette	-11,3		
	Avignons	-12,5		
	Sce des îles	-12,0		
	Pont Botto	-12,5		
VS	-12,3			
campagne des 30 et 31/08/06	Isère			-8,68
	RVII			-16,21
	Natacha			-20,88
	Natacha dégaz			-24,935
	RF bac			-8,17
	Pz poste surf			-8,98
	Pz poste prof			-7,57
	Pz taxi surf			-9,25
	Pz taxi prof			-9,55
	Pz OT prof			-9,93
	Bellecombe			-8,62
	V46			-8,39
	V8			-8,62
	F2			-8,95
	Glazette			-12,79
	Avignons			-8,86
	Sce des îles			-13,37
Pont Botto			-16,70	
VS			-16,17	

Fonctionnement d'un système hydrothermal associé à un contact tectonique alpin (La Léchère, Savoie).

Apports de l'hydrogéologie, de la géochimie et de la modélisation hydrodynamique et thermique en vue de la gestion de la ressource.

Cette étude définit le fonctionnement du système hydrothermal de la Léchère, grâce à une approche interdisciplinaire associant (1) géologie, (2) hydrodynamique, (3) hydrogéochimie et (4) modélisation hydrodynamique/thermique.

(1) L'accident tectonique, marquant le contact entre la couverture carbonatée et les micaschistes du socle, est jalonné par des écailles discontinues d'évaporites triasiques. A l'intersection entre cet accident et la vallée de l'Isère, les eaux thermales se diffusent dans l'ombilic glaciaire par l'intermédiaire d'un écroulement ancien, identifié par la réinterprétation des descriptions de forages.

(2) Le système thermal est caractérisé par la présence d'une zone décomprimée dans laquelle ont lieu les circulations superficielles et qui sert également de trop-plein au système profond. L'ensemble est alimenté de manière diffuse par l'infiltration des eaux de pluie et de manière ponctuelle par deux pertes sur le réseau hydrographique. Dans la zone d'émergence, les circulations resteront ascendantes tant que le niveau de l'aquifère thermal restera supérieur à celui de l'aquifère superficiel.

(3) Au début de leur parcours, les eaux thermales interagissent avec les dolomies, cargneules et gypses (Ca, SO₄, Mg), au même titre que les eaux triasiques superficielles. Elles se différencient ensuite par un parcours profond de plusieurs milliers d'années, leur permettant d'interagir avec la halite (Cl), les roches métamorphiques (Si, K, échange Ca/Na) et les roches permo-carbonifères (matière organique, H₂S), avant de se mélanger avec les eaux superficielles de la zone d'émergence.

(4) La modélisation numérique couplée hydrodynamique / thermique a mis en évidence la chasse des eaux chaudes vers la vallée lors de la réactivation post-glaciaire des écoulements. La mise en exploitation de la ressource thermique accélère, toutefois de façon imperceptible à l'échelle d'observation, le refroidissement naturel de l'aquifère thermal.

Mots clés : hydrothermalisme, hydrogéologie, géochimie, interaction fluides/roches, modélisation hydrodynamique/thermique, contact tectonique, La Léchère, Tarentaise-Savoie, Alpes.

Characterization of an hydrothermal system associated to an alpine tectonic contact (La Léchère, Savoie). *Contributions of hydrogeology, geochemistry and hydrodynamic/thermic modeling to the water resource management.*

The La Léchère hydrothermal system is studied with an interdisciplinary approach associating (1) geology, (2) hydrodynamic, (3) hydrogeochemistry and (4) hydrodynamic and thermic modeling.

(1) The strike-slip thrust at the contact between the carbonated cover and micaschists of the crystalline basement, is underlined by discontinuous tectonic slices of Triassic evaporites. At the intersection between this contact and the Isère valley, thermal waters diffuse in a glacial basin through an old rock avalanche, identified by the re-interpretation of previous drilling descriptions.

(2) The system is characterized by a decompressed zone where shallow circulations are located; this zone is considered to be an overflow of the deep system. The global system is recharged by diffuse meteoric infiltration and by losses along the Eau Rousse torrent. In the discharge area, flows will be ascending as long as the level of the deep aquifer will stay higher than that of the shallow aquifer.

(3) During their flow path, thermal and triassic shallow waters interact with dolomite, cargneules and gypsum (Ca, SO₄ and Mg). Thermal waters differ from triassic waters due to a deep flow path of several thousands years and interaction with halite (Cl), metamorphic (Si, K exchange Ca/Na) and Permo-carboniferous rocks (organic matter, H₂S) before mixing with shallow waters of the discharge area.

(4) Hydrodynamic and thermic modeling shows that hot waters are flushed towards the valley by flow re-activation at the beginning of the last deglaciation. Thermal resource exploitation accelerates the natural cooling of the thermal aquifer. However, this acceleration is not observed during the last 10 years of monitoring.

Key words: hydrothermalism, hydrogeology, fluids/rocks interaction, hydrodynamic and thermic modeling, tectonic contact, La Léchère, Tarentaise-Savoie Alpes.