



Ressource en eau thermique de la station de Bagnols-les-Bains Etat des lieux

Rapport final

BRGM/RP-61211-FR
Juillet 2012



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Ressource en eau thermale de la station de Bagnols-les-Bains Etat des lieux

Rapport final

BRGM/RP-61211-FR

Juillet 2012

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Service public du BRGM PSP10LRO30

A. Calvet – B. Aunay – B. Dewandel – B. Ladouche

Vérificateur :

Nom : P. Vigouroux

Date : 07 août 2012

Approbateur :

Nom : M. Audibert

Date : 03 septembre 2012

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008



Mots clés : Eau thermo-minérale, source thermale, synthèse hydrogéologique, gestion ressource eau, qualité eau, périmètre protection, Bagnols-les-Bains.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la manière suivante :

Calvet A., Aunay B. Dewandel B., Ladouche B.,(2012) – Ressource en eau thermale de la station de Bagnols-les-Bains – Etat de lieux - Rapport final – Rap BRGM RP-61211-FR, 125p, 39 ill., 12 tab., 12 ann..

Synthèse

L'analyse de la ressource en eau thermale de la station de Bagnols-Les-Bains s'inscrit dans le cadre du programme intitulé « **Qualité de la ressource en eau thermale des stations du Languedoc-Roussillon** ». Ce programme est cofinancé par l'Union Européenne (FEDER), la Région Languedoc-Roussillon, le département de la Lozère, la société d'économie mixte de la Lozère (SELO) et le BRGM. Le programme a concerné la rédaction d'un état des lieux de la station thermale de Bagnols-les-Bains qui a permis de préciser les points suivants :

- concernant les **connaissances du gisement** et du système hydrothermal, la localisation de l'impluvium est à confirmer afin de préserver la qualité de la ressource. Le temps de transit des eaux est estimé supérieur à 60 ans par une datation au tritium, qui montre en outre, la présence de mélanges avec des eaux superficielles. La température d'équilibre en profondeur reste à préciser ;
- concernant la connaissance du **fluide thermal**, il s'agit d'eaux bicarbonatées et sulfatées sodiques avec des teneurs importantes en hydrogène sulfuré et fluor. Les teneurs en H_2S et SO_4 sont liées au processus d'oxydation des sulfures. La répartition des minéralisations au niveau des sources s'explique par une composante profonde et par la diversification des voies de circulation à proximité de la surface, occasionnant des mélanges différents en fonction des émergences ;
- concernant **les conditions d'exploitation**, la baisse de la production de l'ouvrage d'exploitation depuis sa mise en service ainsi que la mise en évidence d'un colmatage répétitif font de F6 un forage fragile. Cette situation constitue un risque pour la sécurité d'approvisionnement des thermes. Il convient de noter qu'il n'existe pas d'alternative à l'exploitation de F6 (ouvrage de secours).
- concernant **le suivi d'exploitation** de la ressource, le site est correctement équipé mais la récupération, l'archivage et le traitement des données ne sont pas effectués selon les règles de l'art. Il est ainsi difficile d'apprécier l'évolution relative de l'exploitation sur la durée ;
- concernant **le cadre réglementaire**, le site dispose d'une déclaration d'intérêt public et d'un périmètre de protection associé. Il serait pertinent de redéfinir ce périmètre sur la base de considérations hydrogéologiques actualisées. Le forage F6 ne dispose pas, quant à lui, de l'autorisation d'exploiter requise.

A **court terme** les pistes de progrès qu'il est recommandé de suivre pour renforcer la qualité de la ressource thermale de Bagnols-les-Bains concernent :

- la récupération et la valorisation des données de suivi d'exploitation ;
- l'acquisition d'informations géochimiques et isotopiques complémentaires sur les eaux du secteur d'étude ;
- la régularisation de l'autorisation d'exploiter du forage F6.

A **long terme**, il est recommandé de suivre les pistes de progrès suivantes :

- réalisation d'un ouvrage de secours ;
- instrumentation des sources (mesures du débit d'exhaure) ;
- actualisation du périmètre de protection établi au titre de la DIP.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. CADRE DU PROGRAMME REGIONAL THERMALISME	11
1.2. MODALITES D'INTERVENTION	11
2. La station thermale de Bagnols-les-Bains	13
2.1. CONTEXTE GENERAL DU SECTEUR DE BAGNOLS-LES-BAINS	13
2.1.1. Contexte géographique	13
2.1.2. Contexte climatique.....	14
2.1.3. Contexte géologique	17
2.1.4. Contexte hydrogéologique.....	25
2.2. L'ACTIVITE THERMALE DE LA STATION.....	27
2.2.1. Historique de l'activité thermique (Naydénov, 1990).....	27
2.2.2. Nature de l'activité thermique	28
2.2.3. Importance de l'activité thermique	28
3. La ressource en eau thermale de la station de Bagnols-les-Bains	31
3.1. LE GISEMENT D'EAU THERMO-MINERALE	31
3.1.1. Approche théorique de la notion de gisement.....	31
3.1.2. Le gisement de Bagnols-les-Bains	33
3.2. LA RESSOURCE THERMALE EXPLOITEE	39
3.2.1. Caractérisation physico-chimique de la ressource.....	40
3.2.2. Caractérisation isotopique de la ressource	48
3.3. LA MISE EN PRODUCTION – LES EQUIPEMENTS	52
3.3.1. Les captages existants.....	52
3.3.2. Les plateaux techniques de suivi d'exploitation	53
3.3.3. Les sources existantes.....	55
3.3.4. Les conditions de transport et de stockage	56
3.4. LE SUIVI D'EXPLOITATION – LA MAINTENANCE	58
3.4.1. Le suivi d'exploitation de la ressource	58
3.4.2. La maintenance des installations.....	62
3.5. LE CADRE REGLEMENTAIRE	64

3.5.1. Les autorisations existantes	64
3.5.2. Les procédures en cours	65
4. Conclusion	67
4.1. LA SITUATION ACTUELLE DE LA RESSOURCE THERMALE.....	67
4.2. LES PISTES DE PROGRES A MOYEN ET COURT TERME.....	68
5. Eléments de bibliographie.....	71

Liste des Illustrations

Illustration 1 : La station thermique de Bagnols-les-Bains et les autres stations thermales de la région Languedoc-Roussillon	12
Illustration 2 : Carte de situation de la commune de Bagnols-les-Bains	13
Illustration 3 : Occupation des sols dans le secteur de Bagnols-les-Bains	14
Illustration 4 : Carte de situation des postes météorologiques de Bagnols-les-Bains et du Bleymard	15
Illustration 5 : Variation annuelle des températures à Bagnols-les-Bains Données Météo France.	15
Illustration 6 : Cumul annuel des précipitations dans le secteur de Bagnols-les-Bains. Données Météo-France.....	16
Illustration 7 : Moyenne mensuelle des précipitations dans le secteur de Bagnols-les- Bains.....	16
Illustration 8 : Situation de Bagnols-les-Bains dans le contexte géologique local	18
Illustration 9 : Coupe schématique des Cévennes d'après (Horon, et al., 1957), modifié.	19
Illustration 10 : Carte géologique et légende de la région de Bagnols-les-Bains (Extrait de la carte du Bleymard 1/50 000)	23
Illustration 11 : Entités hydrogéologiques du secteur de Bagnols-les-Bains d'après le Référentiel Hydrogéologique Français (Saplaïroles, et al., 2009).....	25
Illustration 12 : Les sources de la commune de Bagnols-les-Bains	26
Illustration 13 : Etablissement thermal de Bagnols-les-Bains.....	29
Illustration 14 : Evolution de l'activité thermique pour la période 2002 / 2011.....	29
Illustration 15 : Schéma de principe du circuit hydrominéral	32
Illustration 16 : Localisation supposée de l'impluvium des eaux thermales de Bagnols- les-Bains avec position du trait de coupe.....	34
Illustration 17 : Hypothèse sur le fonctionnement hydrogéologique du système hydrothermal de Bagnols-les-Bains et sur la localisation de l'impluvium (Duboeuf, Inédit).....	34
Illustration 18 : Schéma de remontée des eaux thermales (ANTEA modifié, 2003)	36

Illustration 19 : Situation des forages et sources sur la commune de Bagnols-les-Bains	37
Illustration 20 : Vue aérienne des thermes et du forage d'exploitation (image Google Earth).....	39
Illustration 21 : Valeurs du contrôle réglementaire pour le forage F6 et estimation de la stabilité avec la méthode (ARS)	44
Illustration 22: Stabilité de l'eau thermique de Bagnols-les-Bains (méthode de l'AFSSA)	45
Illustration 23 : Température et conductivité des eaux de Bagnols-les-Bains	46
Illustration 24 : Concentrations sodium en fonction de la silice des eaux de Bagnols-les-Bains ⁸	47
Illustration 25 : Diagramme $\delta^{34}\text{S}$ (SO ₄) (‰ vs CDT) - $\delta^{18}\text{O}$ (SO ₄) (‰ vs SMOW) des sulfates dans les eaux thermales de Bagnols-les-Bains.....	49
Illustration 26 : Rapport $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ vs Sr des échantillons d'eau et de roche de la région (Verdoux, 1997).....	51
Illustration 27 : Rapport $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ vs $1/\text{Sr}$ des eaux de Bagnols-les-Bains (Verdoux, 1997)	51
Illustration 28 : Local technique et périmètre sanitaire d'émergence du forage F6	53
Illustration 29 : Tête de forage F6	54
Illustration 30 : Appareillage du local dédié au stockage des mesures	54
Illustration 31 : Aménagement des sources de la galerie du préfet.....	55
Illustration 32 : Dépôts d'oxydes de fer et autres minéralisations dans la galerie du préfet	56
Illustration 33 : Tracé schématique de la canalisation de transport de l'eau thermique	57
Illustration 34 : Schéma du bassin de stockage (ICS'eau, 2004)	58
Illustration 35 : Chroniques de températures du forage F6 entre 2008 et 2012	59
Illustration 36 : Suivi des paramètres du forage F6 du 16/11/07 au 08/01/08	59
Illustration 37 : Suivi des paramètres du forage F6 du 08/04/12 au 06/05/12	61
Illustration 38 : Chronologie des opérations de maintenance F6	63
Illustration 39 : Limites du périmètre de protection établi au titre de la DIP (Vigouroux, 1999)	64

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Chronologie des phases tectoniques	20
Tableau 2 :	Caractéristiques des eaux de Bagnols-les-Bains.....	27
Tableau 3 :	Physico-chimie des sources de Bagnols-les-Bains.....	40
Tableau 4 :	Gaz à l'émergence des sources de la galerie du préfet (Clanet, 1985)	42
Tableau 5 :	Caractéristiques des eaux du forage F6	42
Tableau 6 :	Tableau de la spéciation des phases minérales	46
Tableau 7 :	Datation tritium des eaux thermales de Bagnols-les-Bains	48
Tableau 8 :	^{34}S (SO_4) ‰ et ^{18}O (SO_4) ‰ des eaux de Bagnols-les-Bains (Verdoux, 1997)	50
Tableau 9 :	Compositions isotopiques et concentrations en Sr des échantillons d'eau prélevées à Bagnols-les-Bains en 1996 (Verdoux, 1997)	50
Tableau 10 :	Caractéristiques de F6	52
Tableau 11 :	Coupe géologique du forage F6 (ANTEA, 2003)	52
Tableau 12:	Indices BSS et coordonnées des sources	55

Liste des annexes

Annexe 1	Données météorologiques	75
Annexe 2	Schéma structural.....	81
Annexe 3	Cartographie de la schistosité et des failles	85
Annexe 4	Ouvrages	89
Annexe 5	Diagramme de Schoeller-Berkaloff	93
Annexe 6	Données de physico-chimie	97
Annexe 7	Données isotopiques	103
Annexe 8	Coupe technique F6	107
Annexe 9	Courbe caractéristique F6	109
Annexe 10	Schéma de l'installation de pompage	113
Annexe 11	Synthèse du suivi F6	117
Annexe 12	Déclaration d'intérêt public et périmètre de protection.....	121

1. Introduction

1.1. CADRE DU PROGRAMME REGIONAL THERMALISME

L'analyse de la ressource en eau thermale de la station de Bagnols-les-Bains s'inscrit dans le cadre du programme régional thermalisme intitulé « **Qualité de la ressource en eau thermale des stations du Languedoc-Roussillon** ». Ce programme, mené sur la période 2010 à 2013, est cofinancé par l'Union Européenne (FEDER), la Région Languedoc-Roussillon, la société d'économie mixte de la Lozère (SELO), le Conseil Général de la Lozère et le BRGM. Il est mené en partenariat avec la Fédération Thermale et Climatique Languedoc-Roussillon (FTCLR).

Le programme est conduit par le Bureau de Recherche Géologique et Minière Languedoc-Roussillon, dans le cadre de ses missions de service public (projet PSP10LRO30). Il concerne les 13 stations thermales de la région (Illustration 1). L'équipe de projet BRGM est chargée, notamment, dans le cadre du programme, de réaliser un état des lieux sur la ressource thermale des sites qui le souhaitent. Le présent rapport correspond à l'état des lieux de la ressource en eau thermale de Bagnols-les-Bains.

Le programme régional est axé autour des principaux thèmes suivants :

- sensibilisation des acteurs du thermalisme à la démarche qualité pour la ressource ;
- caractérisation des situations d'exploitation (état des lieux) ;
- assistance technique à la mise en œuvre et au soutien des actions qualité.

1.2. MODALITES D'INTERVENTION

Le programme régional thermalisme Languedoc-Roussillon a été initié en 2010, après signature des conventions de cofinancement entre le BRGM et l'Union Européenne d'une part (FEDER), et des conventions de partenariat avec la Région Languedoc-Roussillon et les Conseils Généraux des départements du Languedoc-Roussillon d'autre part.

Le programme intègre des actions d'information et de sensibilisation à la démarche qualité sur la ressource thermale. L'équipe de projet BRGM a pour mission, en outre, d'apporter, à la demande, l'**assistance technique** sollicitée par les sites thermaux sur les problématiques liées à leur ressource.

La première étape du programme concerne la réalisation, pour chaque station thermale (Illustration 1), d'un **état des lieux** critique des connaissances sur les gisements d'eau minérale et sur leurs exploitations. Les états des lieux sont établis dans le cadre d'une approche consensuelle avec les stations thermales. Le présent rapport concerne l'état des lieux réalisé pour la station thermale de Bagnols-les-Bains.

Pour les chroniques de données compilées, la période de référence retenue a été étendue à la période 2002-2011, afin d'obtenir au minimum 10 ans de mesures. En ce qui concerne le suivi des paramètres physico-chimiques des sources, nous avons utilisé toutes les données disponibles depuis le début de l'exploitation, en 1875.

Au-delà de l'analyse critique des données, l'expertise apportée à chaque site thermal a pour finalité d'apprécier, de manière prospective et en cohérence avec l'existant, les pistes de progrès à soutenir pour améliorer la qualité de la ressource thermique.

Les moyens mis en œuvre pour établir l'état des lieux de la station thermique de Bagnols-les-Bains ont été les suivants :

- recherche bibliographique exhaustive à partir de nombreuses sources d'informations et de documentation (ARS, BRGM, ingénierie, bibliothèques universitaires et scientifiques, archives de la station thermique, etc.) ;
- analyse critique des informations disponibles et exploitation de la documentation existante ;
- visite du site thermal concerné et observations de terrain ;
- réunions et discussions avec les responsables de la SELO (Syndicat d'Economie Mixte de la Lozère) et du centre thermal de Bagnols-les-Bains. Le présent rapport est édité dans le cadre d'une approche consensuelle avec ses responsables, qui sont remerciés pour leur collaboration avec l'équipe de projet BRGM ;
- rédaction d'un rapport, incluant la formulation de recommandations et la proposition de pistes de progrès.

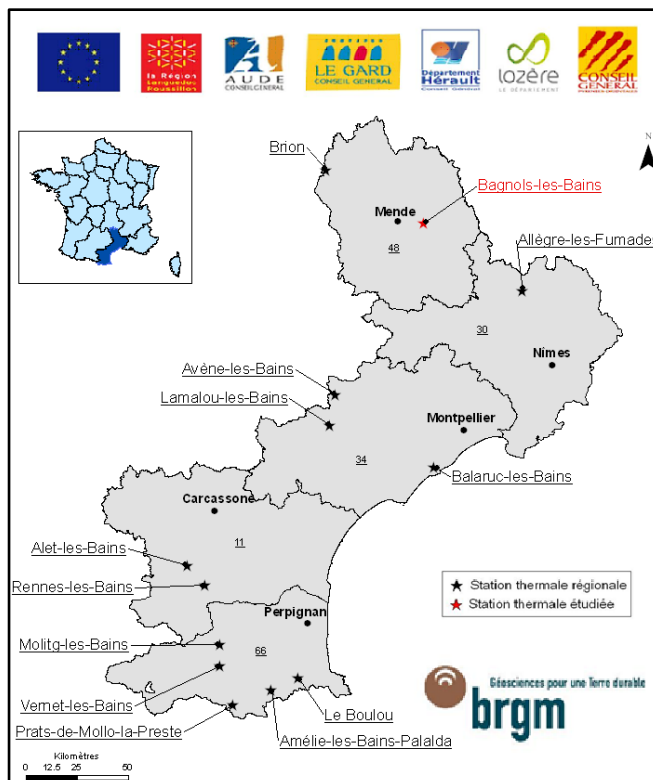


Illustration 1 : La station thermique de Bagnols-les-Bains et les autres stations thermales de la région Languedoc-Roussillon

2. La station thermique de Bagnols-les-Bains

2.1. CONTEXTE GENERAL DU SECTEUR DE BAGNOLS-LES-BAINS

2.1.1. Contexte géographique

La commune de Bagnols-les-Bains est située sur les rives du Lot, dans le département de la Lozère. Elle se trouve à une quinzaine de kilomètres à l'Est de Mende, aux portes du parc national des Cévennes (Illustration 2).

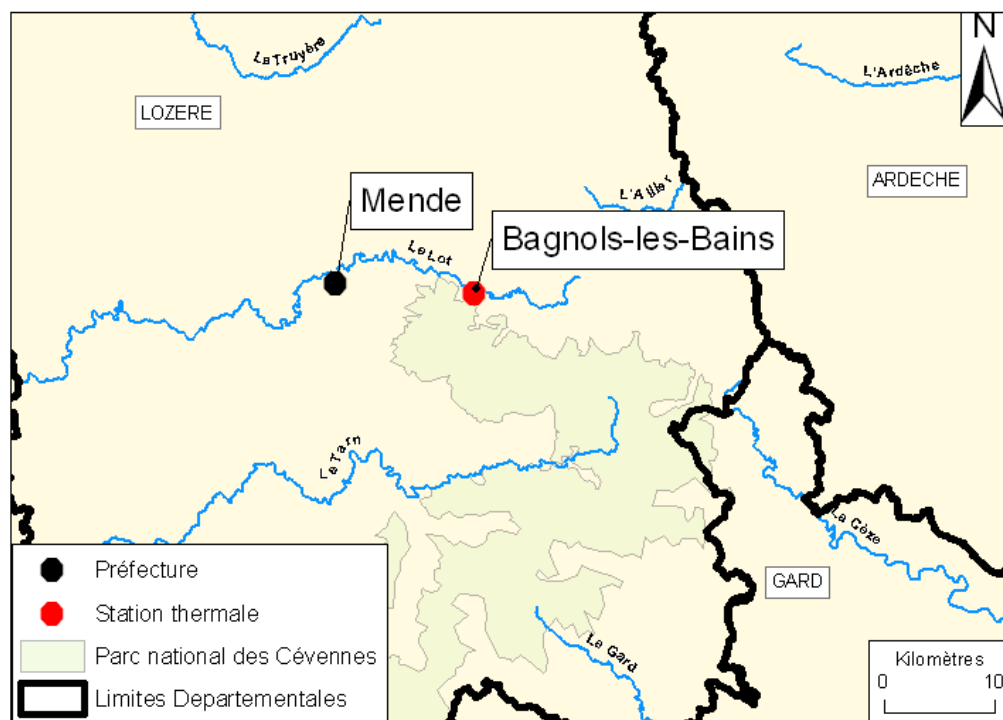


Illustration 2 : Carte de situation de la commune de Bagnols-les-Bains

La commune de Bagnols-les-Bains compte 229 habitants (INSEE, 2009) et s'étend sur une superficie de 2,4 km². L'altitude moyenne du village est de 923 m. Elle est traversée par trois cours d'eau (Illustration 3) :

- le Rieufrech longe la bordure Sud de la limite communale et se jette dans le Lot à l'entrée de la ville ;
- le Lot qui traverse la commune d'Est en Ouest ;
- le ruisseau de La Valette qui s'écoule du Nord au Sud et rejoint le Lot en sortie de la commune.

L'occupation des sols dans le secteur de Bagnols-les-Bains est présentée sur l'illustration 3.

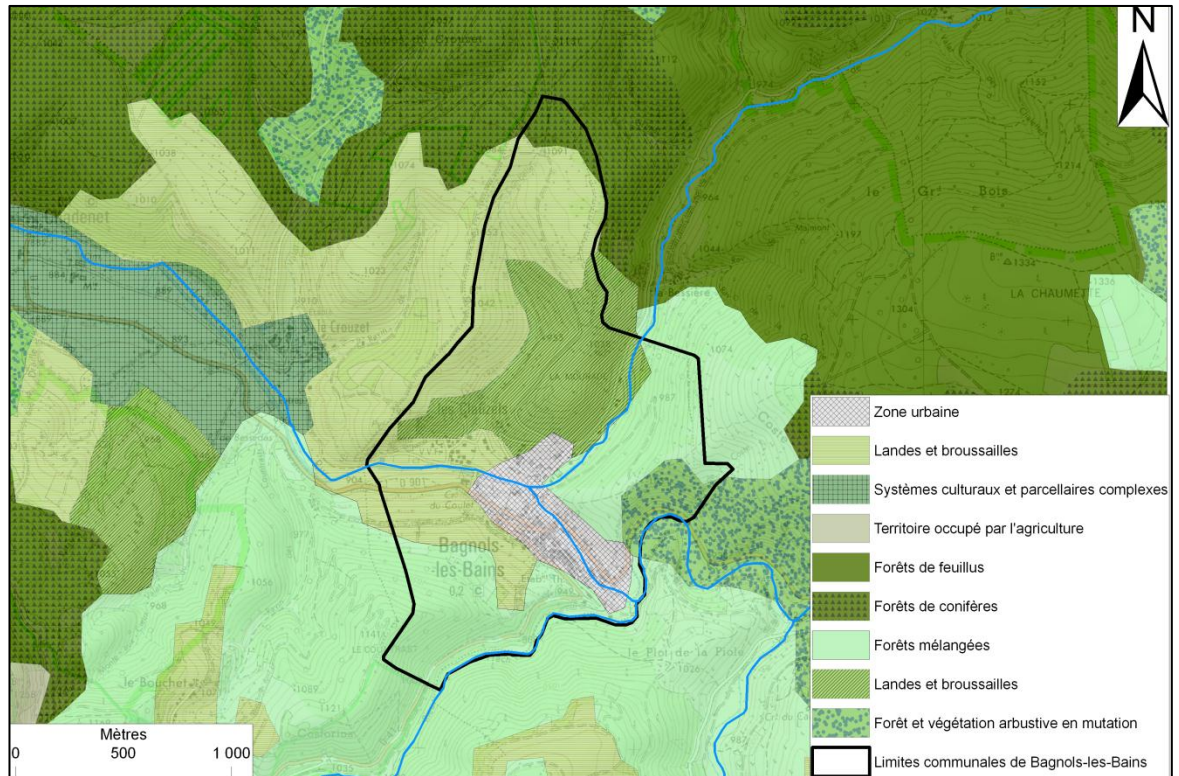


Illustration 3 : Occupation des sols dans le secteur de Bagnols-les-Bains

2.1.2. Contexte climatique

Le secteur de Bagnols-les-Bains est soumis à un climat modéré, relativement frais tout au long de l'année. Ce climat est influencé par le régime méditerranéen au Sud et le régime continental au Nord. La présence des Cévennes, et notamment le mont Lozère constituent des barrières aux masses d'air chaud en provenance de la méditerranée, créant ainsi des conditions s'apparentant plus à un climat de type continental.

Les données relatives aux températures et précipitations utilisées pour caractériser le climat sont issues de la station météorologique manuelle située sur la commune de Bagnols-les-Bains et de la station automatique du Bleymard. Ces deux postes sont éloignés de 8 km et ont une différence d'altitude de 500 m.

Les données météorologiques de température et de pluviométrie compilées dans le cadre de l'état des lieux sont présentées en Annexe 1. L'illustration 4 présente la localisation de ces deux stations météorologiques.



Illustration 4 : Carte de situation des postes météorologiques de Bagnols-les-Bains et du Bleymard

a) Analyse de la température

L'illustration 5 permet d'apprécier l'évolution de la température au cours de l'année sur la commune de Bagnols-les-Bains.

Le secteur est soumis à des températures hivernales fraîches qui oscillent aux alentours de 0°C et des températures estivales plutôt douces qui ne dépassent pas les 25°C. La température moyenne annuelle est de 9.2°C.

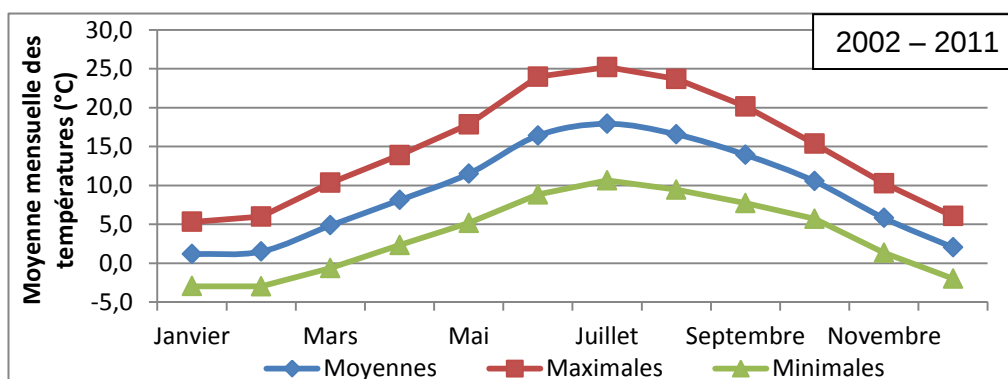


Illustration 5 : Variation annuelle des températures à Bagnols-les-Bains Données Météo France.

b) Analyse des précipitations

Les graphiques suivants permettent d'apprécier l'évolution des précipitations dans la région de Bagnols-les-Bains (Illustration 6).

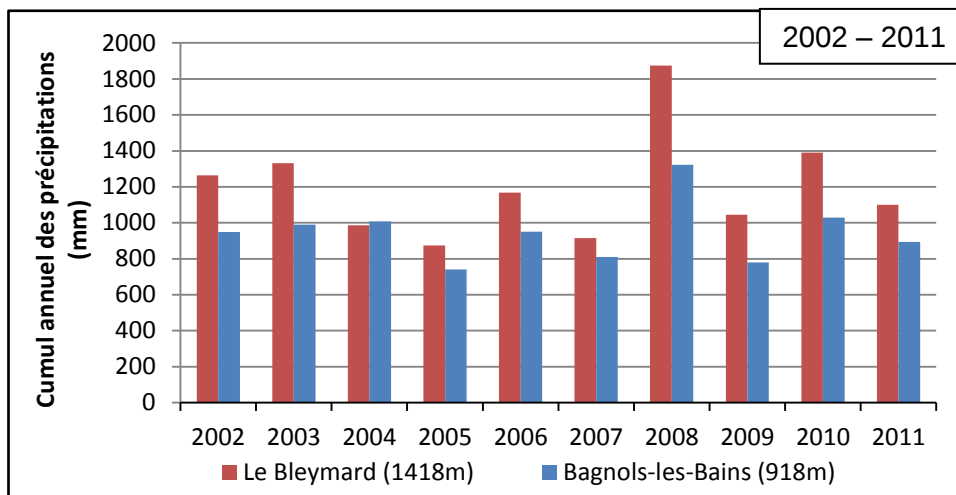


Illustration 6 : Cumul annuel des précipitations dans le secteur de Bagnols-les-Bains. Données Météo-France.

Les cumuls annuels des précipitations sont variables d'une année sur l'autre mais restent en moyenne proche de 950 mm/an sur la station thermique. Les précipitations sont plus importantes en altitude car elles atteignent 1195 mm/an au Bleymard (Illustration 7).

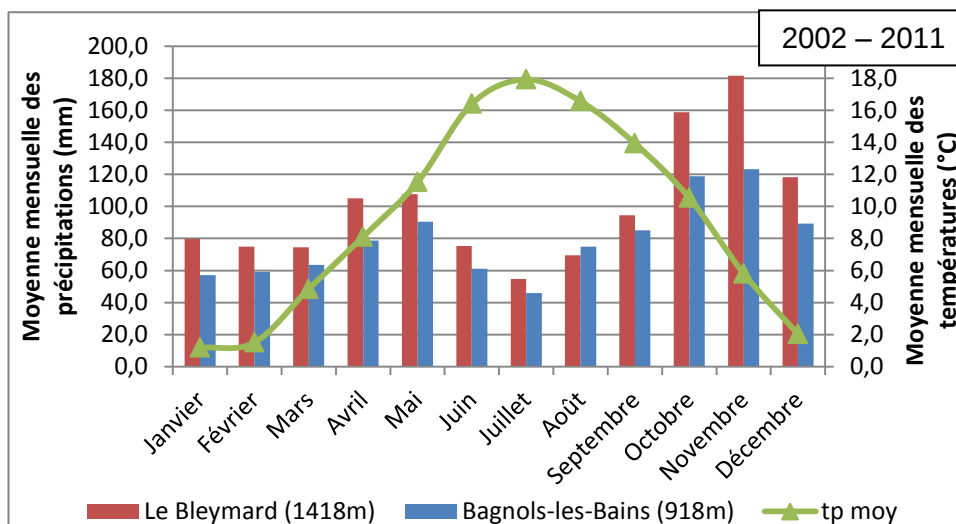


Illustration 7 : Moyenne mensuelle des précipitations dans le secteur de Bagnols-les-Bains

La répartition des pluies au cours d'une année est assez hétérogène. On note de fortes précipitations pendant la saison automnale, notamment aux mois d'octobre (120 mm) et novembre (120 mm) ainsi qu'au printemps, en avril et en mai (≈ 80 mm/mois). Ces périodes sont alternées avec des périodes moins humides, et notamment le mois de Juillet, particulièrement sec (≈ 45 mm). Ces conditions créent donc un climat modéré, relativement frais tout au long de l'année.

2.1.3. Contexte géologique

a) *Géologie régionale*

Bagnols-les-Bains est situé dans la partie sud du Massif Central, sur le flanc Nord des Cévennes. Plusieurs études ont été menées sur la géologie des massifs sédimentaires environnants, notamment en raison de leur richesse en gisements métallifères (Rouire, 1959), (Horon, et al., 1957). Dans le secteur de la zone hydrothermale concernée, on distingue les formations suivantes (Illustration 8):

- le socle métamorphique constitué des schistes des Cévennes qui s'étend vers l'Est. Il s'agit de micaschistes phylliteux à cordiérite-andalousite ;
- deux ensembles granitiques : au Nord-Ouest, le massif de la Margeride et au Sud-Est le Massif du Mont Lozère. Ces granites sont intrusifs dans la série métamorphique des schistes des Cévennes (Illustration 9) ;
- les séries sédimentaires du Lias et Dogger qui constituent les Causses de Montbel, du Bleymard, de Mende et de Sauveterre et qui couvrent par endroit en discordance les formations métamorphiques et les granites.

Les terrains sont affectés par un réseau d'accidents de directions principales NS et NW-SE ainsi que par des accidents secondaires de direction NE-SW.

Les schistes des Cévennes forment un ensemble sédimentaire métamorphique issu du métamorphisme hercynien (345 - 335 Ma) d'une épaisseur pouvant atteindre 1500 m. Ils sont caractérisés par des **micaschistes phylliteux à cordiérite-andalousite**, des micaschistes quartzeux et des gneiss à cordiérite, andalousite et grenat. Ils sont sombres, souvent tapissés d'oxydes de fer et la présence d'amandes de quartz est fréquente. Ces dernières sont parallèles à la schistosité, il ne s'agit pas de filons séquents la stratification (Briand, et al., 1993). Ces micaschistes sont souvent accompagnés de graphite et de pyrite (sulfures) en quantité importante, notamment vers le causse des Bondons (Illustration 8).

Les massifs cristallins dominant le village de Bagnols-les-Bains se sont mis en place entre 330 Ma (La Margeride) et 315 Ma (Le Mont-Lozère). Il s'agit de **granites à muscovite** et biotite avec plagioclases, feldspaths potassiques et tourmalines.

La couverture sédimentaire présente dans le secteur s'est déposée du Lias au Dogger et se compose de **dolomies et calcaires** essentiellement. Des témoins fossilisés

caractéristiques, comme des bélemnites peuvent être retrouvés dans les formations du Domérien.

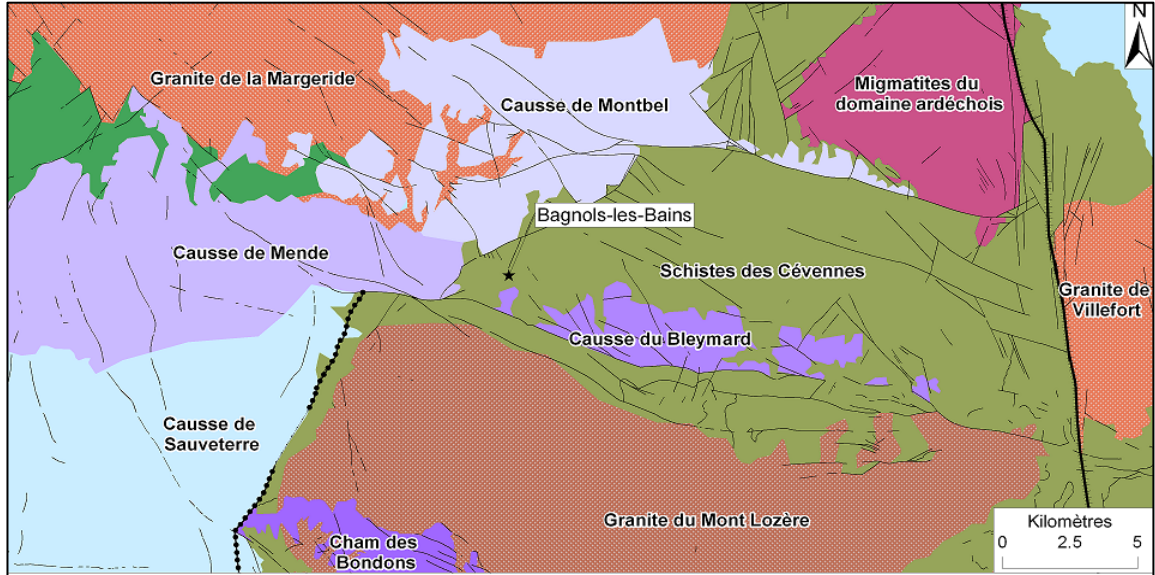


Illustration 8 : Situation de Bagnols-les-Bains dans le contexte géologique local¹

Les accidents majeurs que l'on rencontre aux environs de Bagnols-les-Bains sont les accidents de Villefort, d'Orcières et du Goulet. L'accident majeur de Villefort, de direction nord-sud, affecte les formations de socle. Il s'agit d'un décrochement senestre qui a fait avancer d'une dizaine de kilomètres le compartiment oriental vers le Nord lors de la phase terminale de l'orogénèse hercynienne (Rouire, 1959). La faille d'Orcières et la faille du Goulet, postérieures à la mise en place des batholites, ont joué en décrochements à la fin de la tectonique hercynienne. Ces dernières ont joué en failles inverses lors de la phase pyrénéenne avec abaissement de leur compartiment Nord. La faille du Goulet se scinde vers l'ouest en plusieurs failles satellites, dont la faille de Larzalier et de Mazas qui suit la direction WSW et plonge vers le sud au niveau du signal de l'aigle. Le schéma structural de la région est présenté en Annexe 2.

Une synthèse chronologique des événements ayant affecté la région est proposée dans la partie suivante.

¹ Traits noirs : Failles observées - Tirets noirs : Failles supposées - Trait épais : Faille décrochante senestre majeure - Points noirs : Faille normale majeure.

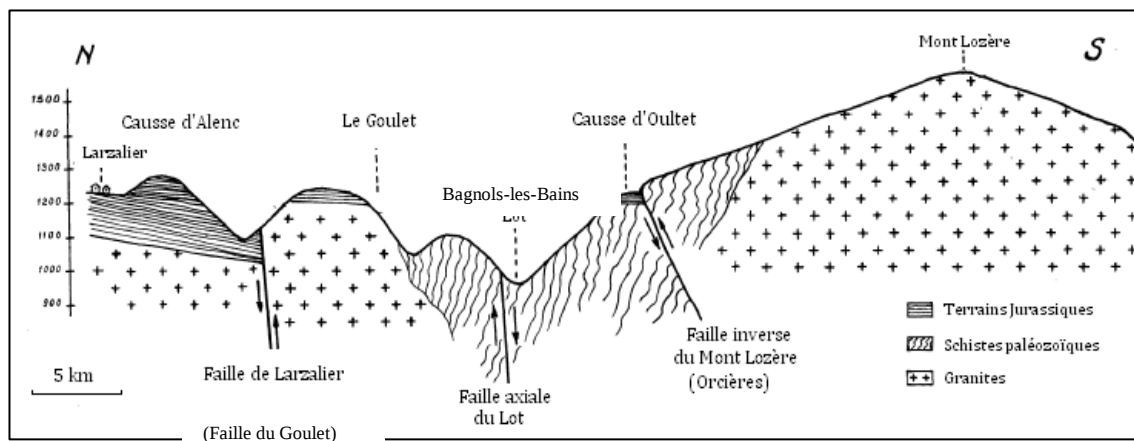


Illustration 9 : Coupe schématique des Cévennes d'après (Horon, et al., 1957), modifié.

b) Histoire géologique

Le Tableau 1 présente l'histoire géologique et tectonique de la région de Bagnols-les-Bains.

Formation	Accident	Age Ma	Phase	Direc- tion	Schéma conceptuel
Micaschistes phylliteux à cordiérite Andalousite		345 -	Métamorphisme haute pression orogénèse hercynienne	(Verdoux, 1997)	
	Décrochement de Villefort		Phase terminale de la tectonique hercynienne	N - S (Rouire, 1959)	
	Décrochements du Goulet et d' Orcières liés à l'intrusion des plutons		Phase terminale de la tectonique hercynienne	NW - SE (Rouire, 1959)	
Intrusion du granite de la Margeride		315 -	Extension tardihercynienne Carbonifère moyen	NW - SE (Verdoux, 1997)	
Intrusion du granite du Mont Lozère		315	Extension tardihercynienne Carbonifère supérieur	NE - SW (Faure, 1995)	

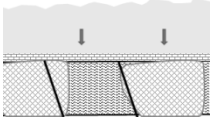
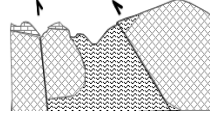
Formation	Accident	Age Ma	Phase	Direc- tion	Schéma conceptuel
Transgression marine, dépôts dolomies et calcaires			Trias - Jurassique inférieur	(Verdoux, 1997)	
Sédimentation des grands Causses (subsidence)			Distension Jurassique supérieur	(Verdoux, 1997)	
Emersion et érosion superficielle		135 - 53	Crétacé - Paléocène	(Verdoux, 1997)	
	Rejeux de la faille d' Orcières et du Goulet		Eocène supérieur	E-W (Rouire, 1959)	
	Grabens des Causses	34 - 23.5	Distension Oligocène	NNE - SSW (Rouire, 1959)	
	Rejeux des structures anciennes		Miocène (compression alpine)	(Rouire, 1959)	
		3.4	Volcanisme du Velay	(Bouchot, et al., 2005)	

Tableau 1 : Chronologie des phases tectoniques

c) Géologie locale

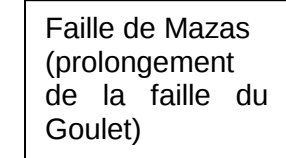
Le village de Bagnols-les-Bains est localisé dans la vallée du Lot sur des terrains métamorphiques, des micaschistes noirs très feuilletés (phylliteux) à cordiérite-andalousite. La biotite y est plus représentée que la muscovite et quelques filons de quartz sont localisés dans les plans de schistosité. Ils ont un faciès semi-lamelleux à grains fins et à l'éclat gris argenté dû à la présence de graphite (Verdoux, 1997). Ces séries métamorphiques sont de nature lithologique uniforme. Par endroits on trouve des filons de pegmatite à muscovite avec pyrite et pyrrothine (Desprez, 1962) (Illustration 10).

On note qu'au nord de la vallée du Lot, l'orientation des plans de schistosité est principalement N45 avec un pendage général vers le NW (*Annexe 3*). A l'Est et au Sud de Bagnols-les-Bains, l'orientation devient N180 avec un pendage vers l'ouest. Autour de la zone des émergences, l'orientation de la schistosité est variable de part la tectonique locale.

Sur le plan structural à l'échelle locale, deux principaux groupes de fractures ont été mis en évidence (*Annexe 3*) :

- N120 à N155, les plus importantes. Les sources thermales sont localisées à proximité d'une faille de cette famille, de direction N120.
- N30 à N60. Qui sont des fractures liées à l'intrusion des batholithes dans lesquelles on trouve de nombreux filons de quartz et de pegmatites (Verdoux, 1997).

Localement ces structures convergent vers un « nœud tectonique » localisé à 200m au SW de l'établissement thermal (*Annexe 3*). On rencontre dans la série micaschisteuse, au niveau des émergences, une zone broyée qui longe la faille N120. Il s'agit d'un niveau très tectonisé avec un pendage similaire à celui de la schistosité locale, aux alentours de 60S. Au sein de cette zone de nombreuses fissures ouvertes sont présentes. D'autres sont colmatées par des argiles.



23

2.1.4. Contexte hydrogéologique

a) Hydrogéologie régionale

La commune de Bagnols-les-Bains est située sur les berges du Lot, qui prend sa source à 9 km, en amont du village. Elle se trouve sur deux formations aquifères distinctes, un aquifère karstique jurassique au nord et l'entité métamorphique des schistes des Cévennes au Sud (Illustration 11).

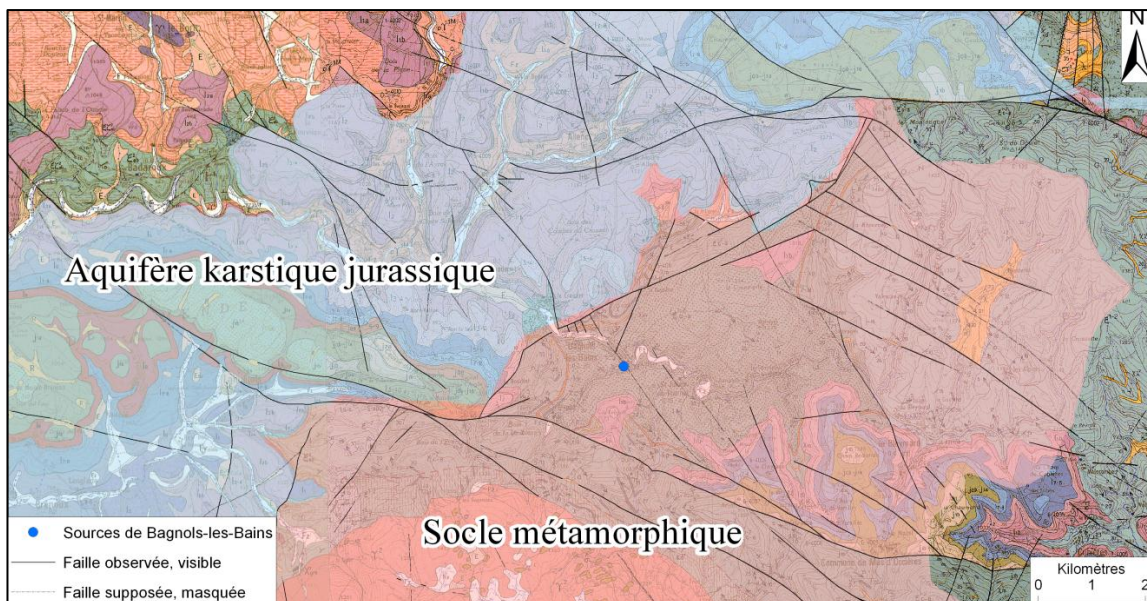


Illustration 11 : Entités hydrogéologiques du secteur de Bagnols-les-Bains d'après le Référentiel Hydrogéologique Français (Saplaïroles, et al., 2009)

Les aquifères de la région des causses du Bleymard et de Montbel constituent des unités karstiques sur lesquelles se trouvent des structures de surfaces caractéristiques : dolines, avens, pertes, gouffres... Ces formations renferment des nappes libres et ont un bon potentiel aquifère. Les eaux issues de ces massifs ont un faciès bicarbonaté calcique typique des formations calcaires.

Les schistes des Cévennes ainsi que les granites qui constituent les massifs du Mont Lozère et de la Margeride constituent un aquifère de socle à nappe libre. Ils présentent une partie superficielle d'altération caillouteuse arénisée qui assure une fonction capacitive grâce à la porosité des altérites. Les failles et les fractures qui recoupent ces terrains sont favorables aux circulations souterraines et assurent la fonction conductrice entre les compartiments. Cela donne naissance par endroit à des sources de débit régulier mais faible (inférieur à 1l/s). Les eaux issues de cette entité sont très peu minéralisées et présentent un faciès bicarbonaté calcique et sodique.

c) *Hydrogéologie locale*

Sur la commune de Bagnols-les-Bains, on trouve plusieurs types d'eaux :

- les eaux de surface provenant du Lot et du Rieufrech ;
- les eaux jaillissant d'une source froide et des émergences situées le long de la falaise de la montagne de la Pervenche ;
- les sources d'eau thermale qui sourdent de galeries situées sous l'établissement thermal.

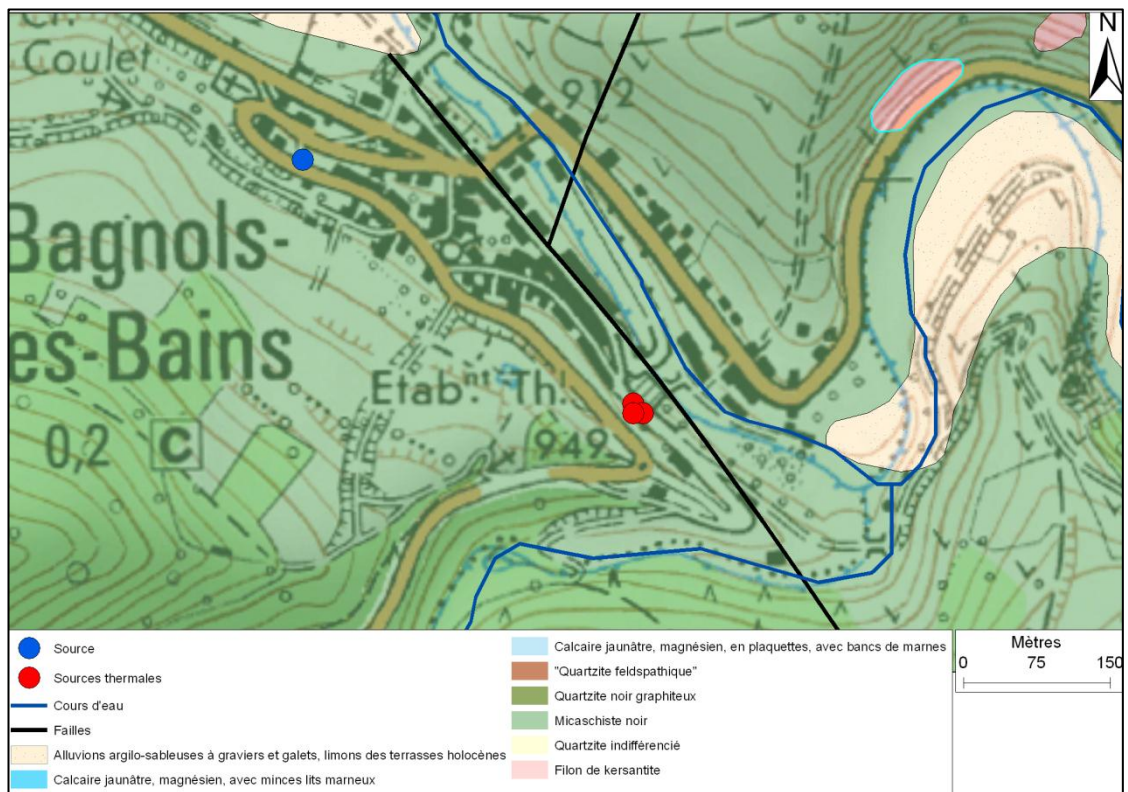


Illustration 12 : Les sources de la commune de Bagnols-les-Bains

Un travail de recherche mené par P. Verdoux en 1997 a montré que l'on peut distinguer ces eaux par leur domaine originel (Tableau 2) dans le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Annexe 5).

Eaux	Tp	Minéralisation	Type	Domaine
Lot	Froide	Faible (185 mg/l)	Bicarbonaté sodique	Eaux de surface
Source froide	Froide	Faible (45 mg/l)	Bicarbonaté et sulfaté calcique et sodique	Eaux des aquifères de socle (subsurface)
Eau thermale	Chaude	Moyenne (680 mg/l)	Bicarbonaté et sulfaté sodique	Eaux thermales de socle

Tableau 2 : Caractéristiques des eaux de Bagnols-les-Bains

Au total, une petite dizaine de sources thermales sont recensées sur la commune, leurs températures sont comprises entre 35.5 et 40.9°C. Le contexte hydrogéologique menant à l'émergence de ces sources se traduit par la présence conjuguée au sein des micaschistes d'une faille verticale de direction N120 longeant la falaise (Illustration 12) et d'une zone de fracturation intense correspondant à une zone broyée de même direction et de pendage 60S où des filons de quartz, pyrite et pegmatite se sont développés.

Le débit naturel de l'ensemble des sources thermales mesuré en 1990 par le professeur Naydenov était relativement constant et variait autour de 7 m³/h. Depuis cette date, aucun suivi des sources n'a été réalisé et le débit des émergences thermales peut avoir été perturbé suite à l'exploitation du gisement.

La source froide a une température moyenne de 9.6°C correspondant aux températures moyennes annuelles de Bagnols-les-Bains. Elle est alimentée par la nappe superficielle constituée par les altérites des micaschistes.

2.2. L'ACTIVITE THERMALE DE LA STATION

2.2.1. Historique de l'activité thermale (Naydénov, 1990)

Les sources thermales de Bagnols-les-Bains sont connues depuis l'âge romain pour leurs vertus thérapeutiques. En effet, Domitius, proconsul de Jules César aurait fait construire les bains que l'on surnommait alors « *Aquis Calidis* », suite à une victoire de l'armée romaine vers l'an 50 av JC.

Deux bassins situés dans des galeries sous l'établissement thermal sont des vestiges du temps où les soldats venaient s'y baigner pour guérir leurs blessures. De nombreuses cartes datant de l'empire romain, de 1721 et de 1764 mentionnant le nom de Bagnols-les-Bains ont été retrouvées.

Ensuite, l'établissement thermal est la propriété des seigneurs de Morangies jusqu'au XVI^{ème} siècle, c'est à cette période que la station connaît un essor important et que ses eaux atteignent une grande renommée à travers toute la région. Les bains sont décrits

par le Docteur Baldit en 1651 comme des thermes scindés en plusieurs parties : un premier bain « Tépidaire » (eau tiède), un second « Caldaire » (eau chaudes) et un dernier bain beaucoup plus chaud dont la vapeur sortait de la source. Ils pouvaient contenir jusqu'à 145 baigneurs.

Les bains furent améliorés et restaurés en 1837 par les propriétaires, suite à une importante fréquentation de la station thermale (1 600 à 1 800 curistes venaient s'y baigner chaque année). En 1857, la source à 38°C a été déclarée d'intérêt public par arrêté impérial.

L'établissement thermal fut rénové en 1957, cependant l'entretien ne fut pas satisfaisant et le nombre de curiste vint à chuter (200 à 300 / an). C'est en 1975 que la SELO (Société d'Economie Mixte de la Lozère) fut chargée de la gestion et de la rénovation de l'établissement. Désormais la station est ouverte de février à décembre et compte environ 1200 curistes par an (Illustration 14).

2.2.2. Nature de l'activité thermique

La station thermale de Bagnols-les-Bains est orientée selon les indications thérapeutiques suivantes :

- rhumatologie : arthroses, rhumatismes articulaires et inflammatoires (sauf poussées), scolioses et névralgies notamment cervico-trachiales.
- voies respiratoires : rhinites, bronchites, rhinopharyngites et sinusites.

Les eaux de Bagnols-les-Bains sont moyennement minéralisées (600 mg/l) et sont de type bicarbonaté et sulfaté sodique, avec une forte teneur en fluor (10.9 mg/l). La présence d'hydrogène sulfuré (H₂S) confère aux eaux minérales des propriétés antiseptiques et eutrophiques sur les muqueuses respiratoires et joue également un rôle dans la régénérescence des liquides intra-articulaires. Le fluor permet le traitement d'hypoacusies et les bicarbonates ont une action bénéfique dans la prise en charge des affections ORL.

2.2.3. Importance de l'activité thermique

La station thermale est ouverte de mi-février à fin décembre, l'équipe médicale de l'établissement est composée de quatre médecins, de kinésithérapeutes et d'hydrothérapeutes. Les cures proposées vont de 18 jours à des forfaits de détente d'une demi-journée. Les soins dispensés dans le centre thermal sont multiples et adaptés à chaque pathologie. En parallèle des cures thermales, un forfait « remise en forme » est le principal atout de l'établissement.



Illustration 13 : Etablissement thermal de Bagnols-les-Bains

L'évolution de la fréquentation de la station thermique pour les années 2001 à 2010 ainsi que la fréquentation nationale et régionale sont représentées sur le graphique suivant (Illustration 14).

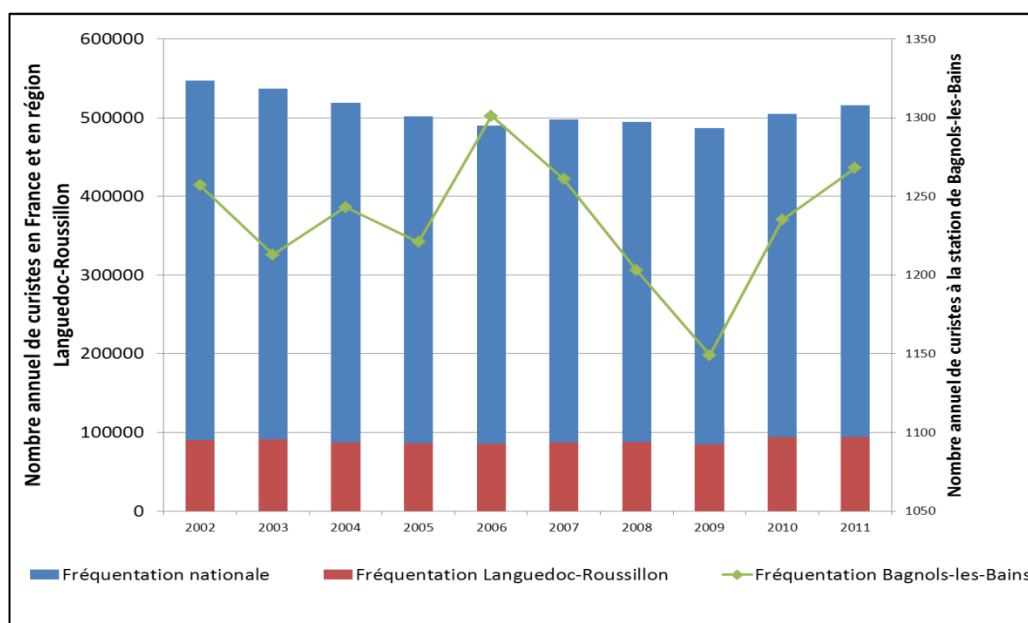


Illustration 14 : Evolution de l'activité thermique pour la période 2002 / 2011.

La fréquentation de la station thermale se situe aux alentours de 1250 curistes en 2002, et va atteindre jusqu'à 1300 curistes en 2006, année où la fréquentation nationale est au plus bas.

Une chute de la fréquentation vers 1150 curistes pour les années suivantes (2007 - 2009) est suivie d'un retour à la fréquentation de 2002 (1250 personnes) pour les deux dernières années (2010 - 2011).

En 2011, la station thermale de Bagnols-les-Bains était classée au 74^{ème} rang des stations les plus fréquentées de France.

3. La ressource en eau thermale de la station de Bagnols-les-Bains

3.1. LE GISEMENT D'EAU THERMO-MINERALE

3.1.1. Approche théorique de la notion de gisement

Le gisement d'eau minérale est défini comme l'ensemble de la structure géologique souterraine dans laquelle s'écoule le fluide thermal, depuis la zone d'alimentation jusqu'à la zone d'émergence, située au droit d'une zone géographique bien déterminée.

Dans un gisement d'eau thermale, on peut distinguer ainsi (Illustration 15) :

- **une aire d'alimentation où s'infiltrent les eaux de pluie** : il est maintenant reconnu que toutes les eaux minérales françaises ont une origine météorique et non juvénile (Blavoux, 1995);
- **un réseau d'infiltration et un réservoir en profondeur** : le réseau au travers duquel l'eau s'infiltré est généralement vaste en volume, mais la vitesse de circulation de l'eau y est lente. La Terre produisant de la chaleur selon un flux correspondant à la désintégration des radionucléides présents dans la croûte terrestre, elle contribue à réchauffer l'eau qui s'infiltré en profondeur. Ce flux de chaleur (de 1 à 2 microcalories par seconde et par centimètre carré en moyenne pour le globe) peut être localement plus fort dans les secteurs où se produit de l'activité magmatique en profondeur. Le gradient géothermique qui traduit ce flux est de l'ordre de **+3°C/100 m** en moyenne, ce qui permet d'estimer grossièrement la profondeur de l'eau qui s'infiltré depuis l'aire d'alimentation, en fonction de sa température. Lors de son transit en profondeur, l'eau acquiert également sa **minéralisation**, qui va dépendre de multiples paramètres affectant les interactions entre l'eau et la roche : conditions de température et de pression, nature des roches traversées, temps de contact, état d'équilibre de l'eau vis-à-vis des minéraux (sous-saturation, équilibre, sursaturation, etc...) ;
- **un axe de collecte et de drainage permettant la remontée de l'eau minérale** : selon la vitesse de remontée, les échanges avec le terrain encaissant sont variables. Cependant, l'expérience ayant montré que les pertes sont généralement faibles et que le régime est stationnaire, le législateur a instauré la stabilité en température comme une caractéristique essentielle des eaux minérales naturelles (Pouchan, 1995)
- durant la phase de remontée, l'eau minérale est le siège de phénomènes physico-chimiques qui vont modifier son état initial (Gadalia, 1995):
 - baisse de la pression qui va conduire à la détente des gaz présents dans l'eau, certains inertes du point de vue chimique (gaz rares, azote N₂) et d'autres, comme le gaz carbonique (CO₂) ou le sulfure d'hydrogène (H₂S), qui vont modifier les équilibres acido-basiques et/ou d'oxydoréduction ;

- oxydation, lors du contact avec l'atmosphère à l'émergence, ou par mélange avec des eaux superficielles plus riches en oxygène dissous ;
- variation de température, qui affecte les équilibres chimiques ;
- dissolution/précipitation de phases minérales, avec plusieurs origines possibles : l'eau profonde peut rencontrer en ascension des associations minérales nouvelles vis-à-vis desquelles elle peut-être sur ou sous-saturée, le dégazage de CO_2 peut entraîner une précipitation de carbonates, la baisse de température peut favoriser les dépôts de silice, etc... ;
- mélange avec des eaux plus superficielles.

Pour être complète, la compréhension d'un gisement d'eau minérale doit donc englober la connaissance de l'origine de l'eau et de sa minéralisation en profondeur, ainsi que de son parcours depuis les parties profondes jusqu'à l'émergence (Illustration 15).

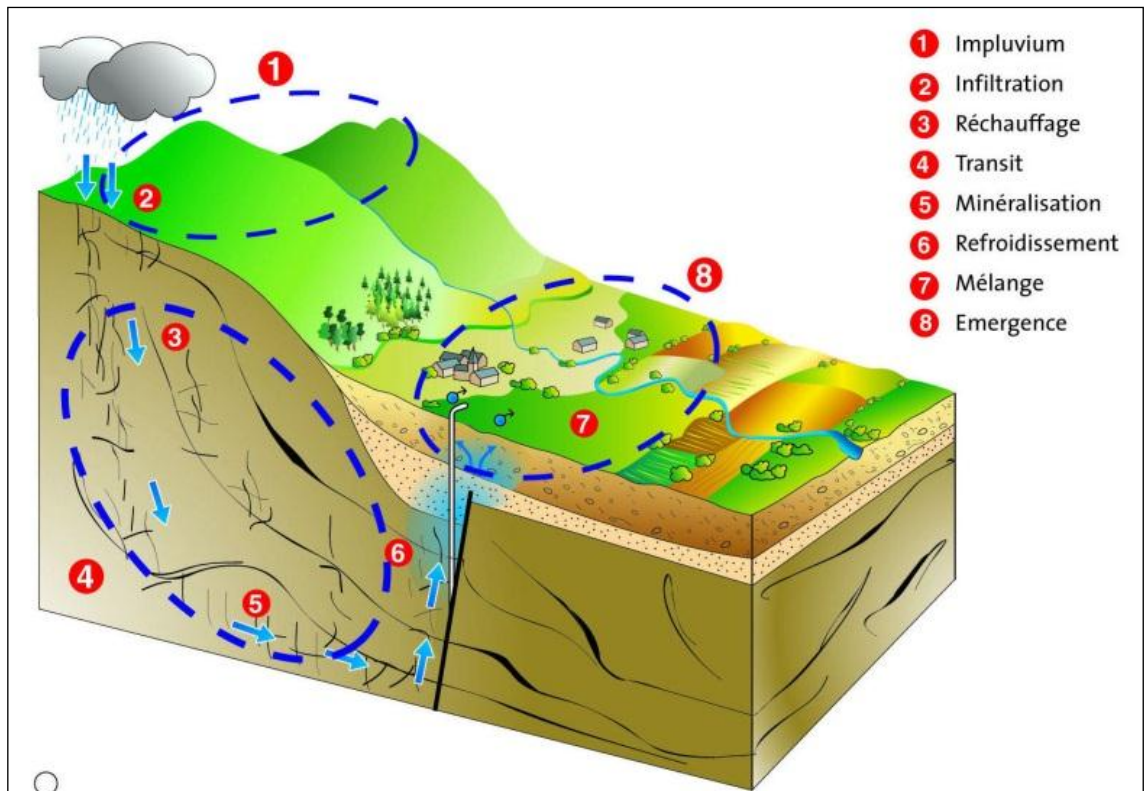


Illustration 15 : Schéma de principe du circuit hydrominéral

Associés à la notion de gisement, un certain nombre de concepts apparaissent qu'il est utile de définir :

- L'**âge de l'eau** est défini comme le temps de transit entre la zone d'infiltration des pluies et l'émergence ;
- L'**émergence** est le point sur la surface du sol correspondant au prolongement de l'axe de circulation de l'eau, mettant en relation les horizons géologiques

profonds et la surface. Soumises à de fortes températures et pressions dans le réservoir géothermal, les eaux remontent des profondeurs à la faveur de cet axe, par un phénomène d'advection sous conditions thermo-artésiennes (Ramahashay, 1996). La possibilité d'une montée rapide et d'émergence de l'eau implique cependant que **l'axe corresponde à une zone de fracturation ouverte**, le plus souvent lié à l'intersection d'au moins deux plans de faille ;

- la **température de l'eau à l'origine**, correspond à celle de l'aquifère profond faisant office de réservoir géothermal. Sa détermination a fait l'objet de recherches poussées ces dernières années, notamment dans le domaine de la géochimie, débouchant sur la caractérisation de « géothermomètres » (Pouchan, 1995). Un géothermomètre est un minéral ou une association de minéraux, permettant de déterminer la température ayant régné lors de leur formation. Le comportement d'un géothermomètre (dont la teneur au sein de l'eau thermale en son point d'émergence peut être déterminée par analyse), est contrôlé par le fait que la solubilité des minéraux et, par extension, les équilibres chimiques entre l'eau et sa roche encaissante, varient avec la température.

3.1.2. Le gisement de Bagnols-les-Bains

Le secteur de Bagnols-les-Bains se trouve sur l'entité métamorphique des schistes des Cévennes. Afin de recapter les sources thermales, les forages ont été multipliés autour de la zone historique des émergences et ont permis de mieux connaître la géométrie superficielle du gisement. Cependant, l'origine des eaux de Bagnols-les-Bains reste mal connue. Il existe plusieurs hypothèses de fonctionnement du gisement hydrothermal qui concernent la zone d'impluvium et la zone de transit. La première fait état d'une provenance profonde du fluide (Verdoux, 1997), qui acquiert sa minéralisation particulière auprès des dépôts riches en sulfures de l'époque tardi-varisque et la seconde hypothèse (Duboeuf, Inédit) indique que l'impluvium se situerait probablement au niveau du signal de l'Aigle, près du col de la Loubière. Ces deux hypothèses sont détaillées dans les paragraphes suivants.

a) La zone de l'impluvium

L'impluvium des eaux thermales de Bagnols-les-Bains est la zone la moins caractérisée parmi les zones constitutives du gisement. De toutes les études réalisées sur le site, seule une hypothèse est émise quant à la localisation de la zone de recharge. La synthèse qui émet la théorie d'une alimentation du gisement par des eaux d'origine atmosphérique a été réalisée par (Duboeuf, Inédit). D'après l'auteur, il semblerait que l'impluvium des eaux thermales de Bagnols-les-Bains soit situé au niveau du Signal de l'Aigle, près du Col de la Loubière (Illustration 16).

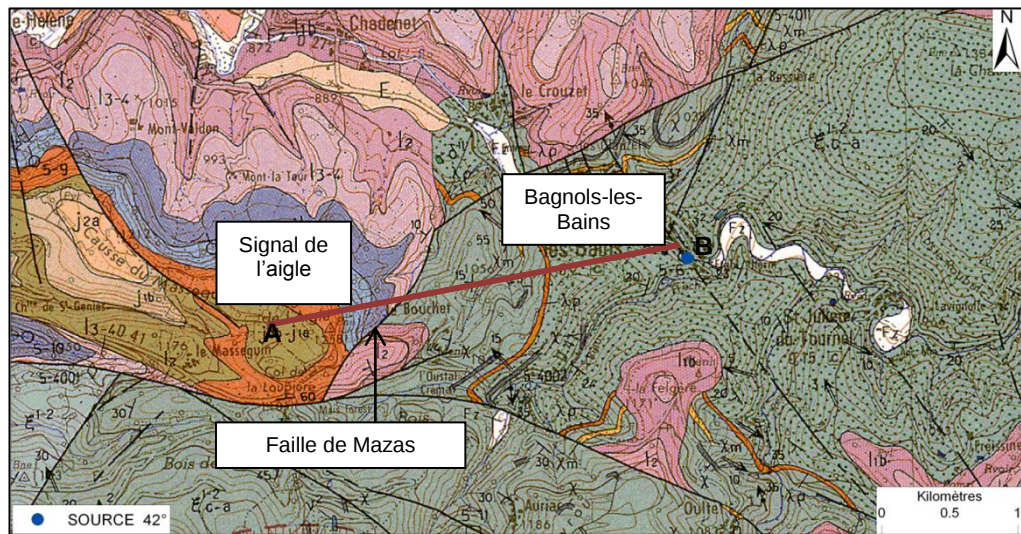


Illustration 16 : Localisation supposée de l'impluvium des eaux thermales de Bagnols-les-Bains avec position du trait de coupe

La faille de Mazas, qui correspond au prolongement local de la faille du Goulet, permettrait le transfert des eaux oxydantes vers la profondeur, une schématisation du fonctionnement du système est proposée Illustration 17. Le pendage de la faille proposé par l'auteur est cependant en contradiction avec les études antérieures (Rouire, 1959). Un approfondissement des connaissances sur la géométrie des structures de la zone est nécessaire pour permettre la compréhension du fonctionnement du système hydrothermal.

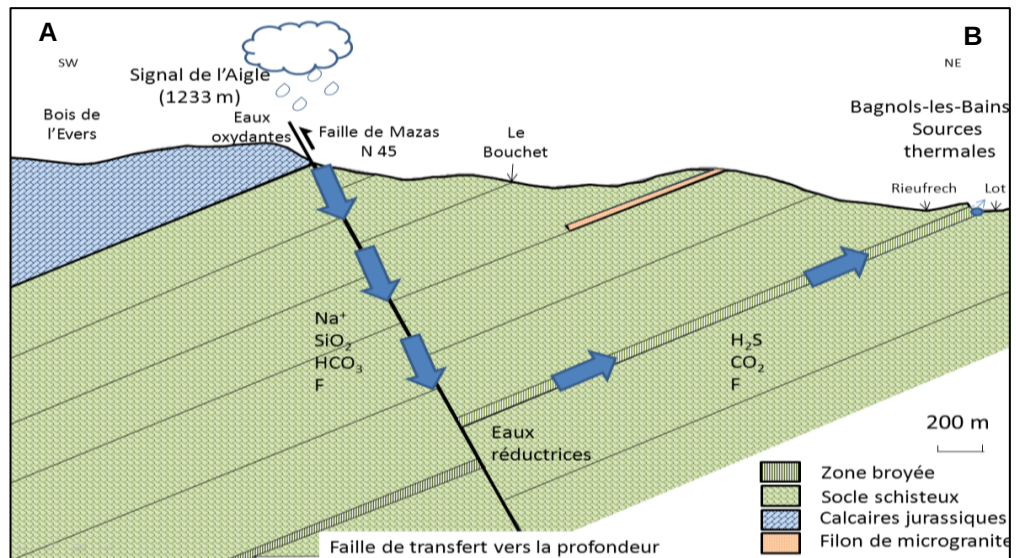


Illustration 17 : Hypothèse sur le fonctionnement hydrogéologique du système hydrothermal de Bagnols-les-Bains et sur la localisation de l'impluvium (Duboeuf, Inédit).

La localisation de l'impluvium des eaux thermales de Bagnols-les-Bains resteraient à préciser. Il serait également important de connaître l'occupation de la surface d'infiltration et d'engager des actions de partenariat avec les acteurs locaux s'il est démontré qu'une activité polluante est située sur l'impluvium. Pour parvenir à localiser cette zone, une étude des isotopes stables de l'eau est recommandée.

Une meilleure localisation du secteur de l'impluvium des eaux thermales représente une piste de progrès au titre de la démarche qualité pour la station thermale de Bagnols-les-Bains.

b) La zone de transit

D'après des observations géologiques réalisées autour de la zone d'émergence (ANTEA, 2003) et (Verdoux, 1997), la remontée du fluide thermal se fait via la zone broyée de direction N120 ; 60°S. Cette zone de micaschistes gris et noirs a subi une intense fracturation et renferme des fissures ouvertes qui permettent à l'eau de circuler. Les diagraphies de températures réalisées dans les ouvrages permettent d'affirmer qu'il s'agit de la couche productrice d'eau thermale (Illustration 18). Cette zone broyée contient également des filons de pegmatite et quartz à sulfures.

L'acquisition d'une partie de la minéralisation se fait certainement via des interactions eau/roche à haute température dans la zone fracturée permettant la remontée du fluide. Cette zone est riche en pyrite et éléments en traces (Li^+ ; F^- ; SiO_3^- ; Zn^{2+} ; As^-) caractéristiques des filons pegmatitiques. Ces filons proviennent de dépôts de minéralisations tardi-varisques associées à la circulation de fluides liés à l'intrusion des granites cévenols. Les eaux thermales de Bagnols-les-Bains empruntent ces mêmes couloirs de circulation et se chargent en éléments traces lors du contact avec les filons pegmatitiques.

D'après (Verdoux, 1997), cette zone peut être favorable, du point de vue structural à la mise en place d'une intrusion magmatique récente en profondeur qui serait susceptible d'amener un flux thermique nécessaire à la formation des eaux thermales. Cette hypothèse est soutenue par la présence du volcanisme du Velay (3.4 Ma) à seulement une trentaine de kilomètres de Bagnols-les-Bains.

Au vu des concentrations ioniques des eaux thermales, notamment en sodium, potassium et fluor et des températures, cela laisse présager un contact prolongé avec l'encaissant. Les eaux thermales de Bagnols-les-Bains ont donc probablement un temps de séjour long (supérieur à une soixantaine d'années). La datation des eaux par une analyse isotopique (BRGMa, 1993)² indique que ces eaux contiennent du tritium. Suite aux remarques précédentes, cela impliquerait qu'il existe des mélanges des eaux profondes thermales, avec des eaux superficielles.

² Référence a) en bibliographie.

Une tentative d'estimation de la température du réservoir profond à partir du géothermomètre au lithium a été réalisée et donne une valeur de 166°C. Cependant cette appréciation est sommaire et nécessite d'être recalculée à partir d'analyses chimiques fiables.

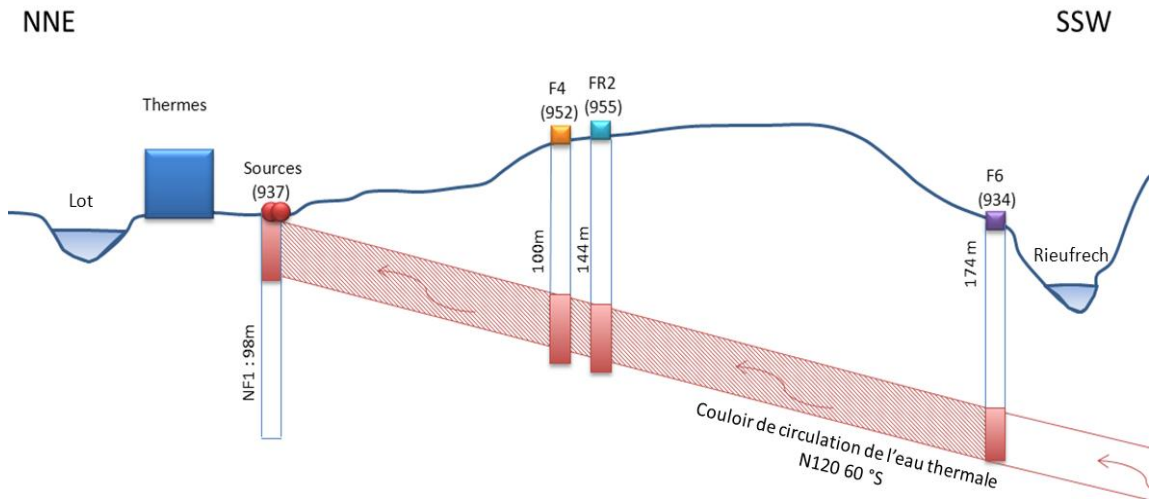


Illustration 18 : Schéma de remontée des eaux thermales (ANTEA modifié, 2003)

L'approfondissement des connaissances relatives au fluide thermal (temps de séjour, géothermomètre) pour mieux caractériser l'hydrosystème constitue une piste de progrès au titre de la démarche qualité pour la ressource thermique de Bagnols-les-Bains.

c) La zone des émergences

Le niveau lithologique producteur d'eau thermique est constitué d'une couche de micaschistes broyés et faillés recoupés de filons verticaux de pegmatites et quartz à sulfures (Cf. 3.1.2.b). Les venues ascendantes d'eau thermique se font principalement par la fracture d'orientation N120 et de pendage 60S. La zone des émergences est restreinte dans l'espace comme le montre l'illustration 19. La répartition des températures des ouvrages et des sources est représentative d'une faible superficie de survenue des eaux thermales. Les eaux thermales des sources et du forage d'exploitation notamment, ont une origine commune démontrée par leur composition physico-chimique. Les anciens ouvrages (FR1, FR2, FR3, F4 et F5) situés en périphérie de la zone d'émergence naturelle ont fourni des eaux plus froides et présentaient des minéralisations exprimant la présence de mélanges avec un autre type d'eau. Le système thermal est donc caractérisé par un réservoir commun profond et par une divergence des circulations à proximité de la surface, occasionnant des mélanges plus ou moins marqués en fonction des émergences. Les eaux thermales de Bagnols-les-Bains peuvent donc être soumises à de faibles mélanges qui peuvent être accentués par un rabattement trop important du niveau de la nappe au droit de la zone d'exploitation.

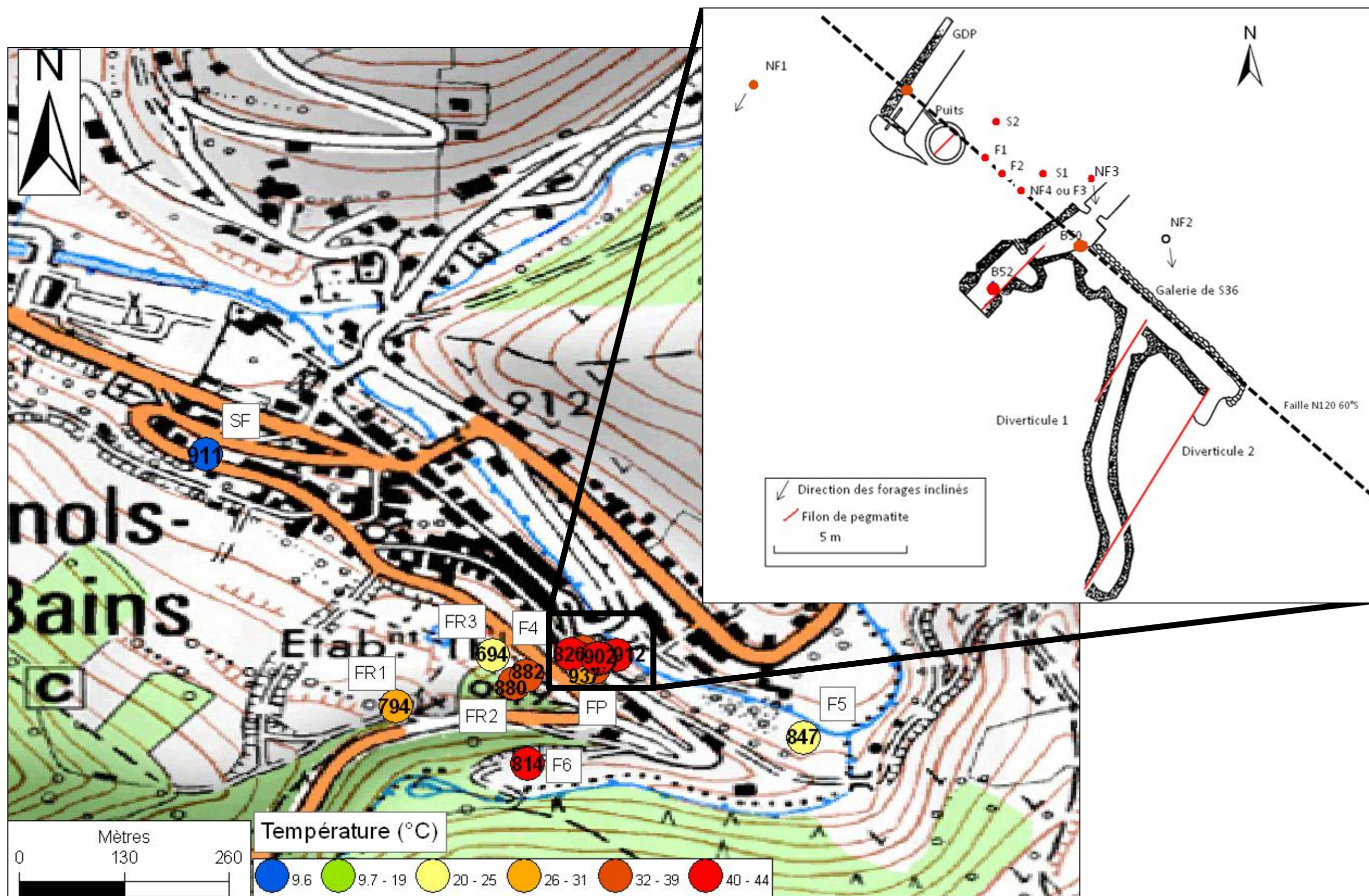


Illustration 19 : Situation des forages et sources sur la commune de Bagnols-les-Bains

La couleur des cercles représente la température d'émergence des eaux thermales. Le chiffre correspond à l'altitude de survenue des eaux dans les forages.

Historiquement, la station thermale de Bagnols-les-Bains a longtemps été confrontée à des problèmes de contamination bactérienne dans les ouvrages d'exploitation (consécutivement le puits thermal et NF4). Ces problèmes ont probablement été dus à « la zone de remblais située autour de l'ancien puits thermal » (Geotherma, 1995). L'illustration 19 présente la contiguïté des forages réalisés au niveau de la zone historique d'émergence des sources. Tous les ouvrages ont été rebouchés, excepté F6, l'actuel forage d'exploitation excentré par rapport à cette zone historique et F5.

3.2. LA RESSOURCE THERMALE EXPLOITEE

Il existe vingt-trois forages et sources qui ont pu être analysés sur la commune de Bagnols-les-Bains. La distinction entre chaque griffon est rarement faite dans les analyses de la bibliographie et les données sont généralement présentées pour les « sources réunies ». La description des ouvrages dont sont issues les analyses chimiques est donnée dans l'Annexe 4. La localisation du secteur des sources et du forage d'exploitation est présentée par l'illustration 20.

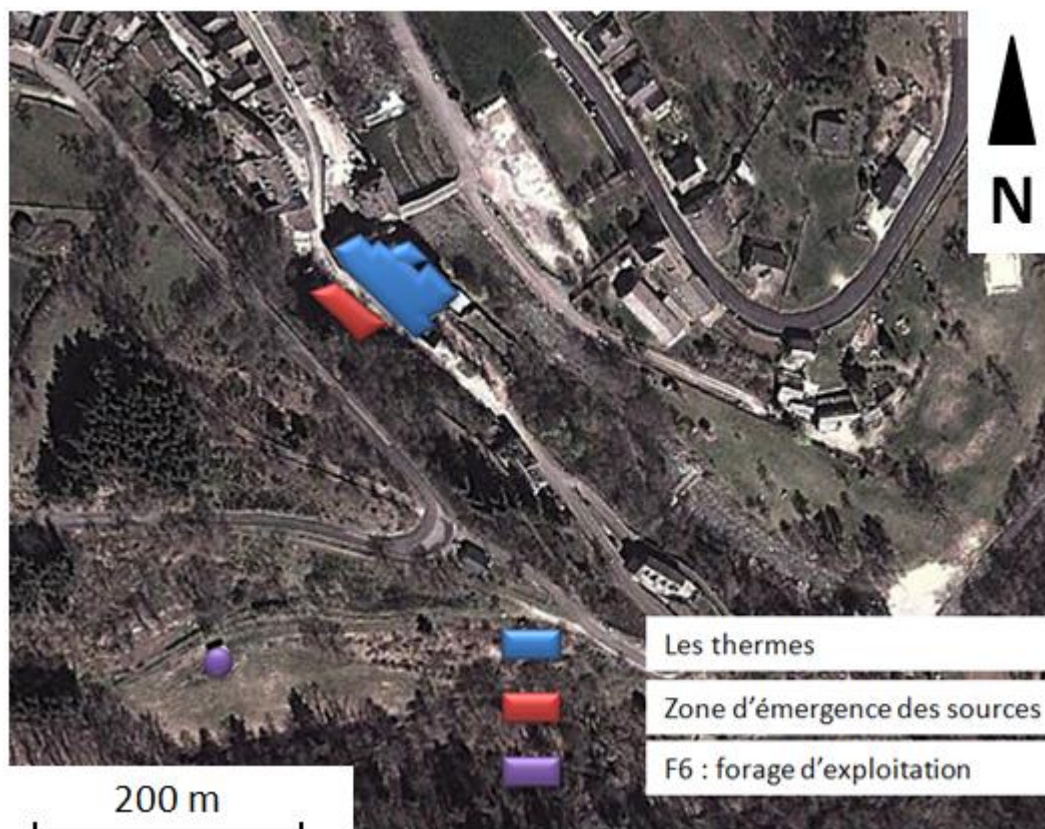


Illustration 20 : Vue aérienne des thermes et du forage d'exploitation (image Google Earth)

3.2.1. Caractérisation physico-chimique de la ressource

Les paragraphes suivants présentent synthétiquement les caractéristiques physico-chimiques des eaux thermales des sources et du forage d'exploitation afin d'avoir une appréciation globale sur le gisement et sur la stabilité naturelle de l'eau. Les données utilisées sont issues des travaux de (Verdoux, 1997), (Naydénov, 1990) et (Clanet, 1985).

a) Caractérisation physico-chimique des sources

Les eaux thermales issues des sources de Bagnols-les-Bains ont conservé les mêmes caractéristiques physico-chimiques depuis les premières analyses réalisées en 1854. Elles sont moyennement minéralisées (600mg/l), de conductivité proche de 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et elles présentent un **faciès bicarbonaté et sulfaté sodique** qui est le résultat de l'hydrolyse des roches du socle. Elles contiennent de l'hydrogène sulfuré (H_2S) qui en font une eau sulfurée sodique de type pyrénéen. Ces eaux sont des systèmes complexes, au sein desquels toute modification des paramètres (pression, température, gaz dissous et pH) perturbera la répartition des espèces du soufre (Ohayon-Courtès, 1995). Les spécificités physico-chimiques des sources sont présentées dans le Tableau 3, construit à partir des moyennes des mesures réalisées entre 1975 et 2000.

	$\mu\text{S}/\text{cm}$ (20°C)	°C		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
	Conduc- tivité	T	pH	HCO_3^-	SO_4^{--}	Cl^-	NO_3^-	Ca^{++}	Mg^{2+}	K^+	Na^+
GDP	822.2	40.6	7.0	247.9	161.6	22.8	0.1	16.0	1.9	11.4	183.8
B.50	890	42	7.2	339.5	162.3	24.5	0.6	20.0	1.6	12.5	193.5
B.52	773.3	40.1	7.2	181.2	144.8	20.4	0.3	13.1	1.4	11.6	171.3
S36	719.0	35.5	7.5	105.8	184.4	16.0	0.0	23.6	7.7	10.9	129.7

Tableau 3 : Physico-chimie des sources de Bagnols-les-Bains³

Les eaux thermales de Bagnols-les-Bains contiennent également du fluor (F^-) en quantités importantes. La balance ionique (BI) des analyses des eaux thermales a été calculée et montre une fiabilité relative des mesures. En effet, elle excède souvent 15% mais cela s'explique en grande partie par le manque des paramètres analysés. Des précautions sont donc nécessaires sur l'exploitation de ces données.

³ La signification des abréviations est donnée dans l'Annexe 4

- **La température**

Les sources thermales de Bagnols-les-Bains présentent des températures s'étalant de 35 à 42°C. Ces eaux sont qualifiées de mésothermales⁴, et les modalités d'acquisition de cette température ne sont pas connues. Des hypothèses relatives à ce domaine ont été formulées dans la partie 3.1.2b.

- **La conductivité**

La conductivité des sources thermales a conservé une relative stabilité ($\approx 800 \mu\text{S/cm}$) depuis 1961.

- **Le pH**

Le pH des sources thermales est proche de la neutralité, il est compris entre 7 et 7.5 ce qui rend le milieu favorable à la libération d'hydrogène sulfuré.

- **Le soufre**

L'hydrogène sulfuré (H_2S) est un élément capital dans la composition chimique des eaux thermales de Bagnols-les-Bains. Il s'agit d'une forme réduite, peu stable du soufre moléculaire, qui a pour propriété de maintenir l'eau à un potentiel réducteur. Sa présence, même en faible proportion permet également de limiter des proliférations bactériennes dans l'eau thermale. A la sortie des griffons, ce dernier s'échappe sous forme de gaz et donne à l'eau une odeur particulière. On trouve également dans les eaux thermales de Bagnols-les-Bains la forme oxydée du soufre : les sulfates SO_4^{2-} .

L'origine des sulfates et des sulfures a longtemps été discutée (Perollier, 1994), ils pourraient provenir de l'activité bactérienne et de l'altération de minéraux en profondeur. L'étude de la provenance de cette minéralisation est proposée dans la partie 3.2.2.

- **Le fluor**

Cet élément est, comme le soufre, un des agents thérapeutique des eaux thermales de Bagnols-les-Bains. Sa concentration varie autour de 10 mg/l. Elle permet le traitement d'hypoacousies.

⁴ Mésothermale : eau dont la température comprise entre 35 et 50°C

• Les gaz

Les gaz accompagnant l'eau à l'émergence dans la galerie du préfet se présentent avec les concentrations données dans le Tableau 4.

Gaz	Mol/L	%
Oxygène	$6.69.10^{-3}$	24.6%
Dioxyde de carbone	$1.73.10^{-3}$	0.63 %
Azote	$2.00.10^{-1}$	73.57 %
Argon	$3.09.10^{-3}$	1.13 %
Hélium	$1.50.10^{-5}$	0.006%
Méthane	$4.30.10^{-6}$	0.002 %
Ethane	$1.00.10^{-7}$	
Propane	$<1.60.10^{-8}$	
Hydrogène sulfuré	$<8.80.10^{-5}$	0.03%

Tableau 4 : Gaz à l'émergence des sources de la galerie du préfet (Clanet, 1985)

Cependant, l'étude des rapports Argon / Azote montre une contamination des prélèvements par l'air ambiant. De plus la présence d'oxygène (valeur > 1 %) affirme cette altération.

Les sources n'étant pas instrumentées, ni suivies régulièrement, l'estimation de la stabilité naturelle de ces émergences n'est pas réalisable pour la dernière décennie.

b) Caractérisation physico-chimique du forage F6

Les eaux exploitées par l'établissement thermal proviennent du forage « F6 ». Elles ont un faciès de type **bicarbonaté et sulfaté sodique** moyennement minéralisé (≈ 600 mg/l) (Tableau 5) et contiennent de l'hydrogène sulfuré.

Température			°C	41.4	
pH			Unité pH	7.02	
Conductivité à 25 °C			µS/cm	880	
<u>Anions</u>			<u>Cations</u>		
HCO ₃ ⁻	Mg/l	300	Na ⁺	Mg/l	180
SO ₄ ²⁻	Mg/l	140	Ca ²⁺	Mg/l	12
Cl ⁻	Mg/l	19	K ⁺	Mg/l	11
F ⁻	Mg/l	8.7	Mg ²⁺	Mg/l	1.2
H ₂ S	Mg/l	2.05			

Tableau 5 : Caractéristiques des eaux du forage F6⁵

⁵ Analyses issues du dossier de demande de déclaration d'utilité publique (Antea, 2001)

L'eau du forage présente les mêmes propriétés que celle des sources naturelles. Sa température est proche de 42°C et est neutre de toute contamination bactérienne.

L'évaluation de la stabilité des eaux de F6 est importante car les fluctuations de la composition chimique peuvent traduire un risque de contamination via des phénomènes de mélanges avec des eaux superficielles. Toute variation de la stabilité est un indicateur de la dégradation de la ressource et doit être considéré comme un signal d'alerte sanitaire (AFSSA, 2008). Une méthodologie de caractérisation de la stabilité décrite par l'AFSSA⁶ remplace la tolérance arbitraire de $\pm 10\%$ citées dans les arrêtés ministériels d'autorisation. Les nouveaux critères sont basés sur les caractéristiques essentielles d'une eau minérale (Tp, pH, CE, TAC, anions et cations dominants) et sur l'incertitude analytique de ces paramètres. Nous avons utilisé les deux méthodes pour caractériser la ressource thermale de Bagnols-les-Bains.

En l'absence de valeurs de référence (le forage F6 ne possède pas d'autorisation d'exploitation), l'analyse des données du contrôle réglementaire de l'ARS (Illustration 21) est basée sur les valeurs proposées dans le dossier DUP (Antea, 2001). Comme les eaux de Bagnols-les-Bains présentent une minéralisation moyenne (600 mg/l) seuls les paramètres généraux de température, pH, conductivité, titre alcalimétrique complet sont pris en compte, les analyses d'anions et cations pouvant présenter de très fortes incertitudes pour de faibles niveaux de concentration.

⁶ Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments

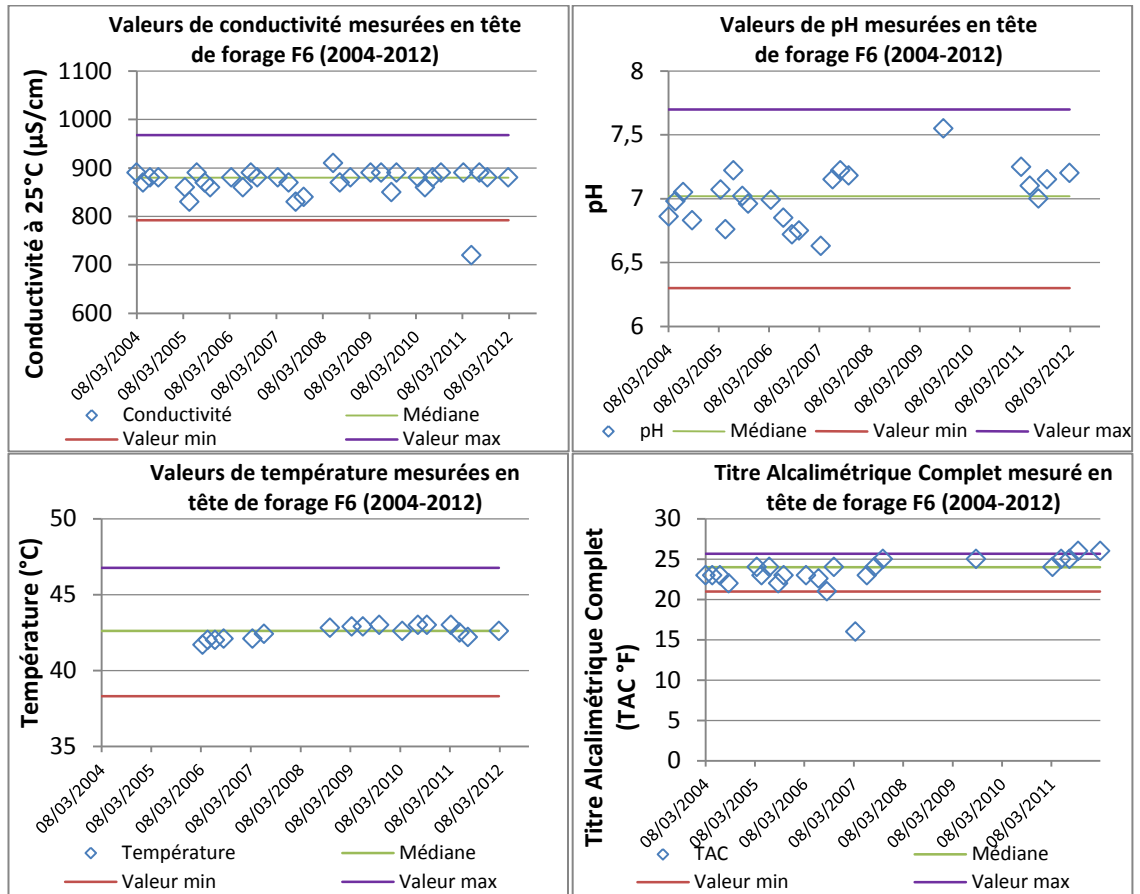


Illustration 21 : Valeurs du contrôle réglementaire pour le forage F6 et estimation de la stabilité avec la méthode (ARS)⁷

Pour les huit dernières années, les paramètres de conductivité, pH, TAC et température sont stables pour le forage F6 (Illustration 21). Toutes les valeurs sont comprises dans les bornes de stabilités imposées par la réglementation sur les eaux thermales. Seules quelques valeurs ponctuelles présentent une variation supérieure à 10 %, qui peuvent s'expliquer, notamment, par un défaut d'analyse lors des mesures en laboratoire.

Le graphique suivant (Illustration 22) permet d'apprécier la stabilité de l'eau thermique de Bagnols-les-Bains grâce à la méthode de l'AFSSA⁴. Le critère $S = 2$ spécifie qu'une valeur inférieure caractérise une eau stable et une valeur supérieure, une eau potentiellement soumise à un risque de contamination par des eaux superficielles.

⁷ Les valeurs min et max correspondent au $\pm 10\%$ nécessaires pour estimer la stabilité du fluide.

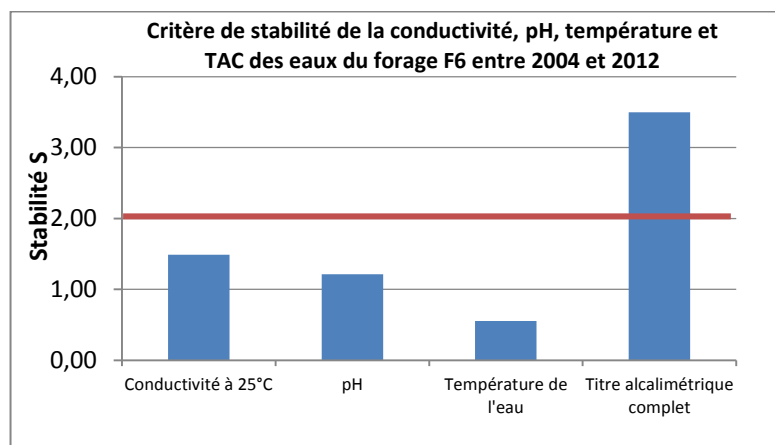


Illustration 22: Stabilité de l'eau thermique de Bagnols-les-Bains (méthode de l'AFSSA)

Pour les eaux de Bagnols-les-Bains, la stabilité des paramètres généraux présente un indice global inférieur à 2, qui montre que l'eau thermique est stable. Le dépassement de cette limite par le titre alcalimétrique complet peut s'expliquer par la présence d'espèces réduites du soufre (H_2S) favorisant les réactions d'oxydo-réduction qui rendent le TAC instable.

Au vu des concentrations en hydrogène sulfuré dans les eaux thermales, qui participent à la complexification du système, la moindre variation d'un paramètre (température, pression, pH ...) va perturber les équilibres chimiques et donc la stabilité. Cependant, il ne s'agit pas de dérive de la qualité de l'eau mais plutôt d'une perturbation ponctuelle de l'équilibre physico-chimique au sein du fluide.

c) Comparaison physico-chimique de la ressource

Afin de comprendre le fonctionnement du gisement au niveau de la zone d'émergence des comparaisons entre les paramètres physiques et chimiques des sources et des forages ont été réalisées. Ces données permettent d'illustrer les similitudes ou différences qui peuvent exister entre chaque émergence.

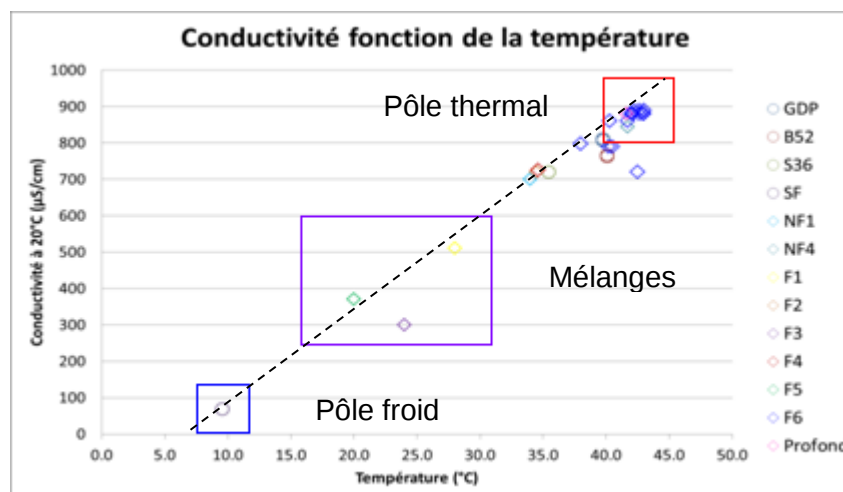
Au préalable, le calcul de la spéciation est nécessaire afin de connaître l'indice de saturation des éléments chimiques dans la phase aqueuse. Pour un minéral donné, les eaux présentant un indice de saturation inférieur à 0 seront sous saturées vis-à-vis du minéral considéré et auront tendance à favoriser sa dissolution. Au contraire, si l'indice de saturation est supérieur à 0, cela indique que l'eau est sursaturée pour cette phase minérale et des phénomènes de précipitation peuvent se produire. Dans le cas où l'indice de saturation est égal à 0 (± 0.1), la solution est à l'équilibre et aucun phénomène particulier n'est observable. Un aperçu de la spéciation des éléments est proposé dans le Tableau 6. Il indique quelles phases minérales auront tendance à précipiter ou à dissoudre. Les analyses chimiques présentant une balance ionique supérieure à $\pm 30\%$ ont été écartées.

	Silice amorphe	Calcite	Coésite	Cristobalite	Dolomite	Fluorite	Quartz (α)	Strontianite
B50								
B52								
F2								
F3								
F5								
NF1								
NF4								
F1								
GDP								
S2								
S36								
SF								
F6								

Tableau 6 : Tableau de la spéciation des phases minérales⁸

L'indice de saturation des eaux thermales vis-à-vis de la calcite et de la dolomie est inférieur à 0. L'eau va donc avoir tendance à dissoudre ces phases minérales. A l'inverse, le quartz α , pour lequel l'eau thermique présente un indice de saturation supérieur à 1 pourrait précipiter lors de la remontée dans le circuit hydrothermal. Cela explique l'impossibilité d'utiliser le géothermomètre de la silice pour estimer la température d'équilibration des eaux en profondeur. La coésite, la silice amorphe et la fluorite vont avoir tendance à rester à l'équilibre et ne pas subir de changement de phase car l'indice de saturation de l'eau thermique de Bagnols-les-Bains vis-à-vis de ces phases minérales est proche de 0.

Le graphique (Illustration 23) représente la conductivité en fonction de la température des eaux des ouvrages de Bagnols-les-Bains.

Illustration 23 : Température et conductivité des eaux de Bagnols-les-Bains⁹

⁸ En vert : dissolution ($IS < 0$) ; En bleu : équilibre ($IS = 0$) ; En rouge : précipitation ($IS > 0$) ; En blanc : Données insuffisantes.

Il existe une relation entre la conductivité et la température pour tous les sites (Illustration 23). On peut distinguer deux pôles : la source froide, qui n'appartient pas au gisement thermal de Bagnols-les-Bains et présente une faible minéralisation et une faible température, et le pôle thermal autour duquel sont concentrées toutes les sources chaudes, le forage F6 et le forage NF4 (ancien forage d'exploitation).

Les eaux des forages F3, F5 et F1 présentent une minéralisation et une température inférieure aux eaux thermales qui sont probablement dues à des mélanges en proportions plus ou moins importantes avec des eaux superficielles.

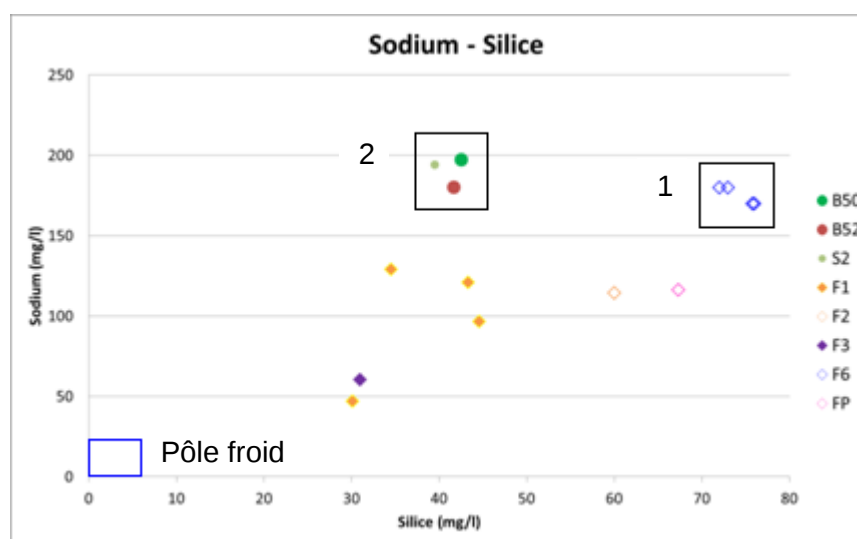


Illustration 24 : Concentrations sodium en fonction de la silice des eaux de Bagnols-les-Bains⁸

Le graphique binaire mettant en relation les concentrations de silice et de sodium (Illustration 24) permet de faire la distinction entre deux pôles :

- Pôle 1 : fortement chargé en silice (F6 ; F2 et FP) ;
- Pôle 2 : moins chargé en silice, mais de même concentration en sodium (Sources et F1).

L'indice de saturation des eaux vis-à-vis du quartz (SiO_2) est supérieur à 0 (Cf. Tableau 6) et les eaux thermales vont avoir tendance à précipiter lors de leurs remontées vers la surface. Cependant, cela n'explique pas l'écart de concentration en silice rencontré entre les deux pôles. La différence de pression entre le milieu profond (FP et F6) et les émergences proches de la surface (B50, B52 ...) pourrait être un facteur influençant la décharge du pôle 2 par rapport au pôle 1.

Il existe, au vu des remarques précédentes, une variabilité spatiale de la minéralisation des eaux de Bagnols-les-Bains. Cette approche chimique montre que le gisement

^{9 et 8} : Les graphes sont construits à partir des analyses de l'annexe 6.

thermal n'est pas isolé de manière certaine des eaux superficielles car on observe des mélanges entre deux pôles.

Ces pôles ont pu être identifiés grâce à la silice, la variabilité de minéralisation pouvant provenir d'une séparation des circuits lors de la remontée, où les eaux n'évoluent pas de la même façon et subissent un mélange différent avec des eaux d'origine superficielles.

3.2.2. Caractérisation isotopique de la ressource

• Le tritium

Le tritium est un isotope rare à l'état naturel qui a envahi l'atmosphère suite aux premiers essais nucléaires en 1952. L'arrêt de ces essais nucléaires aériens en 1963 a marqué le début de son déclin atmosphérique. L'eau, par contact avec l'air ambiant acquiert la composition en tritium de l'atmosphère lors de son infiltration, ce qui permet par la suite d'estimer le temps de séjour des eaux thermales. Plusieurs datations du fluide thermal ont été réalisées pour caractériser son temps de transit, depuis l'infiltration jusqu'à l'émergence. Les données sont présentées dans le Tableau 7.

Date	Rapport	Puits		Profond		B.50		B.52		F1	
		UT	Age	UT	Age	UT	Age	UT	Age	UT	Age
24/11/77	78-SGN-684-MCE	6 ± 2									
16/08/93	RR-39253-FR							3 ± 1			
16/08/93	RR-39253-FR									2 ± 1	
1994	N 1558 MON 95	2	> 40 ans	3	> 40 ans						
15/07/96	RR-39253-FR					6 ± 3					

Tableau 7 : Datation tritium des eaux thermales de Bagnols-les-Bains

Ces mesures mettent en évidence la présence d'un mélange entre une composante profonde exempte de tritium et une composante superficielle chargée de cet isotope. Le temps de transit des eaux thermales a été estimé aux alentours de 40 ans (BRGMA, 1993), mais il ne s'agit que de l'âge apparent du mélange. Les eaux profondes peuvent avoir un temps de séjour plus ancien (Cf. 3.1.2.b). La difficulté d'interprétation des données résulte ici du mélange entre des eaux anciennes et récentes.

• Le Soufre 34

Les analyses des isotopes ^{34}S permettent généralement de connaître l'origine des sulfates dans les eaux.

Les fortes teneurs en sulfates des eaux de Bagnols-les-Bains sont dues à l'oxydation des sulfures présents dans les filons de pegmatites et dans les fractures ouvertes ainsi

que de la pyrite et galène présentes dans l'encaissant altéré. Ce résultat est issu d'une analyse isotopique réalisée dans le cadre de la thèse de (Verdoux, 1997) qui a montré que le plomb présente la même signature isotopique pour les eaux thermales et les sulfures localisés dans les couloirs de circulation des eaux thermales (Annexe 7). Ces sulfures provenant de minéralisation de fluides tardi-varisques, seraient oxydés par les eaux thermales en profondeur et se retrouveraient aux émergences sous la forme de sulfates.

Les eaux thermales de Bagnols-les-Bains contiennent également de l'hydrogène sulfuré, qui est la forme réduite des sulfates. Pendant longtemps, l'origine de ces sulfures a été discutée et la thèse de l'origine bactérienne a été privilégiée, ce qui explique la multiplication de forages dans la partie superficielle du tronc thermal.

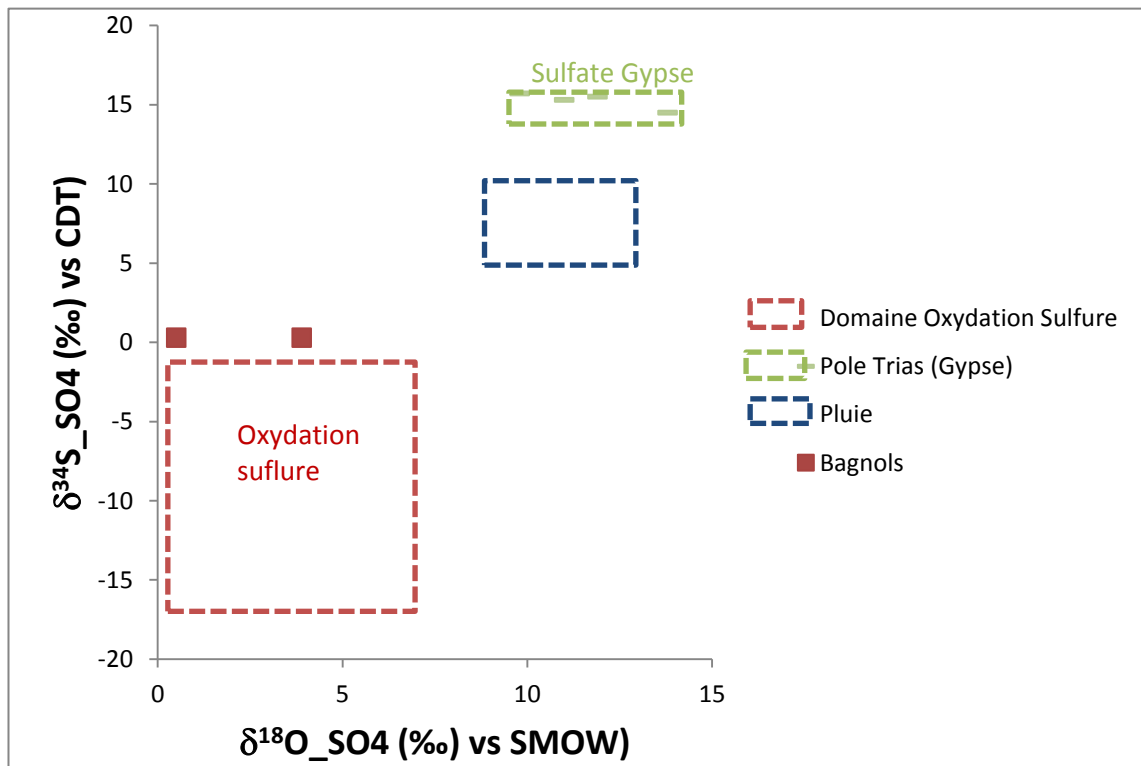


Illustration 25 : Diagramme $\delta^{34}\text{S}$ (SO₄) (‰ vs CDT) - $\delta^{18}\text{O}$ (SO₄) (‰ vs SMOW) des sulfates dans les eaux thermales de Bagnols-les-Bains.

La réinterprétation des données isotopiques (Illustration 25) mène à soutenir l'hypothèse d'une oxydation des sulfures (pyrites) présents dans les couloirs de circulation dans un premier temps (signature $\delta^{34}\text{S}$ (SO₄) entre le domaine d'oxydation des sulfures et le domaine de la pluie), puis réduction d'une partie des sulfates en hydrogène sulfuré par action bactérienne dans un second temps (signature $\delta^{34}\text{S}$ (SO₄) + 20 ‰ vs CDT) (Tableau 8).

Prélèvement	Date	^{34}S (SO ₄) ‰ VS CDT	^{18}O ‰ (SO ₄) VS SMOW	Rapport
F1	1993	+ 21.1 ‰		A 29632 /A
B52	1993	+ 20.8 ‰		A 29632 /A
Puits	1994	± 0.3 ‰	0.5 ± 0.3 ‰	N 1558 MON 94
FP	1994	± 0.3 ‰	3.9 ± 0.3 ‰	N 1558 MON 94
FP	1999	+ 22.7 ‰		A 29632 /A
F3	1999	+ 21.8 ± 0.3 ‰		A 29632 /A

Tableau 8 : ^{34}S (SO₄) ‰ et ^{18}O (SO₄) ‰ des eaux de Bagnols-les-Bains (Verdoux, 1997)

Les variations de teneurs en $\delta^{34}\text{S}$ (SO₄) vs CDT du forage profond (Annexe 7) sont à mettre en relation avec la position de l'ouvrage dans une zone probablement soumise à une variation des conditions d'oxydation du milieu. En effet la valeur enrichie à +20 ‰ traduit la bioréduction des sulfates par des bactéries sulfato-réductrices libérant de l'H₂S dans le milieu. La valeur proche de 0 ‰ correspond à la signature isotopique des schistes, mais indique également que les sulfates peuvent provenir de l'oxydation des sulfures, comme la pyrite par exemple. Le changement des conditions d'oxygénation au niveau de cet ouvrage sont probablement dues à son exploitation car la première mesure a été faite lors de sa création, et la seconde 5 ans plus tard, alors que ce forage était utilisé pour l'alimentation des piscines des thermes. Cette exploitation ayant pu provoquer l'intrusion d'oxygène dans le milieu.

• Le rapport du Strontium $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Le rapport isotopique du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) d'un fluide est relié au minéral avec lequel il a interagi. Les données disponibles pour les sources de Bagnols-les-Bains sont présentées dans le Tableau 9.

Source	Date	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	±	Sr en ppb
GDP	18/01/1996	0.72152	0.00002	211
GDP	14/02/1996	0.7215	0.00001	216
GDP	08/07/1996	0.72166	0.00001	221
B52	18/01/1996	0.72186	0.00003	219
B52	14/02/1996	0.72192	0.00003	211
B52	08/07/1996	0.72192	0.00003	243
NF4	14/02/1996	0.71978	0.00002	272
NF4	08/07/1996	0.7219	0.00001	247
S36	18/01/1996	0.72103	0.00001	238
SF	18/01/1996	0.71741	0.00002	32.7
Lot	18/01/1996	0.71498	0.00001	12.9
Lot	08/07/1996	0.7142	0.00002	17.4

Tableau 9 : Compositions isotopiques et concentrations en Sr des échantillons d'eau prélevées à Bagnols-les-Bains en 1996 (Verdoux, 1997)

Les faibles variations des mesures isotopiques en Sr des sources thermales montrent que les eaux de surface auraient peu d'influence sur le fluide thermal.

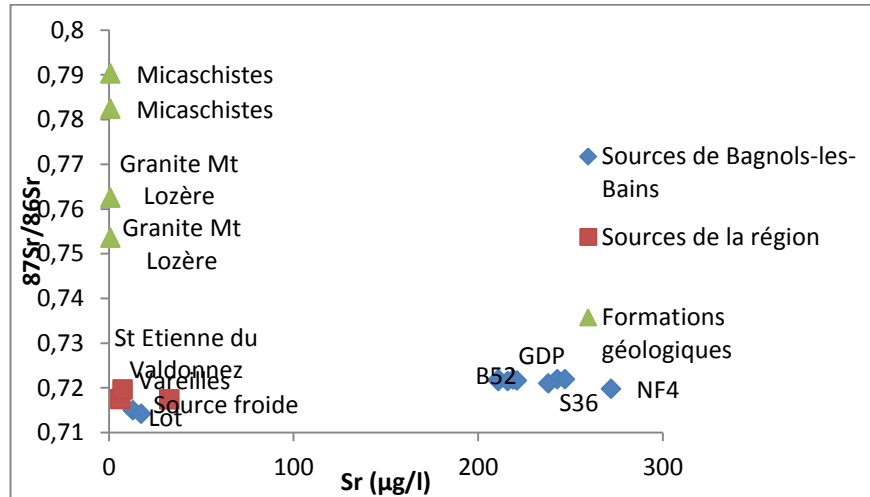


Illustration 26 : Rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs Sr des échantillons d'eau et de roche de la région (Verdoux, 1997)

L'illustration 26 replace les concentrations en strontium isotopique des sources thermales dans le contexte régional. Les granites du Mont Lozère ont une signature plus faible ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0.75$) que les micaschistes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0.785$) qui constituent l'encaissant des eaux thermales. Les sources de la région ont quant à elle, la même signature que les sources thermominérales mais sont nettement appauvries en Strontium. Le graphe présenté dans l'illustration 27 permet de mettre en évidence les mélanges lorsqu'ils existent. La différence entre les rapports isotopiques du strontium pour NF4 et B52 sont fortement marqués et l'on peut supposer que cette distinction est due à des interactions chimiques différentes lors de la remontée du fluide. La différence entre ces rapports peut s'expliquer par des contacts avec des contextes minéralogiques différents dans les circuits de remontée.

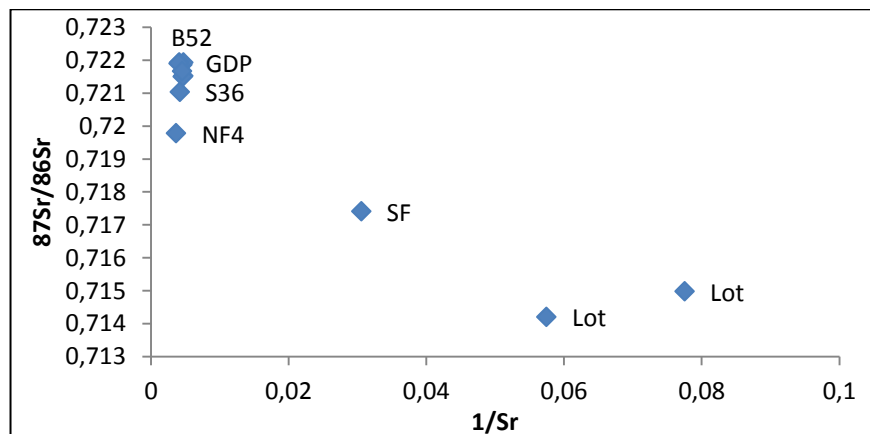


Illustration 27 : Rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $1/\text{Sr}$ des eaux de Bagnols-les-Bains (Verdoux, 1997)

3.3. LA MISE EN PRODUCTION – LES EQUIPEMENTS

3.3.1. Les captages existants

Un grand nombre de captages ont été réalisés sur le site de Bagnols-les-Bains (Annexe 4). Il ne subsiste de ces ouvrages que le forage F6 (Tableau 10) et le forage F5, les autres ayant été rebouchés par des entreprises spécialisées afin d'éviter les contaminations des eaux du gisement. F6 est actuellement en service et alimente les thermes. Il est situé à environ 250 m au sud-est de la zone historique, il se trouve au droit du tronc thermal et recoupe la zone productrice entre 120 et 137 m de profondeur pour une température de l'eau proche de 43°C.

Indice BSS	0863-5X-0041/F6
X (Lambert II e)	752929
Y (Lambert II e)	6378450
Z mNGF	955 ± 5

Tableau 10 : Caractéristiques de F6

Ce forage constitue le recaptage de la source 42°C (ou B50) déclarée d'intérêt public. Il a été réalisé selon la technique du marteau fond de trou en prenant les précautions d'usage en site thermal. Il a une profondeur de 174 m mais a été rebouché jusqu'à 144.80 m pour limiter l'infiltration d'eaux non thermales. La coupe technique du forage est donnée en Annexe 8 et la coupe géologique dans le Tableau 11.

La colonne de production, par rapport au sol est la suivante :

- De 0 à 114 m : Tubage en acier de 244 mm de diamètre ;
- De 0 à 118.6 m : Tubage en acier inoxydable de 168 mm de diamètre ;
- De 118.6 à 144.8 m : Trou de production libre de 222 mm ;
- De 144.8 à 174 m : Trou cimenté.

La cimentation annulaire a été réalisée entre 0 et 118.6 m ainsi qu'entre les deux tubages.

0 - 4 m	Terre végétale et colluvions schisteuses
4 - 75 m	Micaschistes gris sains, non fracturés
75 - 145 m	Alternance de micaschistes gris clair à sombre plus ou moins fissurés et fracturés. Fracture ouverte entre 120 et 121 m, 122 et 124 m et à 128 m

Tableau 11 : Coupe géologique du forage F6 (ANTEA, 2003)

D'un point de vue géologique, les terrains traversés correspondent à des formations de socle primaire, des schistes fracturés avec présence de filons minéralisés riches en pyrite.

• Les capacités de production de l'ouvrage

Plusieurs suivis de pompage ont été réalisés lors de la phase de reconnaissance en août 2000. Une connexion hydraulique avec l'ancien ouvrage d'exploitation F3 a été mise en évidence par des pompages d'essai. Malgré le colmatage des autres ouvrages, et dans le but de ne pas être confronté à des problèmes de contamination bactérienne comme ce fut le cas pour les anciens captages, il a été recommandé de ne pas abaisser le niveau piézométrique au-delà de 892 m NGF (niveau statique de l'ancien forage d'exploitation) et de conserver une marge de sécurité d'une dizaine de mètres. Le niveau statique actuel est proche de 926 m NGF.

Le régime d'exploitation demandé dans le dossier de demande d'autorisation d'exploitation, estimé grâce aux essais de pompage de 2000 est de 6.5 m³/h mais l'ouvrage subit depuis 2007 une chute de production. En 2011, le débit exploitable n'est plus que de 4 m³/h. Cette problématique est détaillée dans le paragraphe 3.4.1.

3.3.2. Les plateaux techniques de suivi d'exploitation

F6 est équipé d'un plateau technique comprenant un équipement de pompage et un équipement de mesures par télégestion. Il est protégé par un local technique qui constitue son périmètre sanitaire d'émergence (Illustration 28).



Illustration 28 : Local technique et périmètre sanitaire d'émergence du forage F6

Ce local de 10 m² a pour objectif d'éviter les intrusions et de supprimer le risque de déversement de produits polluants à proximité du captage pouvant entraîner une contamination de l'eau, et par la suite, un risque sanitaire. Il est divisé en deux parties : une zone « forage » qui a pour fonction directe la protection des environs immédiats du captage et une zone dédiée aux équipements électriques et au stockage des mesures.

F6 est équipé d'une pompe immergée de type GRUNDFOS 4" SP 821 N qui fonctionne en permanence, même en cas de fermeture de l'établissement thermal. Une pompe de secours est entreposée dans le local technique et est prête à l'emploi en cas d'incident. Le forage inclut également la colonne d'exhaure inox de $\varnothing$ 38 mm, deux tubes piézométriques en inox 316L en $\varnothing$ 25 mm et un capteur de pression (Annexe 10).

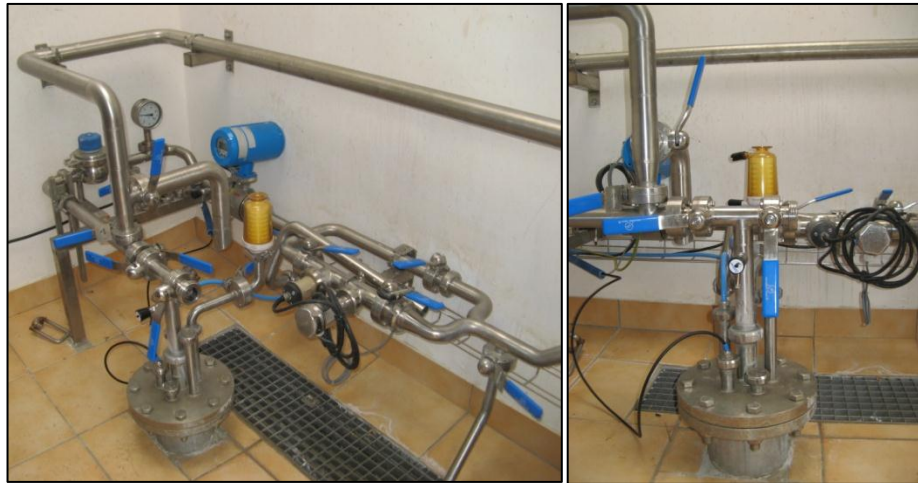


Illustration 29 : Tête de forage F6

La tête de puits est constituée d'une bride pleine équipée de réservations pour le passage de la colonne d'exhaure, des tubes piézométriques et d'un filtre antibactérien ainsi que de presse étoupes pour l'alimentation de la pompe et du capteur de pression (Illustration 29) (ANTEA, 2003).

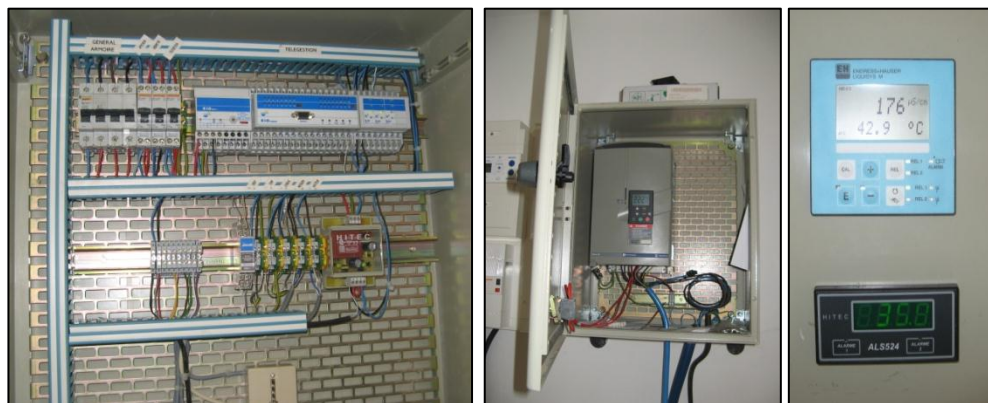


Illustration 30 : Appareillage du local dédié au stockage des mesures

La zone réservée aux équipements électriques comporte une centrale d'acquisition NAPAC reliée par câble téléphonique RTC, un compteur électrique, un boîtier de mesure de conductivité et de température (Illustration 30). Les données devraient être accessibles en temps réel et archivées toutes les 24 heures avec un pas de temps de 15 minutes.

3.3.3. Les sources existantes

Parmi les émergences thermales de Bagnols-les-Bains, trois sources sont répertoriées dans la BSS (Tableau 12).

	B50	B52	S36
Indice BSS	0863-5X0005/1	0863-5X-0006/S38	0863-5X-0007/S30
X (Llle)	705820	705830.4	705820.4
Y (Llle)	1945703	1945693.4	1945693.4
Z mNGF	930	937	937

Tableau 12: Indices BSS et coordonnées des sources

Les sources ne sont pas équipées et aucun suivi n'est assuré à leur égard. Des remontées gazeuses ont été observées historiquement au niveau des griffons du bassin 52. Comme indiqué précédemment, une petite dizaine de griffons ont été décrits dans la bibliographie mais seulement 2 ont pu être approchés, il s'agit des émergences localisées dans la galerie du préfet (Illustration 31).



Illustration 31 : Aménagement des sources de la galerie du préfet

Des minéralisations sur les parois de la galerie du préfet ont été observées (Illustration 32). Il s'agit surtout d'oxydes de fer et probablement de calcite.



Illustration 32 : Dépôts d'oxydes de fer et autres minéralisations dans la galerie du préfet

Ces sources sont difficiles d'accès mais la mise en place d'un suivi du débit de la source principale, située dans la galerie du préfet, serait intéressante pour connaître sa relation avec les eaux superficielles, connaître l'influence du pompage du forage d'exploitation et suivre l'évolution du gisement thermal.

L'instrumentation des sources par un appareillage de mesure du flux d'eau thermal, constitue une piste de progrès au titre de la démarche qualité pour la ressource thermique de la station de Bagnols-les-Bains.

3.3.4. Les conditions de transport et de stockage

• Transport

Il existe deux canalisations d'amenée des eaux aux thermes. Une canalisation calorifugée pour transporter le fluide au bassin de stockage et une autre utilisée pour la sanitation en boucle de la canalisation de transport.

La canalisation calorifugée est en inox 316L enterré en bordure de la route communale qui relie la parcelle où est localisé F6, avec les thermes (Illustration 33). La pression en tête de forage est de 2 bars, puis l'acheminement des eaux vers le bassin de stockage se fait par simple gravité. La tête de forage se trouve à la côte 955m NGF et le bassin de stockage des eaux thermales à 924 m NGF.

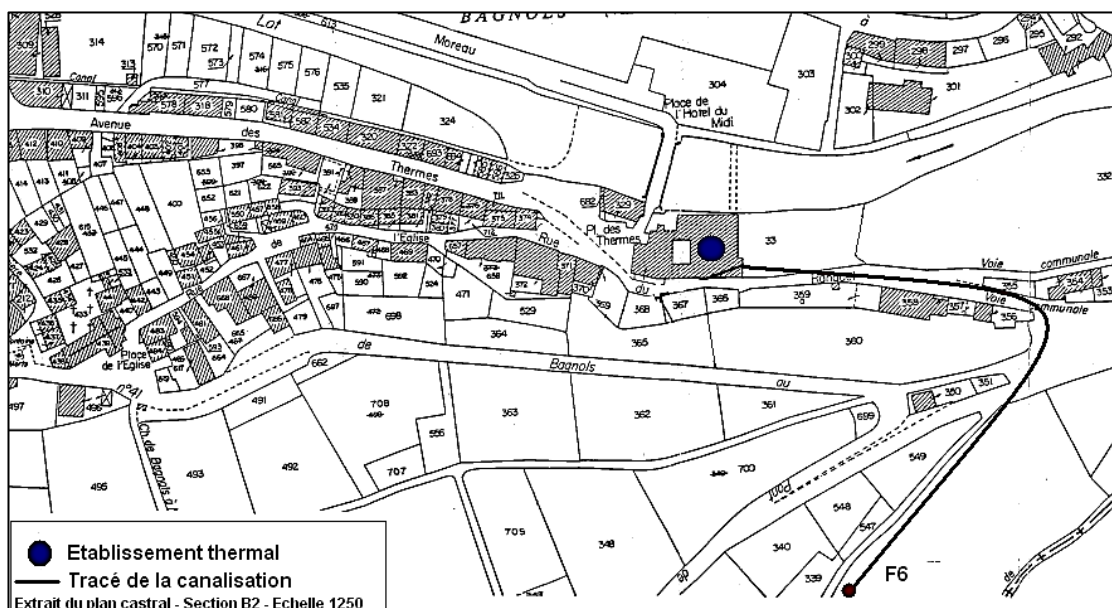


Illustration 33 : Tracé schématique de la canalisation de transport de l'eau thermale

La canalisation de sanitation est en inox 316L non calorifugée et le nettoyage en place se fait à 76°C. Il existe une canalisation PVC de décharge des eaux du forage en cas de travaux sur la canalisation menant aux thermes. Les rejets se feraient dans le Rieufrech situé à une vingtaine de mètres du local en cas de nécessité.

• Stockage

Les besoins en eau thermale de l'établissement sont évalués à 150 m³/jour en période d'utilisation de l'eau thermale maximale. Le forage ne fournissant que 4.5 m³/h, un stockage des eaux thermales est assuré par des cuves situées dans l'établissement et représente un point sensible, favorable au développement de colonies bactériennes. Le secteur ORL de l'établissement nécessite un débit de 1 m³/h sans stockage, pour une conservation optimale de la minéralisation spécifique et le respect des normes sanitaires. Les rejets de cette partie de l'établissement se font avec l'eau des sources thermales, directement dans le Lot. Pour le secteur de la rhumatologie, le débit nécessaire varie aux alentours de 8 à 12 m³/h provenant du bassin de stockage. Les rejets de ce secteur se font vers le réseau raccordé à la STEP.

Le bassin de stockage a une forme en L qui induit un mauvais brassage des eaux (Illustration 34) et donc favorise l'altération de ses propriétés thermales dans les zones d'hydraulicité réduite (ICS'eau, 2004). Il est réalisé en aval d'une déconnexion hydraulique qui empêche toute rétro-contamination bactérienne vers la tête de forage.

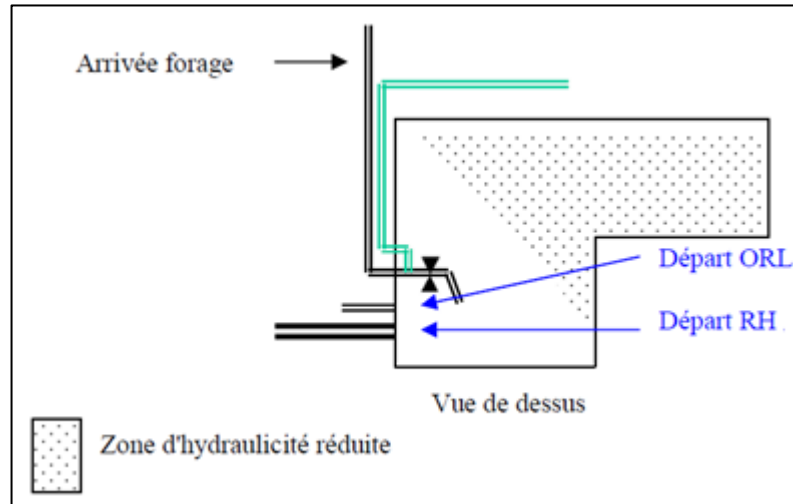


Illustration 34 : Schéma du bassin de stockage (ICS'eau, 2004)

Des travaux sont en cours au niveau de ce bassin et une réflexion est engagée sur l'utilisation de bâches souples pour protéger l'eau de l'oxydation, maintenir les gaz en solution et conserver les sulfures dissous dans l'eau.

3.4. LE SUIVI D'EXPLOITATION – LA MAINTENANCE

3.4.1. Le suivi d'exploitation de la ressource

Le suivi des paramètres de production de Bagnols-les-Bains est automatisé depuis 2003. Il est supposé être enregistré toutes les 24 heures au pas de temps d'une heure par un dispositif de sondes automatiques qui suivent le débit, la température, la conductivité, et la pression. Les données mesurées par les sondes sont transférées sur une centrale d'acquisition (Napac) raccordée au réseau téléphonique. Cependant, ces données ne sont pas stockées et le dysfonctionnement des sondes, notamment de conductivité est courant. Les données du suivi continu sont complétées par défaut par des contrôles ponctuels effectués par le technicien thermal et sont répertoriées dans un « carnet de forage ».

Les données de températures pour la période 2001-2012 sont présentées en Illustration 35. Depuis le début de l'exploitation du forage F6, la température des eaux thermales a augmenté sensiblement. Effectivement, dans la première partie (2001 – 2003), la température du fluide thermal croît rapidement de 39 à 41°C. Dans la seconde partie du graphique (2006 – 2012), l'augmentation est plus amortie mais évolue tout de même de 42 à 43°C. Les chutes locales de température observées en 2007 sont dues à des opérations de maintenance sur le forage. Une hypothèse sur l'origine de l'accroissement de la température est formulée dans la partie suivante.

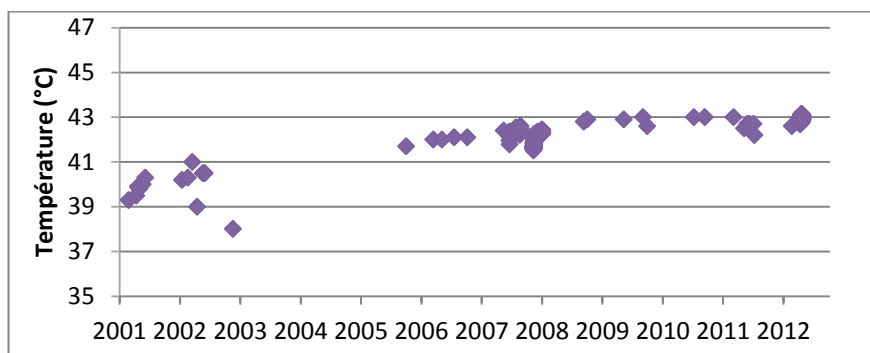
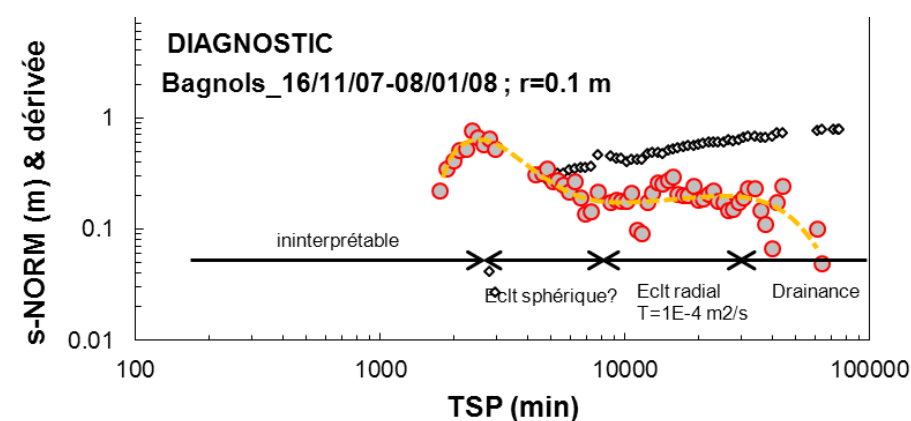
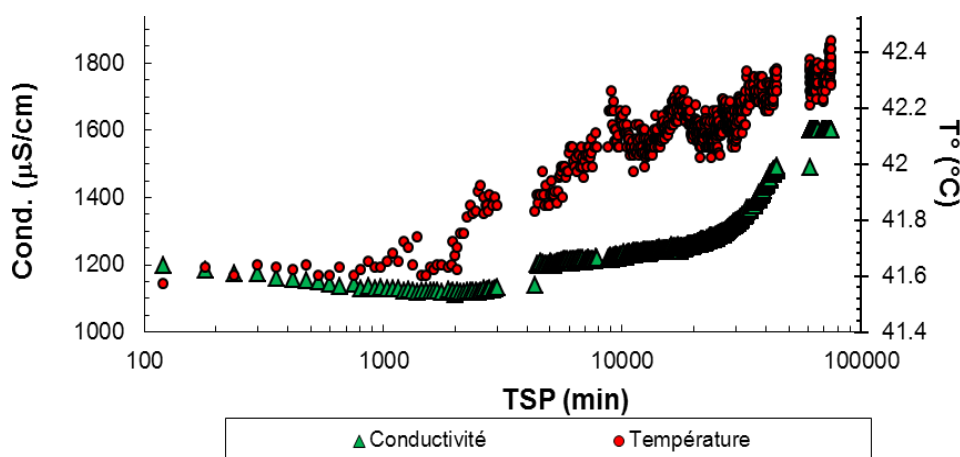


Illustration 35 : Chroniques de températures du forage F6 entre 2008 et 2012

Le suivi des autres paramètres d'exploitation a été récupéré pour de très courtes périodes relativement éloignées. La synthèse des données de suivi disponibles est présentée en Annexe 11.



Rabattement
du forage F6
du 16/11/07
au 08/01/08



Conductivité
(μS/cm)
Température
(°C)
du forage F6
du 16/11/07
au 08/01/08

Illustration 36 : Suivi des paramètres du forage F6 du 16/11/07 au 08/01/08

L'illustration 36 permet de visualiser l'interprétation d'un essai par pompage qui a été réalisé sur le forage F6 en fin d'année 2007, jusqu'au début 2008.

Analyse 2007 :

Cet essai par pompage réalisé sur le forage F6 est consécutif à un entretien de l'ouvrage par traitement chimique et brossage. Les données ont été récupérées auprès des thermes de Bagnols-les-Bains mais les conditions initiales ne sont pas connues. La première partie de la courbe du rabattement est donc inexploitable par manque d'information relative au contexte de l'essai.

L'analyse de la dérivée des rabattements présentée en illustration 36 montre la succession de trois régimes d'écoulement :

- Un régime d'écoulement sphérique qui traduit l'augmentation de la surface d'aquifère sollicitée ;
- Un régime d'écoulement radial qui indique que l'eau sollicitée se trouve à proximité de l'ouvrage d'exploitation ;
- L'apparition de phénomène de drainance qui, au bout d'un temps de pompage long, pourrait expliquer également les augmentations de température depuis le début de la mise en exploitation de F6.

Le forage F6 est soumis à un colmatage progressif du tubage d'exhaure de l'eau thermale qui peut mettre en danger l'alimentation des thermes. Le suivi de la température, de la conductivité et des rabattements montrent la présence de phénomènes de drainance depuis une couche semi-perméable. Ces phénomènes pourraient expliquer l'allure des courbes de températures en fonction du débit. En effet, le colmatage progressif empêche une forte sollicitation de l'aquifère, les débits exploités sont donc réduits et ont pour conséquence d'abaisser la charge dans l'aquifère. Cette baisse de charge limite alors les phénomènes de drainance depuis une couche semi-perméable, qui, jusqu'ici était probablement le biais d'infiltration d'eaux superficielles froides dans la zone productrice d'eau thermale.

Ces données sont insuffisantes pour permettre une interprétation complète du fonctionnement de la zone productrice autour du captage et ainsi aboutir sur des conclusions quant à la baisse de productivité de l'ouvrage.

Il apparaît donc essentiel de réaliser un suivi régulier des paramètres d'exploitation pour préciser les variations du niveau piézométrique de la nappe. L'interprétation des données issues de ce suivi devrait permettre de mieux comprendre le fonctionnement hydraulique du système, d'en tirer les conclusions qui s'imposent et, ainsi, de pérenniser l'activité thermale à Bagnols-les-Bains

Ce suivi des paramètres permettra, en outre, de mieux apprécier l'impact relatif de la recharge saisonnière sur le mode de fonctionnement du gisement.

Le suivi des paramètres d'exploitation récents sont présentés dans la partie suivante.

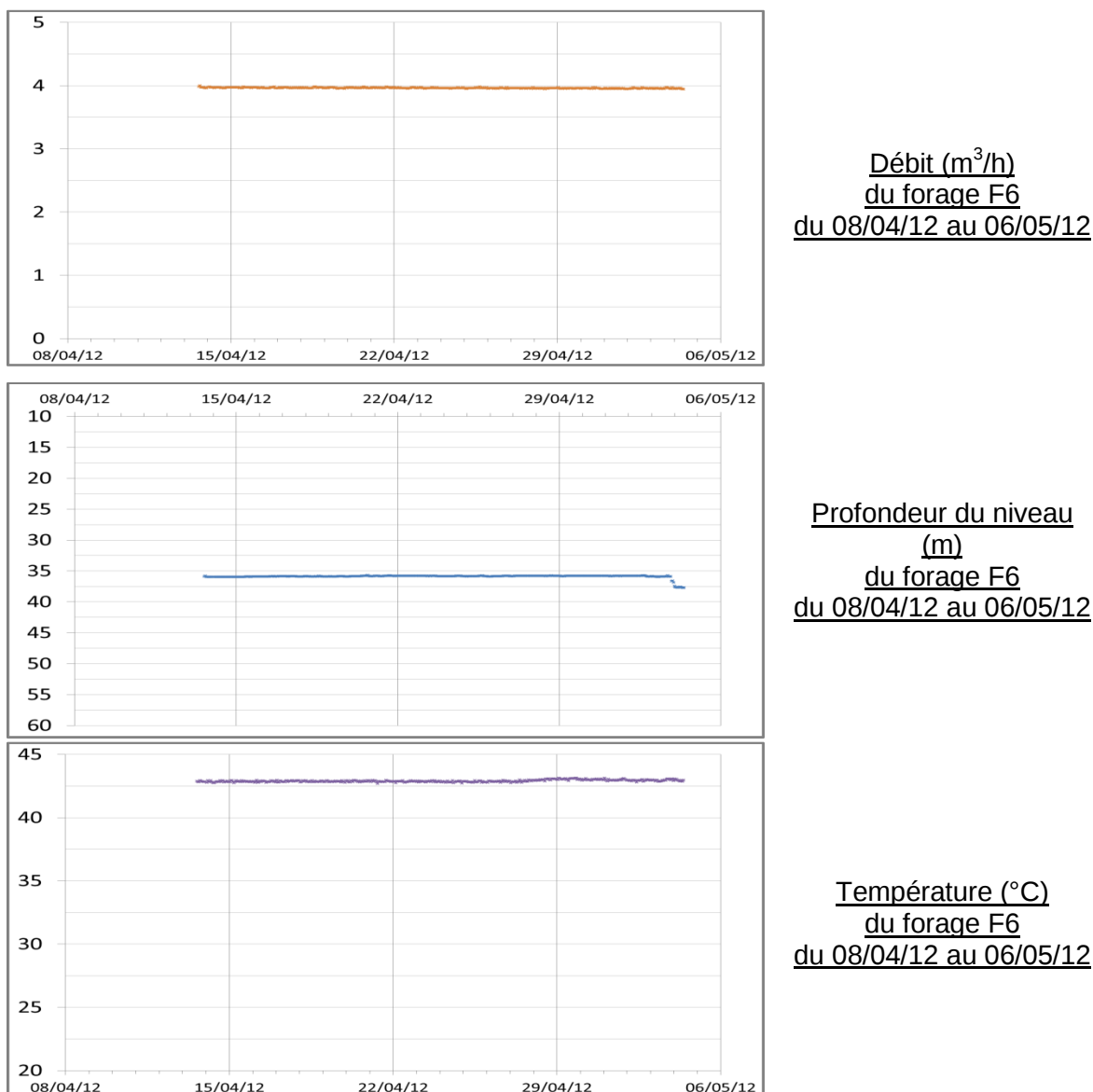


Illustration 37 : Suivi des paramètres du forage F6 du 08/04/12 au 06/05/12

Analyse 2012 (Illustration 37):

Les paramètres de production du forage thermique sont stables pour la période du 08/04/2012 au 06/05/12. Le débit reste quasiment inchangé (4 m³/h) et la profondeur de la nappe oscille autour de 35.8 m. La baisse brutale du rabattement le 03/05/2012 peut être due à une obstruction d'un conduit mineur d'apport d'eau thermique par des soulèvements de feuillets de micaschistes. La température est stable (42.9°C) mais présente une augmentation progressive de 0.3°C à partir du 27/05/2012.

Depuis la mise en route du forage F6, l'établissement est confronté à une dégradation de rendement. En effet, au début de son exploitation le débit spécifique du forage atteignait 6m³/h pour un rabattement d'à peine 8 m. En 2010, pour un débit de 5 m³/h, le rabattement était de l'ordre de 21.51 m. En 2012, le débit n'est plus que de 4m³/h et engendre un rabattement de 36 m. Cette chute de production n'est pas imputable au gisement car le potentiel thermal est toujours présent (Squarcioni, 2011). La baisse de productivité de F6 est probablement due à un phénomène de colmatage expliqué dans un rapport de la société Hydro-invest par la présence des « micaschistes qui constituent le réservoir thermal et qui ont la faculté de se débiter en feuillets, les rendant responsables de cette dégradation, ceci d'autant que les fluides circulent préférentiellement dans les zones tectonisées au niveau desquelles la roche est broyée et instable ». Un soufflage et une injection de liquide désinfectant sous pression ont été réalisés en 2007 et 2010 (Cf. 3.4.2). Il en a résulté de nettes améliorations des rendements (Annexe 8) qui s'estompent avec le temps.

Une meilleure gestion des données du suivi de la ressource (déstockage, archivage et traitement) constitue une piste de progrès au titre de la démarche qualité pour la ressource thermique de la station de Bagnols-les-Bains.

3.4.2. La maintenance des installations

La maintenance des installations d'exploitation de l'eau thermique de Bagnols-les-Bains est régulièrement effectuée. Pourtant le site ne possède pas de manuel des procédures qualités à appliquer. Le technicien des thermes est missionné en tant que correspondant qualité afin d'assurer le bon fonctionnement du site. Une présentation des différentes opérations menées sur le forage est proposée de façon chronologique sur l'illustration 38.

Concernant la maintenance des installations, la distinction entre le forage et les équipements d'exploitation est nécessaire et s'effectuent séparément.

• Maintenance du forage

Suite aux problèmes de dégradation des rendements du forage F6, et afin de retrouver de bonnes capacités de production d'eau thermique (Cf. 3.4.1), un soufflage a été réalisé en 2007, et une stimulation hydraulique par injection de solutions désinfectantes sous pression en 2010. Cependant, une baisse des rendements est toujours envisageable à court terme à cause de l'instabilité de la géométrie des arrivées d'eau dans le forage. Afin de remédier à cette problématique, un développement mécanique énergétique du forage a été proposé par Hydro-Invest.

Le changement de la pompe d'exploitation en 2010 s'est effectué dans ce contexte. Celle-ci initialement localisée à 55 m de profondeur risquait de se trouver au-dessus du point de bulle si le rabattement atteignait 47 m de profondeur. La productivité du forage étant insuffisante, cette profondeur critique a été atteinte pour un débit extrait de 4.05 m³/h. Elle a été changée et placée 18.29 m plus bas, à 73.47 m de profondeur.

La réalisation d'un forage de secours, permettant de sécuriser l'approvisionnement en eau thermale du site est à envisager au titre de la démarche qualité pour le site.

Un tel forage est d'autant plus important que F6 est sujet à des dysfonctionnements. Les phénomènes de colmatage observés et maîtrisés de manière partielle sur F6 représentent un risque non négligeable pour l'alimentation des thermes.

La réalisation d'un ouvrage de secours nécessite au préalable d'acquérir une meilleure connaissance hydrogéologique du site afin d'identifier des hypothèses d'implantation de forages consolidés.

La réalisation d'un forage de secours constitue une piste de progrès au titre de la démarche qualité pour la ressource thermale de la station de Bagnols-les-Bains.

• Maintenance des équipements d'exploitation

La sanitation des canalisations de transport s'effectue par un dispositif de nettoyage en place (NEP) qui injecte une solution désinfectante à 76°C. L'entretien des capteurs est réalisé ponctuellement ainsi que des vérifications du fonctionnement des appareils de mesures par contrôles manuels.

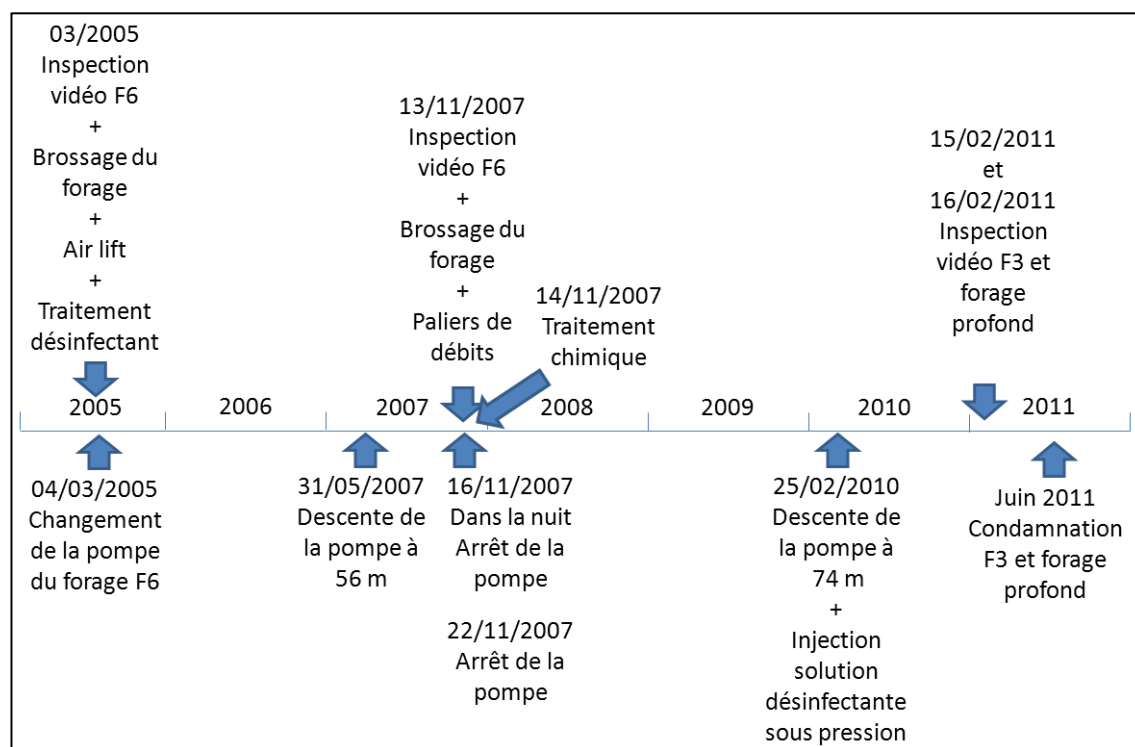


Illustration 38 : Chronologie des opérations de maintenance F6

3.5. LE CADRE REGLEMENTAIRE

3.5.1. Les autorisations existantes

La source thermale dite à 36°C (code BSS : 08365X0006) bénéficie d'une déclaration d'intérêt public datant du 23 novembre 1857 et d'une déclaration de périmètre de protection d'une superficie de 2 ha 56 datant du 26 août 1865 (Annexe 12).

L'établissement thermal ne dispose pas, à ce jour, d'une autorisation d'exploiter l'eau thermale du forage F6 à cause de problèmes de contamination bactérienne au niveau du bassin de stockage. Les installations et équipements du forage sont conformes à la réglementation et aucun problème n'est à signaler au niveau de la zone de production. L'établissement travaille à la régularisation de sa situation, il fonctionne, de manière transitoire, par dérogation des services sanitaires.

Dans le dossier de demande d'autorisation d'exploiter à l'émurgence le forage F6 (ANTEA, 2003) le débit d'exploitation maximum préconisé est de **6.5 m³/h** pour une exploitation 24h/24h. Cependant, il a été noté que des problèmes, notamment de colmatage du forage, empêchaient d'exploiter plus de 4 m³/h.

Le captage F6 se trouve en dehors du périmètre de protection, à environ 40 m de la limite sud (Illustration 39). Ce périmètre, au même titre que ceux instaurés au début du siècle dernier, n'a pas été défini sur la base de caractéristiques hydrogéologiques très précises mais, à l'époque, dans le but d'éviter plusieurs exploitations concurrentielles sur un même site (Cf. guerre des sources à Vichy).

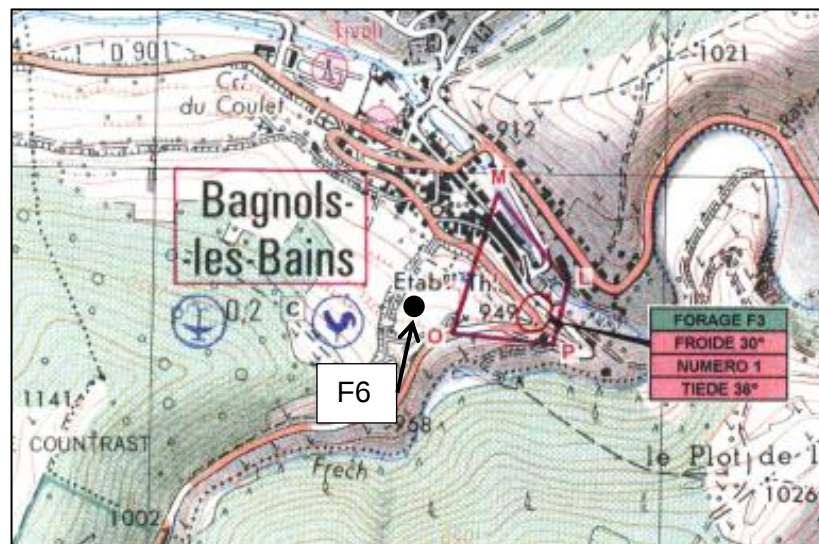


Illustration 39 : Limites du périmètre de protection établi au titre de la DIP (Vigouroux, 1999)

Compte tenu des nouvelles connaissances acquises sur le site, il serait judicieux de redéfinir les limites du périmètre de protection sur des critères scientifiques plus solides afin d'assurer une protection optimale du gisement thermal.

Le périmètre de protection qui existe (établi au titre de la DIP) représente un atout important pour le site de Bagnols-les-Bains. Cette procédure est en effet la seule disposition réglementaire applicable à l'heure actuelle pour protéger un gisement d'eau minérale. C'est une procédure très complexe à mettre en œuvre car elle nécessite une décision au plus haut niveau de l'Etat (Conseil d'Etat). Dans le cas présent il s'agirait simplement de redéfinir le périmètre en s'appuyant sur une décision qui existe déjà (la DIP).

L'actualisation de la protection établie par la DIP constitue une piste de progrès au titre de la démarche qualité pour la ressource thermale de Bagnols-les-Bains.

3.5.2. Les procédures en cours

A l'heure actuelle, il n'existe pas de procédure de demande d'exploitation en cours. La dernière en date est de 2003 et elle a été rejetée pour cause de problèmes de contaminations au niveau du bassin de stockage. Des travaux sont en cours de réalisation pour améliorer les conditions de stockage avec la mise en place probable d'un système de bâches souples, limitant l'oxygénation des eaux. Un nouveau dépôt de dossier de demande d'autorisation est envisagé une fois que les travaux seront terminés.

La régularisation de l'autorisation d'exploitation du forage F6 constitue une piste de progrès au titre de la démarche qualité pour la ressource thermale de Bagnols-les-Bains.

4. Conclusion

4.1. LA SITUATION ACTUELLE DE LA RESSOURCE THERMALE

L'état des lieux réalisé pour la station de Bagnols-les-Bains permet de préciser les points suivants :

- concernant les **connaissances du gisement** et du système hydrothermal, l'absence de données sur les isotopes stables de l'eau ne permet pas de localiser de façon précise l'impluvium des eaux thermales. La localisation de la zone d'infiltration est pourtant importante pour préserver au mieux la qualité de la ressource thermale. En effet, une activité anthropique ou agricole est susceptible d'occasionner une pollution pouvant se retrouver à l'émergence des eaux thermales, comme des pesticides par exemple. Les hypothèses issues de l'analyse géologique laissent présager que l'impluvium se situe à proximité du signal de l'Aigle, au sud-ouest de Bagnols-les-Bains. Il convient de rester vigilant sur les activités qui se développent dans cette zone et de mener des études sur les isotopes stables de l'eau, afin de caractériser précisément les lieux d'infiltration. Suite à cette localisation, des actions de partenariat avec les acteurs concernés sont recommandées afin de garantir la pérennité de la qualité des eaux thermales. Des mesures isotopiques au strontium et plomb ont permis de déterminer que le fluide a une circulation profonde. Le temps de transit des eaux au sein du système est estimé supérieur à 60 ans par une datation au tritium, qui montre en outre, la présence de mélanges avec des eaux superficielles. La température d'équilibration en profondeur reste inconnue ;
concernant la connaissance du **fluide thermal**, les données disponibles montrent qu'il s'agit d'eaux bicarbonatées et sulfatées sodiques avec des teneurs importantes en hydrogène sulfuré et fluor. Les teneurs en H_2S et SO_4 sont liées au processus d'oxydation des sulfures localisés dans les failles permettant la circulation de l'eau thermale. Ces eaux, par leur nature sulfurée, présentent des variations sensibles de compositions liées à la spéciation du soufre. La minéralisation et la température de l'eau varient en fonction des sources (35.5 à 42°C). Ces faibles variations s'expliquent par la présence d'un réservoir commun profond et par la diversification des voies de circulation à proximité de la surface, occasionnant des mélanges différents en fonction des émergences. L'étude de la minéralisation des eaux thermales laisse envisager la présence d'un pôle avec un long temps de séjour (supérieur à celui proposé par l'analyse tritium) mélangé avec un pôle représenté par les eaux d'origine superficielle. Les données du contrôle réglementaire ont permis d'attester de la stabilité des paramètres suivis. On notera cependant que les éléments suivis ne sont pas très nombreux et qu'en conséquence on ne dispose que d'une appréciation relative de la conservation de la physico-chimie du fluide. Toutefois, le forage présente une très bonne qualité bactériologique ;
concernant les **conditions d'exploitation** de la ressource, aucun problème de contamination n'est rencontré sur le forage exploité. Cependant, l'ancienne zone d'exploitation étant touchée par un développement bactérien, des précautions sont nécessaires afin de ne pas inverser les gradients hydrauliques au sein de l'aquifère et ainsi, provoquer l'arrivée de germes bactériens. Antea a recommandé à ce sujet

de ne pas abaisser le niveau du forage au-delà de 892 mNGF (soit 58 m de profondeur). Il est conseillé de suivre cette recommandation. Concernant les modalités d'exploitation du gisement thermal, le pompage en continu tout au long de l'année pose le problème de renouvellement de la ressource. Une baisse de la production de l'ouvrage depuis sa mise en service ainsi que la mise en évidence d'un colmatage répétitif font de F6 un forage fragile, représentant un risque quant à la sécurité d'approvisionnement des thermes. De plus il n'existe pas d'alternative de secours en cas d'avarie sur le forage F6. Il est donc conseillé de travailler à la réalisation d'un ouvrage de secours ;

- concernant **le suivi d'exploitation** de la ressource, le site est correctement équipé. Cependant, des dysfonctionnements sur le capteur de pression et sur la sonde de conductivité sont récurrents. La récupération et l'archivage des données sont rares, et il est donc difficile de juger du bon fonctionnement de l'exploitation. Les quelques données récupérées ont cependant mis en valeur une augmentation de la température (+4°C depuis 2007) qui peut signifier une évolution du gisement par sollicitation d'eaux plus profondes qui traduit une surexploitation de la ressource. Il est conseillé de mettre en place un suivi régulier de la ressource thermale de Bagnols-les-Bains et de valoriser ces données afin de s'assurer de la pérennité de l'exploitation. Un contrôle avec des mesures manuelles est un point positif du site ;
- concernant **le cadre réglementaire**, il existe une déclaration d'intérêt public de la source 38°C et un périmètre de protection qu'il serait nécessaire de redéfinir sur la base d'arguments hydrogéologiques plus fiables afin de garantir une protection optimale du gisement. Concernant le forage F6, celui-ci se trouve en dehors des limites du périmètre de protection existant. De plus, aucune autorisation d'exploiter n'a été acquise par les thermes pour cet ouvrage. Il est conseillé d'engager des procédures visant à obtenir l'autorisation d'exploitation du forage F6 et de modifier les limites de la protection établie au titre de la DIP ;

4.2. LES PISTES DE PROGRES A MOYEN ET COURT TERME

Plusieurs pistes de progrès ont été identifiées par l'état des lieux au regard de la démarche qualité pour la ressource de Bagnols-les-Bains.

Ces pistes, qui ont pour objectif de faire évoluer les stations vers le « plus » qualité pour la ressource, sont à hiérarchiser dans le temps (à court et moyen terme) selon leur importance relative.

Il est recommandé de s'engager à **court terme** sur les axes suivants :

- récupération, bancarisation, archivage et traitement réguliers des données de suivi d'exploitation afin de mieux caractériser le fonctionnement de l'hydrosystème thermal et juger du renouvellement de la ressource ;
- régularisation de l'autorisation d'exploiter du forage F6 ;
- amélioration de la connaissance du gisement par le biais de l'acquisition d'informations géochimiques et isotopiques complémentaires sur les eaux du secteur d'étude dans le but de :
 - caractériser le pôle thermal (origine, température du réservoir...) ;
 - quantifier les mélanges avec les eaux superficielles ;
 - localiser la zone d'impluvium et les pressions associées.

Il est recommandé de s'engager à **long terme** sur les axes suivants :

- réalisation d'un ouvrage de secours pour assurer la sécurité d'approvisionnement en eau thermale ;
- instrumentation des sources dans le but d'effectuer un suivi de leurs paramètres (débit) et de juger de leur relation avec le forage d'exploitation ainsi que de la pérennité des conditions actuelles d'exploitation au regard du gisement ;
- actualisation de la protection réglementaire de la ressource thermale (DIP et périmètre associé) du site afin de garantir durablement la sécurité sanitaire de la ressource thermale dans le secteur des urgences.

5. Eléments de bibliographie

AFSSA Lignes directrices pour l'évaluation des eaux minérales naturelles au regard de la sécurité sanitaire [Rapport]. - 2008.

ANTEA Dossier de demande d'autorisation d'exploiter à l'émergence le forage F6 [Rapport] / ANTEA. - 2003. - A 29632.

ANTEA Eléments techniques et géologiques en vue de la demande de DUP sur le forage thermal F6 [Rapport]. - 2001. - A 24154 /A.

ANTEA Réalisation d'une campagne de prospection radon sur les parcelles 345 et 346. Thermes de Bagnols-les-Bains. [Rapport] / ANTEA. - 2001. - 25571/A.

Blavoux B. Apport des techniques isotopiques à la connaissance des gisements d'eau minérale. [Rapport]. - [s.l.] : La houille blanche, 1995. - pp. 51-58.

Bouchot V [et al.] Late Variscan mineralization systems related to orogenic processes : The French Massif Central [Article] // Ore Geology Reviews. - 2005. - pp 169-197 : Vol. 27.

BRGMa Travaux de réhabilitation du captage hydrothermal. Campagne 92-93. [Rapport] / BRGM. - 1993. - N 1558 MON 94.

BRGMb opération de rénovation du captage des sources thermominérales [Rapport] / BRGM. - 1993. - 93 MON 1007 PR.

Clanet F L'eau thermale sulfurée de Bagnols-les-Bains [Rapport]. - 1985.

Desprez N. Recherches sur le gîte thermominéral de Bagnols-les-Bains (Lozère) [Rapport] / BRGM. - 1962. - 62-DS-AO16.

Duboeuf P. Note de synthèse sur le gîte hydrominéral de Bagnols-les-Bains [Rapport] / SOGREAH. - Inédit.

Faure M Late orogenic carboniferous extensions in the Variscan French Massif Central [Article] // Tectonics. - 1995. - pp 132-153 : Vol. 14.

Gadalia A. Chimie de la minéralisation [Rapport]. - [s.l.] : La houille blanche, 1995. - pp. 62-69.

GEOTHERMA Campagne de sondage S1 à S3 [Rapport] / GEOTHERMA. - 1995. - BH/JL/ND/Février 1995.

GEOTHERMA Note géologique et hydrogéologique [Rapport] / GEOTHERMA. - 1997. - FT/CM/Décembre 1997.

Horon O, Megnien Cl et Rouire J Etude de la série sédimentaire des environs du Bleyrnard [Rapport] / BRGM. - 1957. - A1197.

Hydro-Invest Forage F6 Février 2010 Descente de la pompe à 74 m. - 2010.

ICS'eau Stockages - Thermes de Bagnols-les-Bains. - 2004. - REA 03 117.

Mercier F. Nouvelles investigations sur le site de Bagnols-les-Bains [Rapport] / ANTEA. - 1999. - A 16421.

Naydénov G. La station thermique de Bagnols-les-Bains [Ouvrage]. - Région Languedoc-Roussillon : Association pour la recherche thermique et climatique en Languedoc-Roussillon, 1990.

Ohayon-Courtès C. Les eaux minérales sulfurées Problématique générale [Revue]. - [s.l.] : La Houille Blanche, 1995. - 2/3.

Perollier Origine des sulfures dans les eaux de Bagnols-les-Bains [Rapport]. - 1994.

Pouchan P. L'émergence thermo-minérale. [Rapport]. - [s.l.] : La houille blanche, 1995. - pp. 46-50.

Poul X Station thermique de Bagnols-les-Bains [Rapport] / BRGM. - 1984. - 84-LRO-554-PR.

Ramahashay B.C. Geochemistry for hydrologists [Rapport]. - [s.l.] : Technip, 1996. - p. 190.

Risler Compte-rendu des travaux de recaptage de la source d'eau minérale n°1 (dite à 41°C) de Bagnols-les-Bains (Lozère) [Rapport] / BRGM. - 1977. - 77 SGN 659 MCE.

Risler J.J Caractéristiques chimiques et isotopiques des gaz de quelques sources thermominérales du massif central français [Rapport]. - [s.l.] : BRGM, 1977. - 77 SGN 553 MCE.

Risler J.J. Compte rendu des travaux de recaptage de la source d'eau minérale n°1 (dite à 41°) [Rapport] / BRGM. - 1976. - 76-SGN-304-MCE.

Risler J.J. Hélium et source thermominérale en France [Rapport] / BRGM. - 1978. - 78-SGN-684-MCE.

Rouire J-C Etude géologique des petits Causses de la région d'Allenc [Rapport]. - [s.l.] : BRGM, 1959. - BRGG A1424.

Saplaïroles M et Ollagnier S Référentiel Hydrogéologique Français BDRHF Version 2 Bassin Adour Garonne [Rapport]. - [s.l.] : BRGM, 2009. - RP-56952-FR.

Squarcioni P Forage F6 - Descente de la pompe à 74, bilan et orientations [Rapport] / Hydro invest. - 2011. - M7153 HI2010020269.

Teissier J.L. Opération de rénovation du captage des sources thermominérales (note de synthèse sur les travaux effectués durant l'intersaison thermique 92-93) [Rapport] / BRGM. - 1993. - 93-MON-1007-PR.

Verdoux P. Contribution des systématiques Rb/Sr et U/Pb à la caractérisation des circulations et paléocirculations de fluides en domaine continental de 0 à 2000m // Conséquences sur les ressources en eaux et le stockage des déchets. - [s.l.] : Université de Montpellier II, 1997.

Vigouroux P. Guide qualité pour la ressource en eau minérale et thermique [Collection scientifique et technique] / BRGM. - 2005. -

Vigouroux P. Atlas des périmètres de protection des sources d'eau minérale [Rapport] / BRGM. - 1999. - RR-40466-F.

Annexe 1

Données météorologiques

Moyenne mensuelle des températures journalières pour la station de Bagnols-les-Bains**Minimales (°C)**

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Moyenne
Janvier	-3.2	-3.8	-2.2	-4	-3.2	-1.4	-3.0
Février	0.5	-4.3	-3.5	-6	-4	-0.6	-3.0
Mars	1.4	-1.2	-1.5	-2.9	0.1	0.3	-0.6
Avril	1.7	2.3	2.3	1.8	1.9	4	2.3
Mai	4.7	5.4	4.3	5.2	4.7	6.7	5.2
Juin	8.4	11.1	8.1	9.1	7.9	8.4	8.8
Juillet	9.5	9.9	9.3	9.6	16	9.5	10.6
Août	9.6	11.2	10.3	8	8.7	8.9	9.5
Septembre	7	6.3	7.1	7.7	9.6	8.6	7.7
Octobre	4.6	3.2	6.3	7.6	6.8		5.7
Novembre	2.8	1	0.1	-0.1	2.9		1.3
Décembre	0.1	-1	-2.1	-5	-2		-2.0

Maximales (°C)

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Moyenne
Janvier	7.6	2.9	4.4	5.2	4.6	7.2	5.3
Février	8	4	7.8	2.2	5.4	8.5	6.0
Mars	11.7	13.5	8.6	9.9	8.7	9.6	10.3
Avril	13.7	13.6	11	12.4	14.4	18.2	13.9
Mai	16.1	19.2	17.1	19.1	18.3	17.3	17.9
Juin	23.5	27.6	22.9	24.7	24.5	20.7	24.0
Juillet	23.4	27.3	25	24.3	29.1	22.2	25.2
Août	23.1	30	23.2	23	20.5	22.3	23.7
Septembre	17.4	19.9	20.8	20	21.9	20.9	20.2
Octobre	15.3	12.3	15.6	16	17.6		15.4
Novembre	10.8	11.1	8.4	8.7	12.4		10.3
Décembre	6.5	6.3	6.6	3	7.9		6.1

Moyennes (°C)

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Moyenne
Janvier	2.2	-0.5	1.1	0.6	0.7	2.9	1.2
Février	4.3	-0.2	2.2	-1.9	0.7	4.0	1.5
Mars	6.6	6.2	3.6	3.5	4.4	5.0	4.9
Avril	7.7	8.0	6.7	7.1	8.2	11.1	8.1
Mai	10.4	12.3	10.7	12.2	11.5	12.0	11.5
Juin	16.0	19.4	15.5	16.9	16.2	14.6	16.4
Juillet	16.5	18.6	17.2	17.0	22.6	15.9	17.9
Août	16.4	20.6	16.8	15.5	14.6	15.6	16.6
Septembre	12.2	13.1	14.0	13.9	15.8	14.8	13.9
Octobre	10.0	7.8	11.0	11.8	12.2		10.5
Novembre	6.8	6.1	4.3	4.3	7.7		5.8
Décembre	3.3	2.7	2.3	-1.0	3.0		2.0

Moyenne mensuelle des températures journalières pour la station du Bleymard**Minimales (°C)**

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Moyenne
Janvier	-1.8	-5.8	-3.8	-4.3	-4.2	-1.8	-0.9	-4.6	-6.4	-3.9	-3.8
Février	-1.6	-6.2	-3	-7.5	-5	-1.1	-1.1	-4.4	-5.5	-0.9	-3.6
Mars	0	0.3	-2.5	-1.8	-2.6	-1.4	-3	-1.8	-3.2	-0.5	-1.7
Avril	1.3	1.5	0.3	1.1	1.4	5.4	0.3	2.1	2.1	3.8	1.9
Mai	3.6	5.3	3.7	5.5	4.8	5.3	6.3	7.2	3.3	6.7	5.2
Juin	10.5	13.6	9.2	10.3	9.1	8.1	8.7	8.6	8	7.8	9.4
Juillet	9.8	11.6	9.9	10.5	14.5	9.2	9.9	10.4	12.2	8.5	10.7
Août	9.8	15.3	10.7	9	7.8	9.7	9.7	12.7	10.3	11.8	10.7
Septembre	6.4	7.7	8.5	8.1	9.9	6.1	5.9	8.4	6.9	10	7.8
Octobre	4.3	2.3	5.8	6.5	7	3.8	4	4.6	2.9	5.2	4.6
Novembre	1.1	1.8	-1.1	-1	2.2	-2.1	-0.7	2.1	-1.2	3.8	0.5
Décembre	-0.3	-2	-1.9	-6	-0.8	-2.5	-4.1	-3.8	-5.6	-1.4	-2.8

Maximales (°C)

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Moyenne
Janvier	4.3	-0.1	0.8	2.3	0.6	4.2	5.5	1.4	-1.3	1.8	2.0
Février	3.5	-0.2	4.1	-2.4	1.8	5	5	0.4	-0.5	5.2	2.2
Mars	6.8	8.1	3.8	5.3	3.5	4.7	3.5	5.3	2.9	6.3	5.0
Avril	9.3	8.8	6.5	7.6	9.7	13.1	7.8	8.4	10.2	13.1	9.5
Mai	11.3	14.1	12.2	14.1	13.6	12.8	12.7	15.1	10.2	15.9	13.2
Juin	18.8	21.9	18.2	19.7	18.9	16.3	16.3	18	15.7	16.4	18.0
Juillet	18.9	22.5	20.4	20.2	24	18	19.6	21.1	21.4	17.3	20.3
Août	18.4	24.7	18.9	18.3	16.1	17.8	19.7	22.6	19.9	21	19.7
Septembre	12.7	15.1	16.1	15.2	16.5	14.3	14.5	16.4	15.5	18.7	15.5
Octobre	10.9	8.1	11.3	11.1	13	10.1	11	12	9.2	12.8	11.0
Novembre	6.4	7.8	4.6	4.6	8.1	4.3	3.5	6.7	3.7	8.3	5.8
Décembre	3.8	3.7	3.7	0	5.7	2.8	0.6	1.5	0.9	3.8	2.7

Moyennes (°C)

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Moyenne
Janvier	-1.8	-5.8	-3.8	-4.3	-4.2	-1.8	-0.9	-4.6	-6.4	-3.9	-3.8
Février	-1.6	-6.2	-3	-7.5	-5	-1.1	-1.1	-4.4	-5.5	-0.9	-3.6
Mars	0	0.3	-2.5	-1.8	-2.6	-1.4	-3	-1.8	-3.2	-0.5	-1.7
Avril	1.3	1.5	0.3	1.1	1.4	5.4	0.3	2.1	2.1	3.8	1.9
Mai	3.6	5.3	3.7	5.5	4.8	5.3	6.3	7.2	3.3	6.7	5.2
Juin	10.5	13.6	9.2	10.3	9.1	8.1	8.7	8.6	8	7.8	9.4
Juillet	9.8	11.6	9.9	10.5	14.5	9.2	9.9	10.4	12.2	8.5	10.7
Août	9.8	15.3	10.7	9	7.8	9.7	9.7	12.7	10.3	11.8	10.7
Septembre	6.4	7.7	8.5	8.1	9.9	6.1	5.9	8.4	6.9	10	7.8
Octobre	4.3	2.3	5.8	6.5	7	3.8	4	4.6	2.9	5.2	4.6
Novembre	1.1	1.8	-1.1	-1	2.2	-2.1	-0.7	2.1	-1.2	3.8	0.5
Décembre	-0.3	-2	-1.9	-6	-0.8	-2.5	-4.1	-3.8	-5.6	-1.4	-2.8

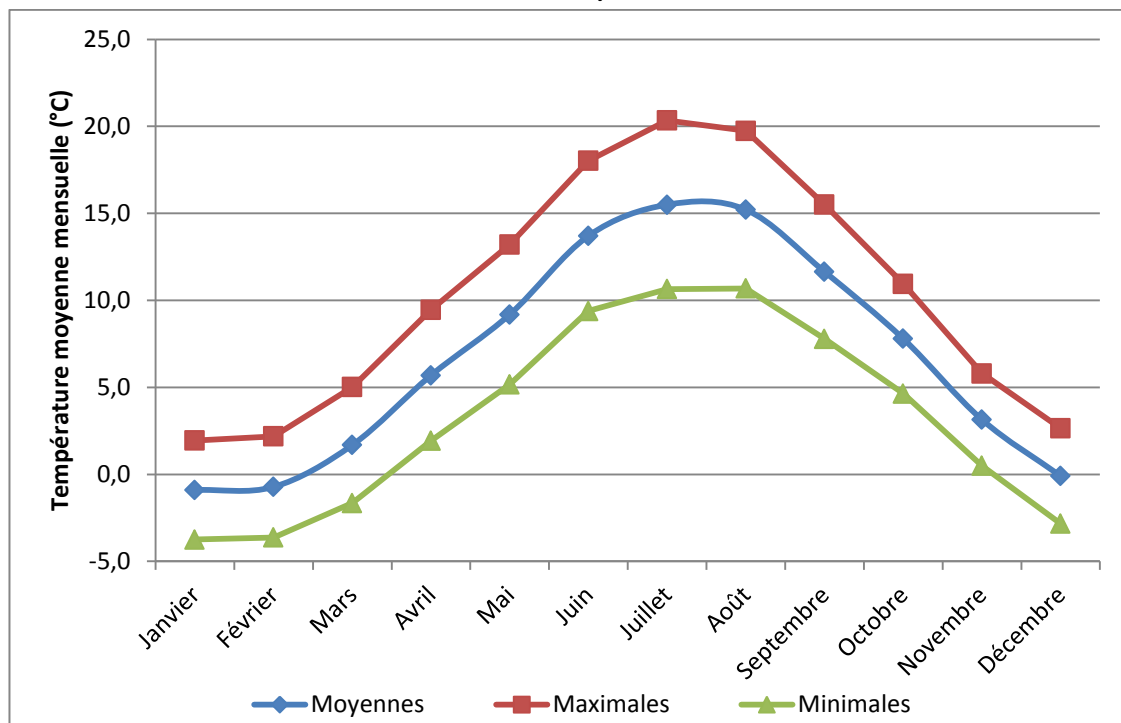
Précipitations mensuelles à la station de Bagnols-les-Bains (mm/mois)

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Moyenne
Janvier	26.3	60.3	109.2	21.8	127	31.8	65.5	67.4	46.3	14.8	57.0
Février	48.3	83.4	65.4	19.2	56.2	103	35.5	74.3	74.6	30.3	59.0
Mars	41.7	19.2	99.1	16.8	107.7	17.5	77.4	25.5	86.9	143.1	63.5
Avril	32.6	66.1	119.2	66	47.6	83.6	126.3	159.3	53.5	33.4	78.8
Mai	101	72.4	34.4	62.1	54.4	142	202	54.4	136.3	44.9	90.4
Juin	92	17.9	26.1	75.1	17.6	97.2	97.2	56	86.2	45.4	61.1
Juillet	37.3	14.8	26.9	17	52	52.1	65.5	31.9	58.5	102.7	45.9
Août	94.4	66.3	230	39.5	83	79.8	48.9	45.4	17.2	44.6	74.9
Septembre	96.5	94.5	39.6	189.4	160.2	40.6	101.5	36.4	80.8	11.1	85.1
Octobre	119.8	99.8	185.8	103.6	139	56.9	137.6	99.8	204.7	41.6	118.9
Novembre	142.6	183.9	34.2	73.6	67.6	63.5	207.9	65.6	103.9	290.8	123.4
Décembre	116.5	210.4	38.1	56.8	37.4	42.3	157.5	63.9	79.7	90.3	89.3
Total	949	989	1008	740.9	949.7	810.3	1323	779.9	1029	893	

Précipitations mensuelles à la station du Bleymard (mm/mois)

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Moyenne
Janvier	38.2	58.9	93.8	17	171	49.6	190.6	77.6	65.2	35.6	79.8
Février	41.4	89.2	60.3	15.4	48.2	92.8	63.2	122.8	160.8	54.8	74.9
Mars	59.1	16.8	136.6	11.6	95	22.8	63.2	39.4	98.4	202.2	74.5
Avril	46.3	99.5	177.9	68.4	59.2	122.2	204.6	203.6	51.8	16.4	105.0
Mai	130.5	80.7	47.3	62.6	47.2	142	321	54	149.4	41.6	107.6
Juin	99	47.3	15.8	58.4	27.4	73.8	179	92.6	122.2	38	75.4
Juillet	79.8	50.4	27.2	15.2	54	58.8	70	22.6	55.8	113.2	54.7
Août	103.3	87.6	123.8	54	103.2	59.2	37.2	75.2	15	37.2	69.6
Septembre	99.3	105.3	44.4	260.4	204.4	28	58.8	44.4	81.2	18.4	94.5
Octobre	158.8	109.2	172.4	148.9	209.8	75.4	184	140	321.4	69	158.9
Novembre	225.6	275	47.4	123.6	101.4	141.8	301.8	63	119	418.6	181.7
Décembre	182.5	311.1	40	38.2	47.8	48.4	201.2	109.4	149.4	55.6	118.4
Total	1264	1331	986.9	873.7	1169	914.8	1875	1045	1390	1101	

Variation annuelle des températures (station du Bleymard) – Données Météo France (2002-2011)



Annexe 2

Schéma structural

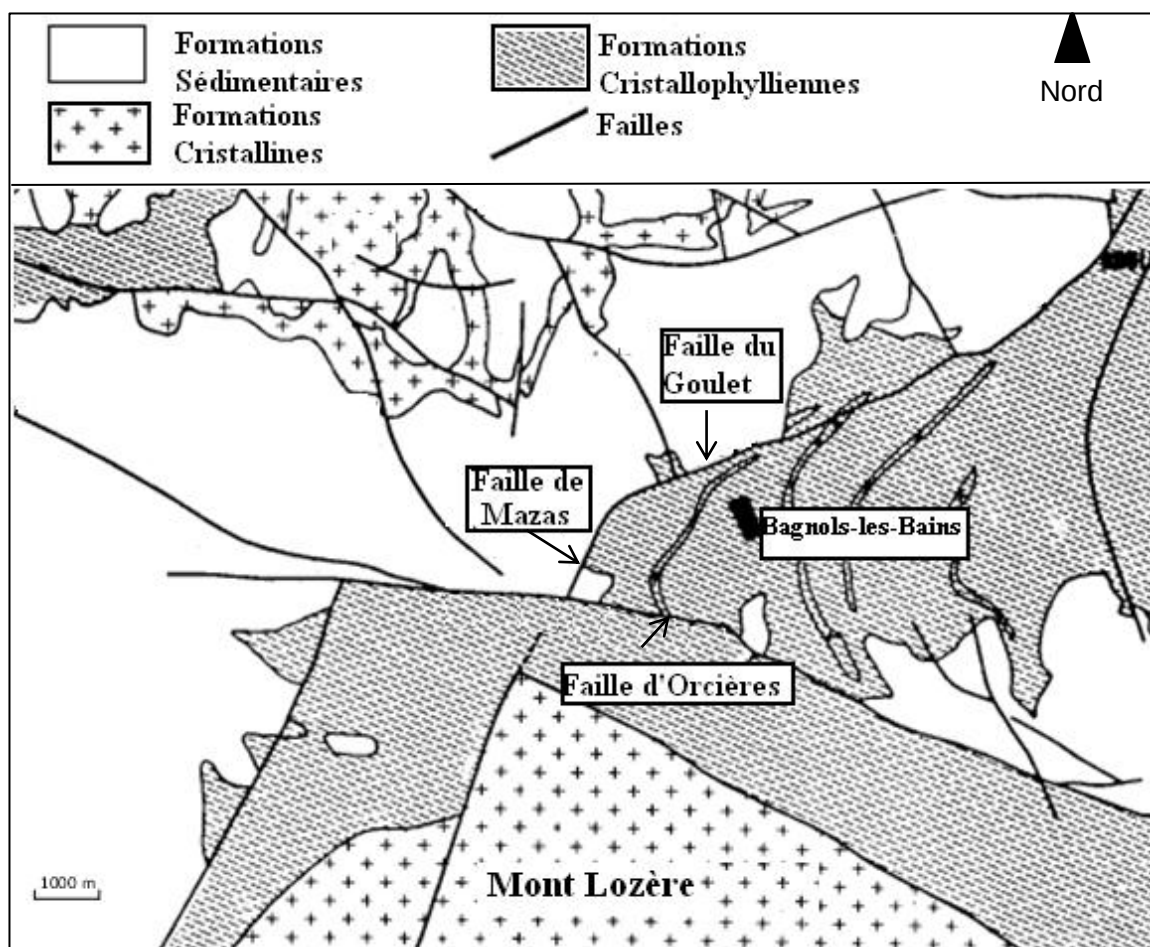
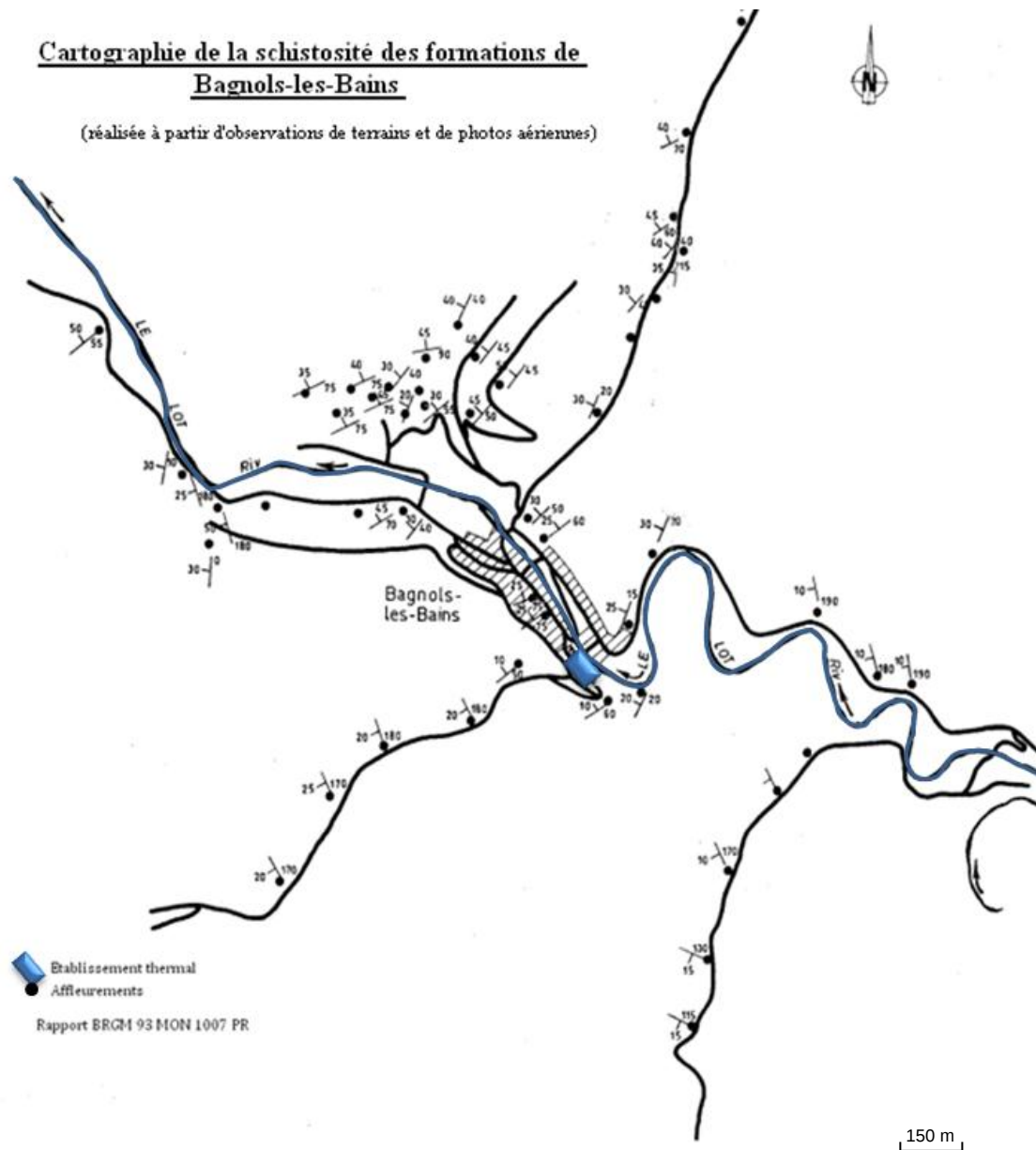


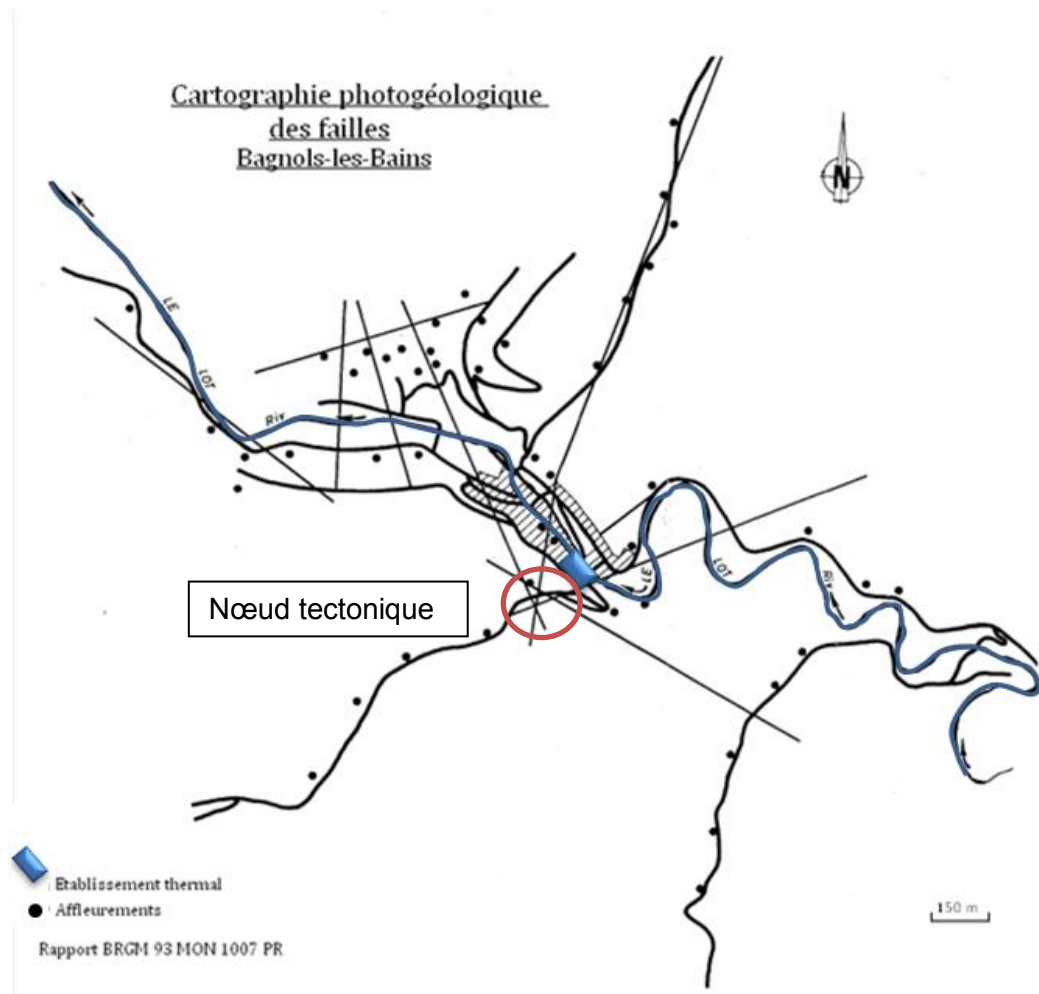
Schéma structural de la région de Bagnols-les-Bains (Risler, 1976)

Annexe 3

Cartographie de la schistosité et des failles



Cartographie des orientations et pendages de la schistosité sur la commune de Bagnols-les-Bains (Teissier, 1993)



Cartographie des failles sur la commune de Bagnols-les-Bains (Teissier, 1993)

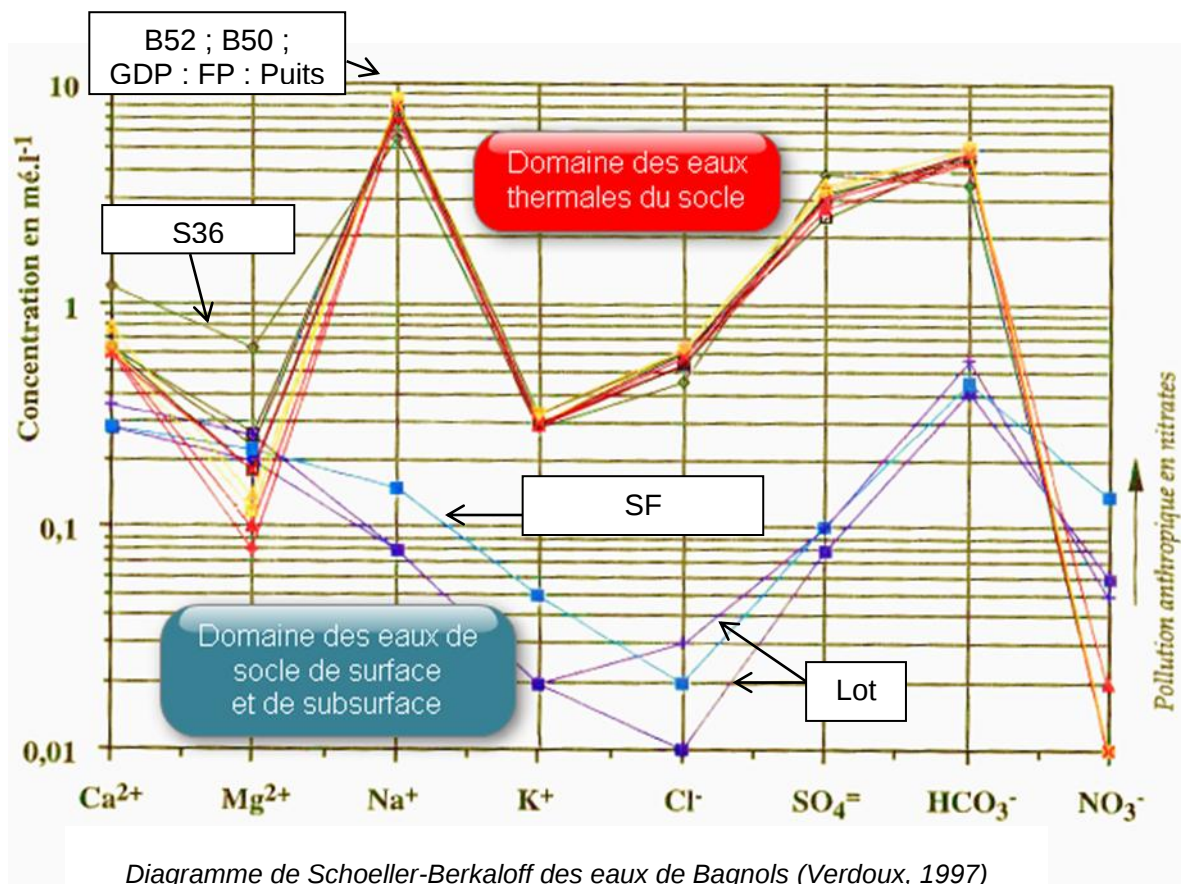
Annexe 4

Ouvrages

Code BSS	Abréviation	Type	Date de réalisation	Type de foration	Alt. mNGF	Prof (m)	Etat de l'ouvrage	Rapport	X (Lille)	Y (Lille)
08635X0047/S1	Sondage 1	S1	Sondage	1975	Carottage	921	Cimenté	BRGM 77 SGN 659 MCC	705837.3	1945705.2
08635X0048/S2	Sondage 2	S2	Sondage	1976	Carottage	921	Cimenté	BRGM 77 SGN 659 MCC	705836.4	1945713.1
08635X0049/PUITS	Puits thermal	Puits		1977	M. pneumatique	921	Cimenté	BRGM N 1558 MON 94	705830.3	1945712.2
08635X0044/FP	Forage profond	FP	Forage incliné	1993	Carottage Marteau fond de trou	938	Cimenté	BRGM MON 1007 PR	705814.5	1945714.2
08635X0045/F1	Forage 1	F1	Forage	1994	Rotary et Carottage	921	Cimenté	BRGM N 1558 MON 94 GEOTHERMA JLYND 95	705834.7	1945704.9
08635X0046/F2	Forage 2	F2	Forage	1994	Rotary et Carottage	921	Cimenté	BRGM N 1558 MON 94 GEOTHERMA JLYND Déc. 1995	705834.7	1945710.5
08635X0035/NF1D1-2	Sondage 1 (2)	S1	Sondage	1994	Marteau fond de trou	930	Rebouché	GEOTHERMA	705820.4	1945713.4
08635X0035/NF1D1-3	Sondage 2 (2)	S2	Sondage	1994	Marteau fond de trou	930	Rebouché	GEOTHERMA BM/JL/ND Fev.95	705820.4	1945713.4
08635X0035/NF1D1-4	Sondage 3	S3	Sondage	1994	Marteau fond de trou	930	Rebouché	GEOTHERMA	705820.4	1945713.4
08635X0035/NF1	NF1	NF1	Forage incliné	1995	Marteau fond de trou	930	Rebouché	GEOTHERMA 6301 Mar.95	705820.4	1945713.4
08635X0036/NF2	NF2	NF2	Forage incliné	1995	Marteau fond de trou	930	Rebouché	GEOTHERMA 6301 Mar.95	705838.4	1945705.4
08635X0037/NF3	NF3	NF3	Forage incliné	1995	Marteau fond de trou	930	Rebouché	GEOTHERMA 6301 Mar.95	705833.4	1945705.4
08635X0038/NF4	F3	NF4 dit F3	Forage	1995	Marteau fond de trou	930	Rebouché	GEOTHERMA FT/CM Nov.96 ANTEA A 14884/A A 15 359/A	705834.4	1945705.4
08635X0031/FR1	Pervenche	F1	Forage	1999	Marteau fond de trou	965	Cimenté	ANTEA A 21567/A A17558/A	705655.3	1945643.3
08635X0032/FR2	FR2	F2	Forage	2000	Marteau fond de trou	955	Cimenté	ANTEA A 21412/A A 17612/A	705760.4	1945673.4
08635X0033/FR3	FR3	F3	Forage	2000	Marteau fond de trou	948	Cimenté	ANTEA A 21567/A A 17612/A	705740.3	1945708.4
08635X0042/F4	F4	F4	Forage	2000	Marteau fond de trou	952	Cimenté	ANTEA A 21567/A A17612/A	705771.2	1945682.3
08635X0043/F5	F5	F5	Forage	1999	Marteau fond de trou	914	Ouvert	ANTEA A 18250 /A	706030.9	1945591.2
08635X0041/F6	F6	F6	Forage	2001	Marteau fond de trou	934	exploité	ANTEA A21567 /A A27836 /A	705778.8	1945570.3
08635X0005/1	Bassin 50	B.50	Source		Source	930	Non exploité		705820	1945703
08635X0006/S38	Bassin 52	B.52	Source		Source	937	Non exploité		705830.4	1945693.4
08635X0007/S30	Source 36	S36	Source		Source	937	Non exploité		705820.4	1945693.4
	Galerie du préfet	GDP	Source				Non exploité			

Annexe 5

Diagramme de Schoeller-Berkaloff



Nota : Le diagramme de Schoeller-Berkaloff est une représentation graphique semi-logarithmique. Sur l'axe des abscisses sont représentés les différents ions. Pour chacun de ces ions la teneur réelle en mg/l est reportée sur l'axe des ordonnées. L'allure du graphique permet de visualiser le faciès de l'eau minérale. Dans les cas des eaux de Bagnols-les-Bains, l'ensemble des points d'eau peuvent être classés en deux domaines, tous les deux présentant un déséquilibre chloro-alkalin se traduisant par une abondance de Na^+ par rapport au Cl^- , caractéristique des eaux de socle :

- Le domaine des **sources thermales du socle** représenté par la source principale de la galerie du préfet, du bassin 52 et l'ancien forage de production de la station. Ces eaux sont fortement minéralisées pour la région de Bagnols-les-Bains, avec une dominante bicarbonatée sodique qui est le résultat de l'hydrolyse des minéraux des roches du socle. Leur très forte teneur en HCO_3^- traduit une origine profonde du carbone. La forte teneur en SO_4^{2-} est presque équivalente aux bicarbonates. Ce phénomène est attribué à l'oxydation des sulfures présents dans les fractures ouvertes de la zone d'altération. La source n°3 est un phénomène particulier, elle présente un faciès hydro-chimique proche de cette famille avec des teneurs en sulfate et magnésium supérieures qui traduisent une origine moins profonde de l'eau.
- Le domaine des **eaux du socle de subsurface et de surface** regroupe la source froide et le Lot. Ce sont des eaux faiblement minéralisées avec une dominante bicarbonatée calcique en relation avec l'hydrolyse de certains minéraux du socle.

Annexe 6

Données de physico-chimie

	°C		μS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Forage	T	pH	CE	SiO ₂	H ₂ S	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	K ⁺	Fe ²⁺	F ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
NF1	34	-	700	67.3	0.65	0	92	19.3	10.8	-	-	19.6	1.8	148
F3 (NF4)	41.7	7.2	848.5	-	-	159.8	164.3	22.7	12.3	-	-	14.2	1.6	188.5
Profond	41.6	8.3	880	67.3	-	350.0	510.0	18.8	8.2	0.2	9.3	21.7	16.1	67.6
F1	28	-	510	38.1	-	192.3	82.3	18.3	9.8	5.9	5.7	17.3	3.1	115.5
F2	34.5	-	720	60	-	-	131	16	27.5	7.5	7.5	28	11.1	114.5
F3	24.0	-	300.0	31.0	-	-	77.0	10.0	44.3	3.2	3.2	112.0	14.1	60.5
F4	34.6	-	725	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F5	20	7.8	330	-	-	-	50	5	0.8	4.4	6	11.2	4.54	70
F6	41.2	7.0	863.4	74.2	1.9	278.2	140.3	19.8	11.5	0.9	5.7	12.7	1.2	171.9

Caractéristiques physico-chimique des forages thermaux de Bagnols-les-Bains

			°C	U. pH	μS/cm	mg/l												
Nom ouvrage	Date	Origine données	T	pH	CE (20°C)	RS	SiO ₂	H ₂ S	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	SiO ₃ ²⁻	K	Fe ²⁺	F ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
GDP	1854	Verdoux							223.2	103.8		32.9						
GDP	1977	Verdoux							383.1	196.8	32.3		6.6		19.0	10.8	1.1	241.5
GDP	1983	Verdoux		7.0	845				305.0	180.0	23.0		12.5		9.7	21.0	1.0	176.0
GDP	1985	Verdoux		6.9	890				305.0	164.7	21.2	105.8	12.7		9.7	21.0	1.6	176.0
GDP	01/01/1985	F.Clanet	42.2	6.9		599		2.9	305.0	164.7	21.2	105.8	12.8	0.33	9.7	21.0	1.6	176.0
GDP	31/01/1996	Verdoux	39.8	7.1	806				148.8	119.1	21.3		11.7			12.8	2.9	174.7
GDP	14/02/1996	Verdoux	39.8	7.0	810				146.7	148.9	21.3		11.7			12.4	3.2	170.1
GDP	08/07/1996	Verdoux		7.0	760				141.8	157.1	19.5		11.7			12.8	2.2	172.4
B.50	01/01/1961	Naydenov							334.0	160.0	25.9		12.4			16.0	2.0	190.0
B.50	sept-75	BRGM		7.7			42.6		345.0	164.6	23.1		12.5	0.0	8.6	24.0	1.2	197.0
B.52	sept-75	BRGM		7.5			41.7		294.0	155.0	21.7		11.7	0.0	7.4	16.0	1.2	180.0
B.52	14/02/1996	Verdoux	40.1	7.0	765				140.6	134.5	19.5		11.3			12.4	1.2	162.1
B.52	08/07/1996	Verdoux		7.1	794				150.1	145.5	20.9		11.7			12.0	2.2	181.6
B.52	31/01/1996	Verdoux	40.1	7.1	761				140.3	144.1	19.5		11.7			12.0	1.0	161.4
Source 36°	31/01/1996	Verdoux	35.5	7.5	719				105.8	184.4	16.0		10.9			23.6	7.7	129.7

Ressource en eau thermique de la station de Bagnols-les-Bains

Sources réunies	1976	Naydenov	7.1	870	736														
Sources réunies	01/01/1961	Naydenov		820	740														
Sources réunies	01/01/1977	Naydenov	6.94	870	871														
Sources réunies	01/01/1975	Naydenov	7.7	900	777														
Sources réunies	01/01/1983	Naydenov	7	845	863														
Sources réunies	01/01/1985	Naydenov	6.88	890	823														
Sources réunies	01/01/1990	Naydenov	7.35																
Sources réunies	01/01/1838	Naydenov				990	10.0												
Sources réunies	01/01/1849	Naydenov				966	295.0	136.0	77			22.0	2.3						
S2	févr-76	BRGM	7.1				39.5	336.7	158.4	21.3	12.5	9.6	11.0	1.0	194.1				
SF	31/01/1996	Verdoux	9.6	6.09	67.6				13.7	4.8	0.7	2.0	5.6	2.7	3.4				
SF	29/06/1990	Naydenov	9.3	6.7					8.3	2.0									
SF	17/03/1962	Naydenov	9.3					9.0	7.3	8.0	5	0.1	2.9	3.9	3.8				
NF4	14/02/1996	Verdoux	41.7	7.24	844				160.1	167.1	23.0	11.7	15.6	1.7	180.5				
NF4	08/07/1996	Verdoux	7.09	853					159.5	161.4	22.3	12.9	12.8	1.5	196.6				
NF4	01/01/1996	ANTEA	42.0				680	270.0	170.0	24.0	12.0				21.0	180.0			
NF1	01/02/1995	B. Bertrand	34.0				67.3	0.65	92.0	19.3	10.8				19.6	1.8	148.0		
F1	29/07/1999	B. Bertrand				34.5	216.0	101.0	31.9	12.6	7.1	12.3	4.3	129.0					
F1	04/08/1999	B. Bertrand				43.3	222.0	100.0	22.5	11.6	8.1	17.2	3.9	121.0					
F1	16/08/1999	B. Bertrand				30.1	125.0	47.0	7.1	7.0	2.8	19.8	2.4	47.1 ?					
F1	13/08/1999	B. Bertrand				44.6	206.0	81.0	11.8	7.8	5.7	19.8	1.9	96.6					
F1	01/11/1999	A 17612	28.0																
F2	27/08/1999	LDA Lozère				60.0				131.0	16.0	27.5	7.5	28.0	11.1	114.5			
F2	01/11/1999	A 17612	34.5				720												
F3	03/09/1999	LDA Lozère				31.0				77.0	10.0	44.3	3.2	112.0	14.1	60.5			
F3	01/11/1999	A 17612	24.0				300												
F4	01/11/1999	A 17612	34.6				725												
F5	08/10/1999	LDA Lozère	7.8	370															
Profond	09/07/1998	B. Bertrand	31.0	8.27				67.3				17.6	8.2	0.2	9.3	17.4	2.1	116.1	
Profond	01/01/1993	ANTEA					350.0	510.0	20.0								26.0	30.0	19.0
F6	26/02/2001	ANTEA	39.3				75.8	0.7	295.0	141.0	20.3	10.9	1.8	8.9	14.9	1.2	170.0		
F6	29/03/2001	ANTEA					286.0	137.0								1.1	180.0		
F6	12/04/2001	ANTEA	39.5					289.0	126.0								1.1	96.2	

F6	19/04/2001	ANTEA							286.0	133.0			1.1				179.8
F6	23/04/2001	ANTEA	39.9						48.0	136.0			0.8				180.4
F6	30/04/2001	ANTEA	39.8						283.0	131.0							178.3
F6	09/05/2001	ANTEA	39.9						287.0	136.0			0.9				172.0
F6	17/05/2001	ANTEA							282.0	135.0			0.9				168.0
F6	21/05/2001	ANTEA	40.0						296.0	118.0			0.9				163.3
F6	01/06/2001	ANTEA							299.0	144.0			0.8				170.0
F6	07/06/2011	ANTEA	40.3						295.0	138.0			1.1				174.0
F6	26/06/2001	ANTEA							302.0	140.0			1.2				183.0
F6	16/01/2002	ANTEA	40.2		789	600	72.0	1.3	290.0	170.0	21.0	11.0	1.1	7.7	11	1.0	180.0
F6	19/02/2002	ANTEA	40.3	7.1	860			0.9					0.7				
F6	18/03/2002	ANTEA	41.0					1.9	300.0	140.0			0.9				190.0
F6	16/04/2002	ANTEA	39.0						300.0	140.0			0.4				180.0
F6	21/05/2002	ANTEA	40.5						300.0	170.0			0.5				180.0
F6	03/06/2002	ANTEA	40.5		789	590	73.0		290.0	140.0	19.0	13.0	0.6	9.1	12	1.2	180.0
F6	21/11/2002	ANTEA	38.0	7.0	797	580	76.0	1.1	280.0	150.0	19.0	11.0	<0.2		13	1.3	170.0
F6	08/03/2004	ARS		6.9	890			2.0						0.01			
F6	13/04/2004	ARS						2.9						0.01			
F6	26/04/2004	ARS		7.0	870			0.0						0.01			
F6	08/06/2004	ARS												0.01			
F6	21/06/2004	ARS		7.1	880									0.01			
F6	11/08/2004	ARS						1.9						0.01			
F6	25/08/2004	ARS		6.8	880									0.01			
F6	13/10/2004	ARS						2.1						0.01			
F6	21/03/2005	ARS		7.1	860			1.0						0.01			
F6	25/04/2005	ARS		6.8	830			1.9						0.01			
F6	22/06/2005	ARS		7.2	890			2.1						0.01			
F6	25/08/2005	ARS		7.0	870			2.1						0.01			
F6	06/10/2005	ARS	41.7	7.0	860			1.9						0.01			
F6	20/03/2006	ARS	42.0	7.0	880			2.1						0.01			
F6	25/04/2006	ARS						2.2						0.01			
F6	10/05/2006	ARS	42.0														
F6	19/06/2006	ARS		6.9	860			2.4						0.01			

Ressource en eau thermale de la station de Bagnols-les-Bains

F6	24/07/2006	ARS	42.1				
F6	21/08/2006	ARS		6.7	890	1.8	0.01
F6	14/09/2006	ARS					
F6	11/10/2006	ARS	42.1	6.8	880	2.5	0.01
F6	20/03/2007	ARS		6.6	880	1.9	12.08
F6	16/04/2007	ARS				2.1	11.8
F6	21/05/2007	ARS	42.4				
F6	13/06/2007	ARS		7.2	870	2.1	9.99
F6	08/08/2007	ARS		7.2	830	1.7	11.4
F6	08/10/2007	ARS		7.2	840	1.8	9.54
F6	26/05/2008	ARS			910	1.4	10
F6	18/07/2008	ARS			870	2.0	12.1
F6	16/09/2008	ARS	42.8				
F6	09/10/2008	ARS	42.9		880	1.6	9.05
F6	17/03/2009	ARS			890	2.6	11
F6	18/05/2009	ARS	42.9				
F6	09/06/2009	ARS			890	2.8	11
F6	26/08/2009	ARS		7.6	850	0.0	9.7
F6	10/09/2009	ARS	43.0				
F6	06/10/2009	ARS	42.6		890	2.4	8.7
F6	23/03/2010	ARS			880	0.0	11
F6	19/05/2010	ARS			860	2.8	11
F6	16/07/2010	ARS	43.0		880	3.0	10
F6	20/09/2010	ARS	43.0		890	2.5	4.9
F6	15/03/2011	ARS	43.0	7.3	890	2.9	10
F6	18/05/2011	ARS	42.5	7.1	720	2.7	9.9
F6	18/07/2011	ARS	42.2	7.0	890	2.8	9.8
F6	19/09/2011	ARS		7.2	880	0.0	11
F6	01/03/2012	ARS	42.6	7.2	880	2.6	9.2

Données physico-chimiques disponibles dans le secteur de Bagnols-les-Bains

Annexe 7

Données isotopiques

Prélèvement	Date	34 S (SO ₄) ‰ VS CDT	18O ‰ (SO ₄) VS SMOW	Rapport
F1	1993	+ 21.1 ‰		A 29632 /A
B52	1993	+ 20.8 ‰		A 29632 /A
Puits	1994	± 0.3 ‰	0.5 ± 0.3 ‰	N 1558 MON 94
FP	1994	± 0.3 ‰	3.9 ± 0.3 ‰	N 1558 MON 94
FP	1999	+ 22.7 ‰		A 29632 /A
F3	1999	+ 21.8 ± 0.3‰		A 29632 /A

Teneurs en ³⁴S (SO₄) ‰ et ¹⁸O (SO₄) ‰ des eaux de Bagnols-les-Bains (Verdoux, 1997)

Type	Description	87Sr/86Sr	±	Sr en ppb
Roche	Granite Mt Lozère	0.75355	0.00006	
Roche	Granite Mt Lozère	0.76254	0.00002	
Roche	Micaschistes	0.78243	0.00002	
Roche	Micaschistes	0.7903	0.00001	
Ruisseau	Bramont	0.7125	0.00002	13.3 à 15.7
Ruisseau	Bramont	0.71275	0.00004	12.9 à 17.4
Ruisseau	Lot	0.7142	0.00002	
Ruisseau	Lot	0.71498	0.00001	
Sources	St Etienne du Valdonnez	0.71752	0.00001	6.2
Sources	Vareilles	0.71967	0.00001	7.3
Sources	Source froide	0.71741	0.00002	32.7

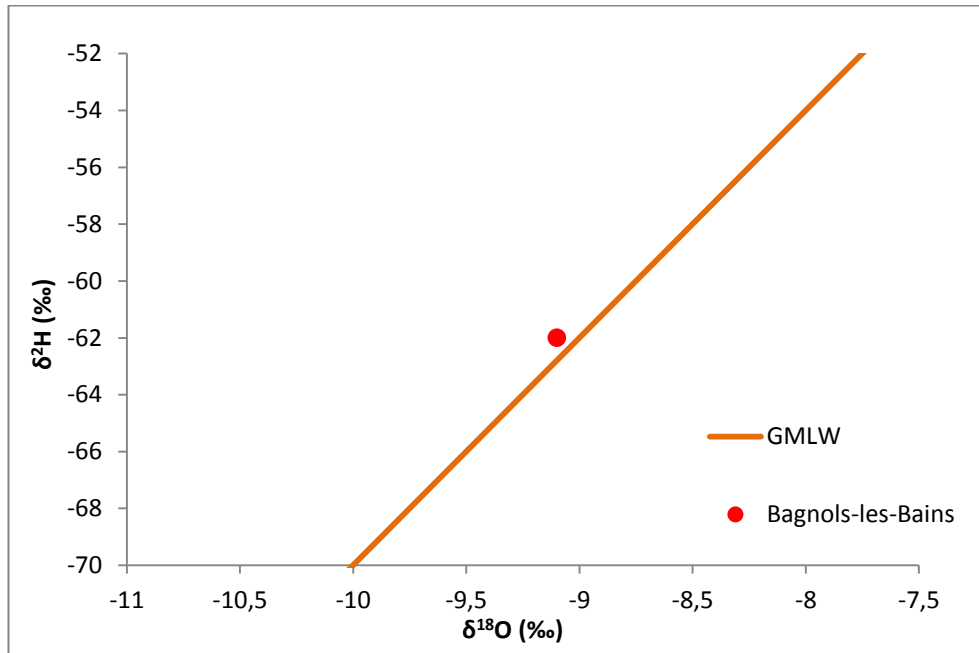
Comparaison des compositions isotopiques et des teneurs en Sr des roches, des eaux de surface et de subsurface dans le socle varisque aux environs de Bagnols-les-Bains (Verdoux, 1997)

Source	Date	206Pb/204Pb	±	207Pb/204Pb	±	206Pb/207Pb	±
GDP	18/01/1996	18.318	0.084	15.553	0.068	1.1787	0.0002
GDP	14/02/1996	18.214	0.085	15.513	0.072	1.1742	0.0002
S36	18/01/1996	18.237	0.052	15.538	0.045	1.1738	0.0002
Lot	18/01/1996	18.53	0.007	15.656	0.006	1.1835	0.0001

Compositions isotopiques en Pb des échantillons d'eau prélevée à Bagnols-les-Bains (Verdoux, 1997)

Prélèvement	Date	δD (H ₂ O) ‰ VS SMOW	δ ¹⁸ O ‰ (H ₂ O) VS SMOW	Rapport
Puits	24/11/77	-62.0±0.5 ‰	-9.1 ± 0.1‰	78-SGN-684

Composition isotopique en δ¹⁸O et δD des eaux thermales de Bagnols-les-Bains



Droite des eaux météoriques mondiale (Craig, 1961), $\delta D = 8\delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$ ¹¹

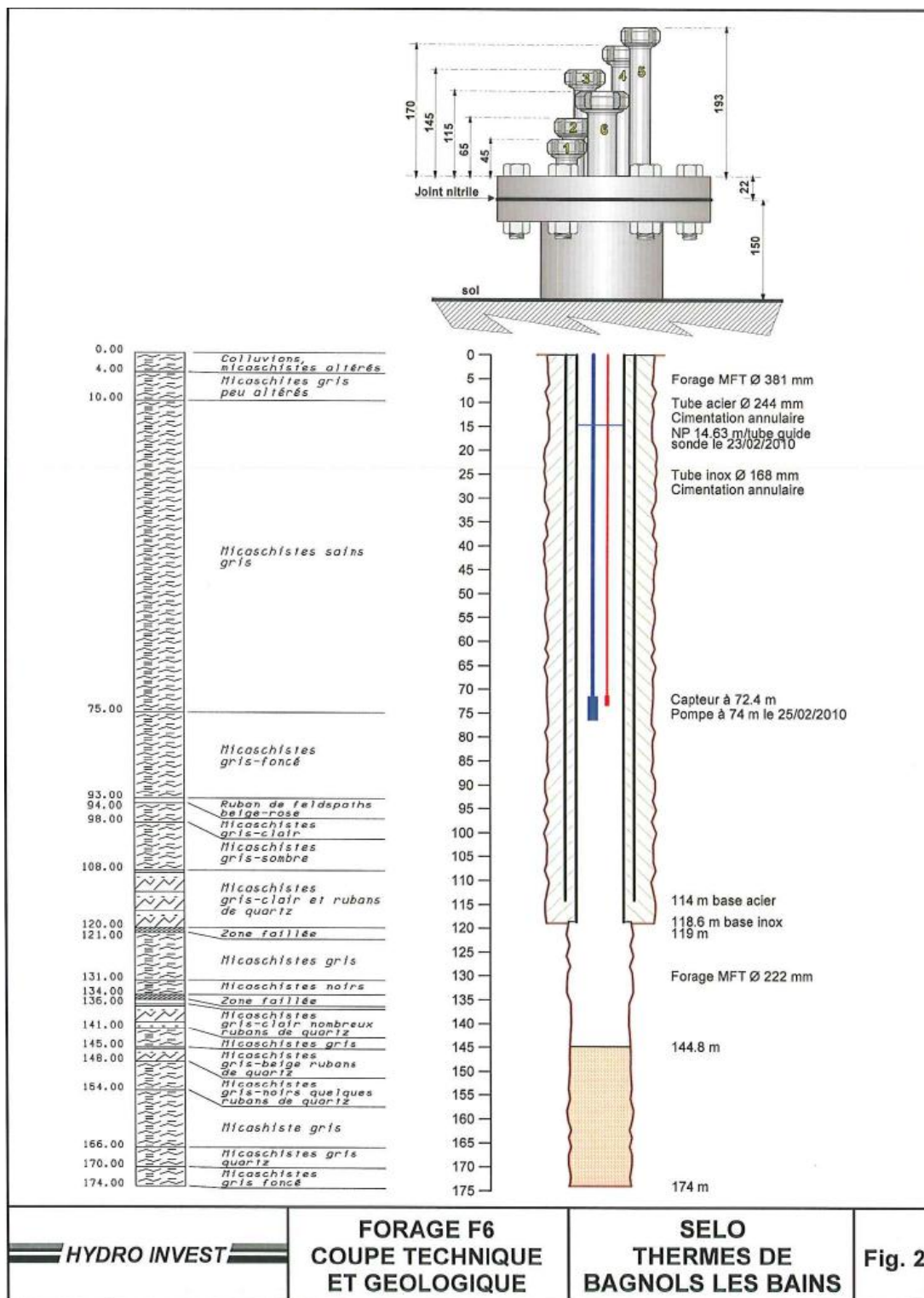
Ech	Lieu	206Pb/204Pb	±	207Pb/204Pb	±	206Pb/207Pb	±
1	Station thermique	18.559	0.002	15.716	0.003	1.1809	0.0001
2	D109	18.517	0.002	15.671	0.002	1.1817	0.0001
3	D109 Saint Julien du Tournel	18.83	0.005	15.694	0.004	1.1998	0.0001
4	Station thermique	18.294	0.013	15.625	0.011	1.1708	0.0001
5	Station thermique	18.215	0.002	15.62	0.002	1.1662	0.0001
6	Station thermique	18.241	0.001	15.611	0.001	1.1685	0.0001
7	D109 Saint Julien du Tournel	18.555	0.001	15.655	0.001	1.1852	0.0001

Compositions isotopiques en Pb des échantillons de sulfures prélevés sur filons minéralisés en surface (2;3;7), sur filon de pegmatite (GDP; 1) et sur fractures dans les schistes des Cévennes carottés à l'aplomb de la station (4;5;6). (Verdoux, 1997)

¹¹ Les mesures issues du rapport 78-SGN-684 sont très proches de la droite météorique mondiale et indiquent donc l'origine atmosphérique des eaux thermales de Bagnols-les-Bains.

Annexe 8

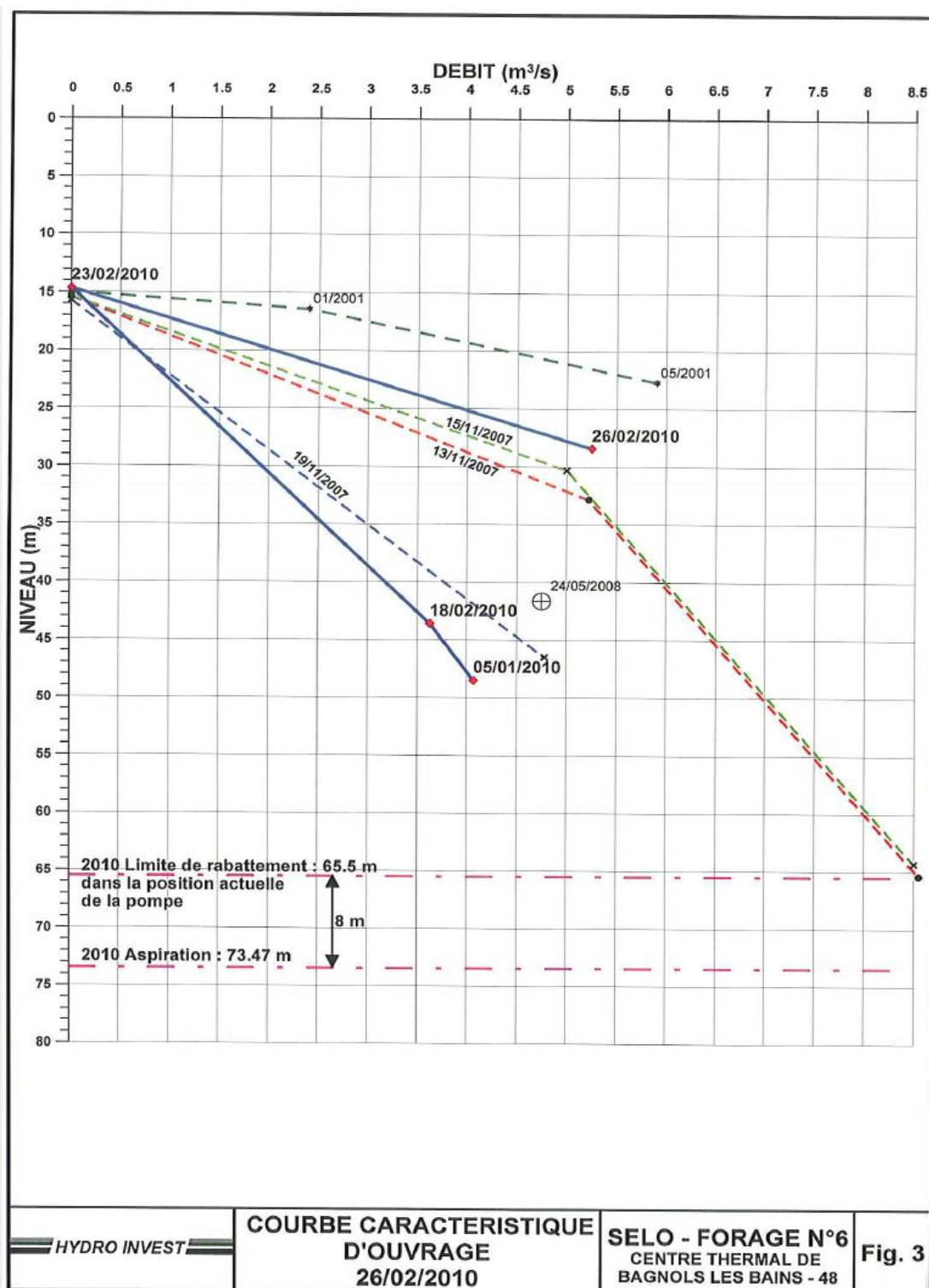
Coupe technique F6



Coupe géologique et technique du forage d'exploitation F6 (Hydro-Invest, 2010)

Annexe 9

Courbe caractéristique F6



Courbe caractéristique du forage F6 (Hydro-Invest, 2010)

Annexe 10

Schéma de l'installation de pompage

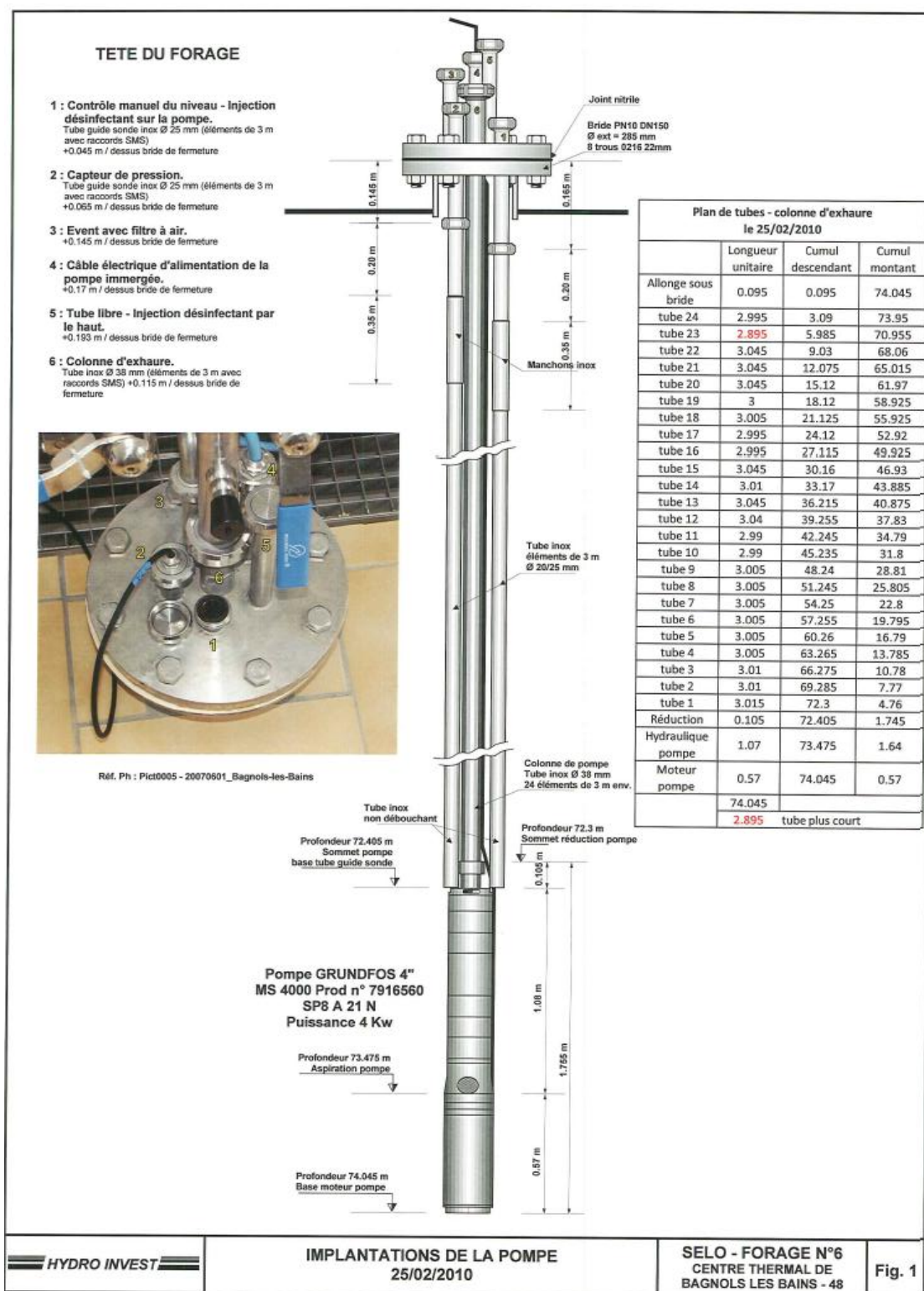
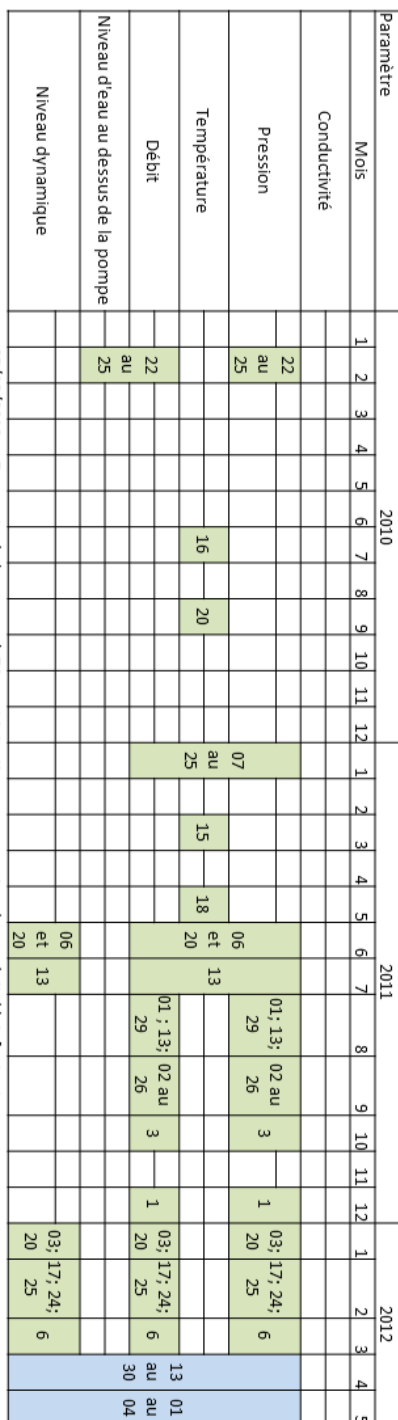
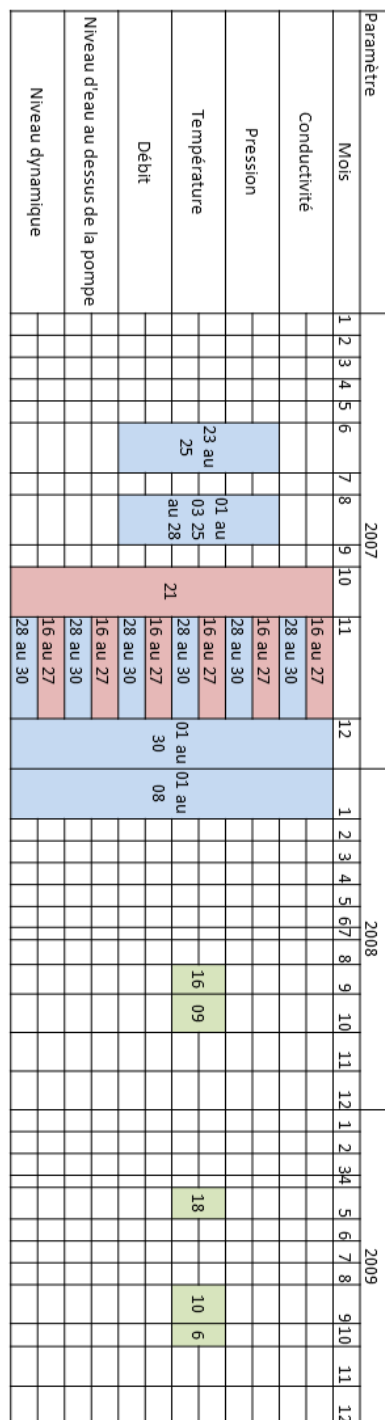


Schéma de l'installation de pompage sur le forage F6 (Hydro-Invest, 2010)

Annexe 11

Synthèse du suivi F6



Synthèse des données de suivi du forage F6

Annexe 12

Déclaration d'intérêt public et périmètre de protection

BAGNOLS LES BAINS
23 novembre 1857

DÉCRET

NAPOLÉON, par la grâce de Dieu et la volonté nationale, Empereur des Français,

A tous présents et à venir, salut.

Sur le rapport de notre ministre secrétaire d'État au département de l'Agriculture, du commerce et des travaux publics,

Vu la demande formée le 15 octobre 1856, par les sieurs Borrelli-de-Serres et Chevalier, propriétaires de l'établissement thermal de Bagnols, département de la Lozère, tendant à obtenir que les sources minérales qui alimentent cet établissement soient déclarées d'intérêt public ;

Le plan dudit établissement et le mémoire justificatif y-joint ;

Les certificats d'affiches et publications de la demande et les exemplaires des journaux d'arrondissement, dans lesquels elle a été insérée ;

Les registres où sont consignées les observations et déclarations du public ;

Les diverses oppositions et adhésions produites dans l'enquête ;

La réponse des sieurs Borrelli et Chevalier aux oppositions ;

Le rapport de l'ingénieur des mines du département, en date du 25 décembre 1856 ;

La délibération du même mois, de la commission départementale ;

L'avis du comité consultatif d'hygiène publique du 2 février 1857 ;

L'avis du conseil général des Mines, du 20 du même mois ;

Vu la loi du 14 juillet 1856 ;

Le décret du 8 septembre suivant ;

Notre conseil d'État entendu ;

AVONS DÉCRÉTÉ ET DÉCRÉTONS CE QUI SUIT :

Article 1^{er} – Les sources d'eaux minérales qui alimentent l'établissement thermal possédé par MM. Borelli-de-Serres et Chevalier à Bagnols, canton du Bleymard, arrondissement de Mende, département de la Lozère, sont déclarées d'intérêt public.

Article 2 – Le présent décret sera publié et affiché, aux frais des demandeurs, et à la diligence du Préfet, dans la commune de Bagnols et dans les chefs-lieux de canton de l'arrondissement de Mende.

Article 3 – Notre Ministre secrétaire d'État au département de l'Agriculture, du Commerce et des Travaux publics est chargé de l'exécution du présent décret, qui sera inséré par extrait au Bulletin des Lois.

Fait au palais des Tuileries, le **23 novembre 1857**
Signé : NAPOLÉON

BAGNOLS LES BAINS
26 août 1865

DÉCRET

NAPOLÉON, par la grâce de Dieu et la volonté nationale, Empereur des Français,

A tous présents et à venir, salut.

Sur le rapport de notre ministre secrétaire d'État au département de l'Agriculture, du commerce et des travaux publics,

Vu notre décret du 23 novembre 1857 qui a déclaré d'intérêt public les sources d'eaux minérales qui alimentent l'établissement thermal possédé par les sieurs Borrelli-de-Serres et Chevalier, à Bagnols, département de la Lozère ;

Vu la demande qui avait, en même temps, été formée par ces propriétaires à l'effet d'obtenir pour lesdites sources un périmètre de protection ;

Vu les pièces de l'instruction à laquelle cette demande a été soumise notamment l'avis du comité consultatif d'hygiène publique du 2 février 1857 et l'avis du conseil général des mines du 20 du même mois ;

Vu la nouvelle délibération de la commission départementale du 26 septembre 1863 ;

Le nouveau rapport de l'Ingénieur des mines du 29 août 1864 ;

L'avis de l'ingénieur en chef, du 16 janvier 1865 ;

Celui du préfet du 1^{er} février suivant ;

Les observations produites, à la date du 8 mars 1865, par les pétitionnaires sus-nommés ;

L'avis du conseil général des mines du 7 avril 1865 ;

Vu la loi du 14 juillet 1856 ;

Les décrets réglementaires des 8 septembre 1856 et 28 janvier 1860 ;

Notre conseil d'État entendu,

AVONS DÉCRÉTÉ ET DÉCRÉTONS CE QUI SUIT :

Article 1^{er} – Il est attribué aux sources d'eaux minérales qui alimentent l'établissement de Bagnols, sis dans la commune de ce nom, arrondissement de Mende, département de la Lozère, un périmètre de protection délimité ainsi qu'il suit, conformément au plan annexé au présent décret, savoir :

Au nord-est : par la rive droite du Lot, depuis l'angle sud de la maison inscrite sous le n° 371 de la section A du plan cadastral de la commune de Bagnols, point L du plan, jusqu'au point situé à 200 mètres en aval sur la même rive, point M du plan.

A l'ouest : par une ligne droite partant du point M précité et aboutissant à la Croix de Pierre, située sur l'ancienne route départementale de Mende à Bagnols, à l'angle sud-ouest de la parcelle n° 124, section A du plan cadastral de la commune de Bagnols, point O du plan.

Au sud : par l'ancienne route départementale précitée, depuis le point O jusqu'à son intersection avec le chemin vicinal d'Oultet à Bagnols, point P du plan ;

A l'est : par une ligne droite joignant le point P précité au point de départ L.

Lesdites limites comprenant une étendue superficielle de deux hectares cinquante-six centiares (2 ha 56 ca).

Article 2 – Le présent décret sera publié et affiché, aux frais des propriétaires de l'établissement thermal de Bagnols et à la diligence du Préfet dans la commune de Bagnols et dans les chefs lieux de canton de l'arrondissement de Mende.

Article 3 – Notre Ministre secrétaire d'État au département de l'Agriculture, du Commerce et des Travaux publics est chargé de l'exécution du présent décret, qui sera inséré, par extrait, au Bulletin des Lois.

Fait au palais de Fontainebleau, le **26 août 1865**
Signé : NAPOLEON



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain - BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Languedoc-Roussillon
1039 rue de Pinville
34000 Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 80