

Projet PRESCRIRE. Préserver et protéger les ressources en eau souterraine. Le site de Bourbon-Lancy (71)

Rapport final

BRGM/RP-60304-FR

Octobre 2011



Datar



Centre hospitalier
de Bourbon-Lancy



AGENCE DE L'EAU
ADOUR-GARONNE
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTÈRE
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE



Établissement public du ministère
chargé du développement durable



Géosciences pour une Terre durable
brgm

Projet PRESCRIRE. Préserver et protéger les ressources en eau souterraine. Le site de Bourbon-Lancy (71)

Rapport final

BRGM/RP-60304-FR
Octobre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2011 PSP08AUV10

V. Petit, A. Deguilhem, D. Jauffret, B. Dewandel, B. Ladouche,
Avec la collaboration de
S. Leconte

Vérificateur :

Nom : P. Vigouroux
Date : 20 octobre 2011

Approbateur :

Nom : P. Rocher
Date : 7 novembre 2011

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



Premier ministre
Ministre de l'espace rural
et de l'aménagement du territoire

Datar



Centre hospitalier
de Bourbon-Lancy



AGENCE DE L'EAU
ADOUR-GARONNE
ETABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTRE
DU DEVELOPPEMENT DURABLE



agence de l'eau
Loire-Bretagne
Établissement public du ministère
chargé du développement durable



Bourgogne
Conseil régional



Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : Eau souterraine – Protection – Qualité – Ressource – Géologie – Bourbon-Lancy – Saône-et-Loire

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

Petit V., Deguilhem A., Jauffret D., Dewandel B., Ladouche B. avec la collaboration de Leconte S. (2011) – Projet PRESCRIRE. Préserver et protéger les ressources en eau souterraine. Le site de Bourbon-Lancy (71). Rapport final. BRGM/RP-60304-FR, 60 pages, 34 illustrations, 2 annexes.

Synthèse

Le projet PRESCRIRE, mis en œuvre à l'initiative du Commissariat à l'Aménagement, au Développement et à la Protection du Massif Central (DATAR), en relation avec les Agences de l'Eau Adour-Garonne, Loire-Bretagne et Rhône-Méditerranée & Corse, ainsi qu'avec le Conseil Régional de Bourgogne, est conduit par le Service Géologique Régional Auvergne du BRGM dans le cadre de ses missions de Service public.

Le projet PRESCRIRE, inscrit dans la logique de la Directive Cadre sur l'Eau, a pour objet de mener une réflexion sur les notions de **préservation de la qualité des ressources en eau souterraine et de protection des gisements**. Orienté sur une vingtaine d'études de cas (appelés sites « test »), ce projet vise à l'édition au final d'un guide méthodologique sur ce sujet.

Chaque site « test » est partenaire du projet au sens technique et financier. Il apporte, selon ses propres caractéristiques, une composante à la réflexion qui est menée. L'objectif est de montrer et faire comprendre par l'exemple (celui du site « test » étudié) l'importance relative de telle ou telle action lorsqu'il est question de préserver la qualité des ressources et de protéger les gisements.

Le présent rapport concerne le site « test » de Bourbon-Lancy pour lequel la composante majeure apportée à la réflexion menée est la valorisation de données numériques d'essais de pompage par des techniques de traitement du signal et de modélisation de données d'essai.

L'exemple du site « test » de Bourbon-Lancy a montré que les techniques de traitement du signal et de modélisation des données d'essai complètent de manière significative la compréhension du contexte hydrogéologique local. Ces techniques ont permis, en effet, de qualifier le contexte hydrogéologique du secteur des émergences par une solution « aquifère compartimenté » qui retranscrit la complexité géologique du gisement, par une représentation d'une zone faillée entre deux compartiments, en accord avec la description géologique du site. Les méthodes utilisées ont permis en outre d'avoir accès à plus d'informations quant aux propriétés hydrodynamiques du gisement, telles que les valeurs de transmissivité pour chaque compartiment.

L'exemple du site « test » de Bourbon-Lancy permet de conclure que les techniques de traitement du signal et de modélisation de données d'essai constituent des outils pertinents pour renforcer de manière significative la connaissance d'un gisement. De tels outils méritent d'être retenus au titre des finalités méthodologiques du projet PRESCRIRE.

Sommaire

1. Avant-Propos : le projet PRESCRIRE	9
1.1. CONTEXTE GENERAL DU PROJET	9
1.2. CONTEXTE PARTENARIAL DU PROJET	9
1.3. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE DU PROJET	10
1.4. APPROCHE THEORIQUE DE LA NOTION DE PROTECTION	11
1.5. ETUDE DU SITE « TEST » : MODALITES PRATIQUES	12
2. Le site de Bourbon-Lancy	13
2.1. PRESENTATION GENERALE DU SITE DE BOURBON-LANCY	13
2.1.1. Contexte géographique	13
2.1.2. Contexte économique	13
2.2. CONTEXTES GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE	14
2.2.1. Contexte géologique	14
2.2.2. Contexte hydrogéologique et circuit hydrominéral	18
2.3. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU THERMALE	19
2.4. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL	21
2.4.1. Données générales du secteur de l'impluvium	21
2.4.2. Données générales au voisinage du quartier thermal	23
2.5. COMMUNICATION/SENSIBILISATION	26
2.6. ASPECT REGLEMENTAIRE	27
2.6.1. Au niveau de l'impluvium	27
2.6.2. Au niveau des émergences d'eau thermale	30
3. Apport spécifique du site de Bourbon-Lancy pour le projet PRESCRIRE	33
3.1. NOTION D'APPORT SPECIFIQUE	33
3.2. APPORT SPECIFIQUE DU SITE DE BOURBON-LANCY	34
3.3. DONNEES UTILISEES	34
3.4. TRAITEMENT DU SIGNAL	35
3.4.1. Analyses spectrales	36
3.4.2. Filtrage des chroniques	36
3.4.3. Évolution de la température, de la conductivité et des niveaux d'eau	37

3.4.4. Conclusion	39
3.5. POMPAGE D'ESSAI PAR PALIERS	39
3.5.1. Description	39
3.5.2. Conclusion	41
3.6. POMPAGE D'ESSAI DE LONGUE DUREE.....	41
3.6.1. Méthodologie utilisée pour l'interprétation des essais hydrauliques par pompages	42
3.6.2. Description du pompage d'essai longue durée	43
3.6.3. Méthodes d'interprétation retenues.....	44
3.6.4. Modélisation	44
3.6.5. Interprétation	47
3.6.6. Conclusion	48
3.7. APPORT DU SITE « TEST » ETUDIE A LA REFLEXION GLOBALE	49
4. Conclusion.....	51

Liste des illustrations

Illustration 1 :	Carte de situation du territoire couvert par le projet PRESCRIRE	10
Illustration 2 :	Schéma d'un gisement d'eau souterraine	11
Illustration 3 :	Localisation de la commune de Bourbon-Lancy	13
Illustration 4 :	Carte de situation des différentes activités	14
Illustration 5 :	Contexte géologique du secteur de Bourbon-Lancy	15
Illustration 6 :	Coupe du forage géothermique 5992X0061 (données Vauthrin Forages)	16
Illustration 7 :	Tableau de la position relative des forages par rapport au socle	17
Illustration 8 :	Schéma géologique du gisement thermal de Bourbon-Lancy	17
Illustration 9 :	Situation des émergences aux alentours de la station thermale	18
Illustration 10 :	Equipement de suivi qualité des ouvrages exploités	19
Illustration 11 :	Composition physico-chimique des eaux du site (extraits d'analyses de référence et essai de qualification).....	20
Illustration 12 :	Comparaison du chimisme des eaux des sources et du forage géothermique.....	20
Illustration 13 :	Occupation du sol sur le secteur de l'impluvium	21
Illustration 14 :	Localisation des stations d'épuration dans le secteur de Bourbon-Lancy	21
Illustration 15 :	Installations classées situées dans les alentours de Bourbon-Lancy	22
Illustration 16 :	Localisation des sites répertoriés dans les bases de données BASIAS et BASOL dans le secteur de Bourbon-Lancy	23
Illustration 17 :	Réseaux de collecte des eaux dans le secteur du quartier thermal	24

Illustration 18 : Lit du ruisseau temporaire Le Borne (à environ 30 m du nouveau forage).....	25
Illustration 19 : Carte des zones inondables associées aux crues du Borne (document Safege).....	26
Illustration 20 : Zones de protection réglementaire dans le secteur de l'impluvium.....	27
Illustration 21 : Carte des zones de délimitation du patrimoine naturel dans le secteur de Bourbon-Lancy.....	28
Illustration 22 : Carte de situation des captages AEP du secteur de Bourbon-Lancy.....	29
Illustration 23 : Carte de situation du périmètre de protection établi au titre de la DIP pour l'eau thermale du site de Bourbon-Lancy.....	31
Illustration 24 : Chroniques étudiées pour le traitement du signal.....	35
Illustration 25 : Densité spectrale de puissance relative.....	36
Illustration 26 : Chroniques filtrées des effets périodiques.....	37
Illustration 27 : Opposition de phase entre température et conductivité.....	38
Illustration 28 : Évolution de la température, de la conductivité et du niveau piézométrique en fonction du pompage.....	38
Illustration 29 : Pompage d'essai par paliers (données Antéa).....	40
Illustration 30 : Interprétation du pompage d'essai par paliers de février 2009.....	41
Illustration 31 : Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation des pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer l'essai.....	42
Illustration 32 : Chronique du pompage d'essai de longue durée utilisée.....	44
Illustration 33 : Modèle de la solution « aquifère compartimenté ».....	45
Illustration 34 : Modélisation du pompage d'essai de longue durée (16/11/2010 – 01/03/2011).....	46

Liste des annexes

Annexe 1	Eléments de bibliographie.....	53
Annexe 2	Comparaison des analyses chimiques des sources et du forage géothermique.....	57

1. Avant-Propos : le projet PRESCRIRE

1.1. CONTEXTE GENERAL DU PROJET

Le projet PRESCRIRE a pour objet de mener une réflexion sur les notions de préservation de la qualité des ressources en eau souterraine et de protection des gisements afin d'apporter des éléments d'appréciation quant aux actions à engager pour maintenir le bon état qualitatif de ressources en eau souterraine non altérées par des pollutions anthropiques.

Ce projet s'inscrit dans la logique de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) pour ce qui concerne le maintien du bon état des ressources en eau souterraine.

Le projet PRESCRIRE, qui se déroule sur la période 2010 à 2013, est orienté sur des études de cas (une vingtaine au total). Il vise à l'édition, en fin de projet, d'un guide méthodologique à usage des acteurs (exploitants, décideurs) en charge de promouvoir le développement durable de l'exploitation de ressources en eau souterraine de qualité.

1.2. CONTEXTE PARTENARIAL DU PROJET

Le projet PRESCRIRE a été initié par le Commissariat à l'Aménagement, au Développement et à la Protection du Massif Central (DATAR), en relation avec les Agences de l'Eau Adour-Garonne, Loire-Bretagne et Rhône-Méditerranée & Corse, ainsi qu'avec le Conseil Régional de Bourgogne. Il est mis en œuvre par le Service Géologique Régional Auvergne du BRGM, qui participe au financement du projet dans le cadre de ses missions de Service public (projet PSP08AUV10).

Outre ces partenariats institutionnels, le projet PRESCRIRE a proposé aux nombreux gestionnaires de sites à enjeu « eau souterraine » du Massif Central de s'engager dans la réflexion menée.

Plusieurs sites ont été volontaires pour apporter leur contribution à la démarche, dont le Centre Hospitalier de Bourbon-Lancy, qui constitue ainsi un partenaire à part entière du projet PRESCRIRE.

Chaque partenaire est sollicité pour apporter, selon les caractéristiques de son site, une composante majeure à la réflexion sur les notions de préservation de la ressource et de protection des gisements. Pour chaque site étudié, la réflexion est axée sur un thème technique spécifique, propre au contexte local.

Le projet vise à montrer et à faire comprendre par l'exemple (celui du site « test » étudié) pourquoi telle ou telle action engagée est importante à prendre en compte lorsque l'on veut agir pour préserver la qualité des ressources et protéger les gisements.

L'objectif du projet est de tirer parti de chacun des 20 cas d'étude que constituent les sites partenaires et de valoriser, en fin de projet, toutes les réflexions issues de ces études de cas afin de consolider, dans un guide méthodologique, l'expérience acquise.

Pour le site de Bourbon-Lancy, la composante majeure apportée à la réflexion menée par le projet PRESCRIRE a été *l'interprétation des pompes d'essai*.

1.3. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE DU PROJET

Le projet PRESCRIRE concerne l'ensemble du Massif Central (au sens géologique du terme). Les entités suivantes sont ainsi impliquées, pour tout ou partie, dans le projet (cf. illustration 1) :

- 4 Agences de l'Eau : Adour-Garonne, Loire-Bretagne, Rhône-Méditerranée & Corse, Seine-Normandie ;
- 6 régions administratives : Auvergne, Bourgogne, Languedoc-Roussillon, Limousin, Midi-Pyrénées et Rhône-Alpes ;
- 22 départements : Allier, Ardèche, Aude, Aveyron, Cantal, Corrèze, Côte-d'Or, Creuse, Gard, Haute-Loire, Haute-Vienne, Hérault, Loire, Lot, Lozère, Nièvre, Puy-de-Dôme, Rhône, Saône-et-Loire, Tarn, Tarn-et-Garonne, Yonne.

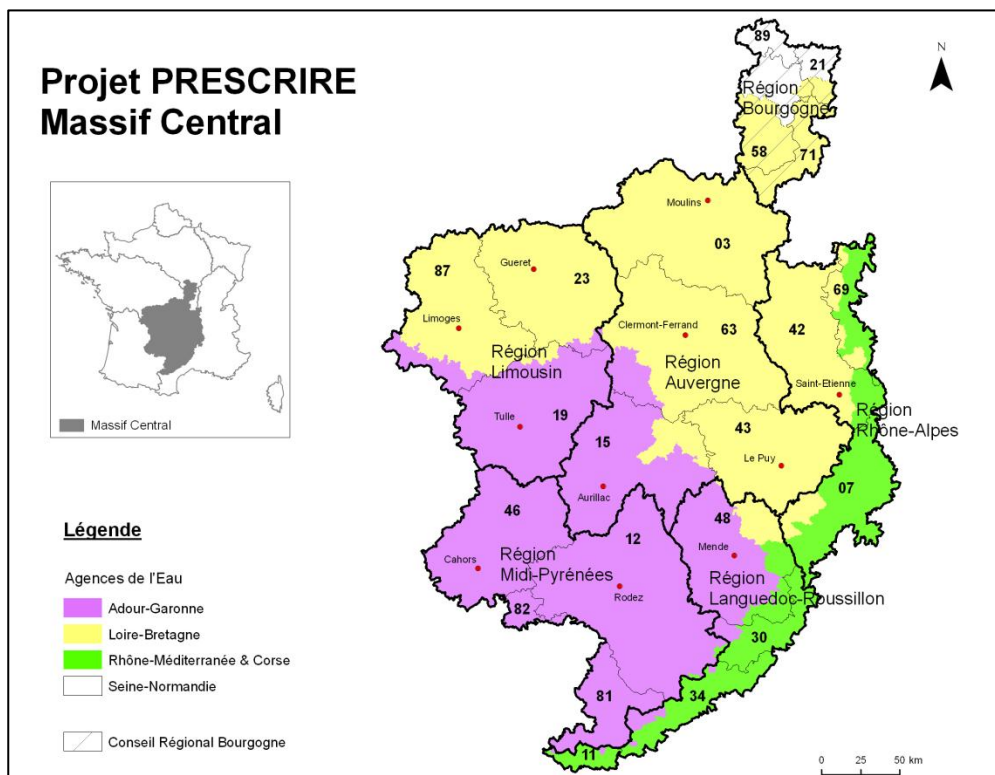


Illustration 1 : Carte de situation du territoire couvert par le projet PRESCRIRE

1.4. APPROCHE THEORIQUE DE LA NOTION DE PROTECTION

Les notions de préservation de la qualité d'une eau souterraine et de protection d'un gisement nécessitent de préciser d'une part le concept de gisement et d'autre part le principe de cycle d'une eau souterraine.

Un gisement d'eau souterraine est constitué par 3 secteurs distincts :

- l'impluvium, c'est le secteur où l'eau de pluie entre dans le système ;
- la zone de transit, c'est le secteur parcouru par l'eau qui s'est infiltrée, en souterrain, entre l'impluvium et la zone où cette eau est captée pour être utilisée ;
- la zone d'émergence, c'est le secteur de captage de l'eau souterraine pour un usage donné.

La figure présentée par l'illustration 2 ci-après permet de visualiser cette notion de gisement. Le cycle d'une eau souterraine est le circuit suivi par la molécule d'eau de pluie depuis l'impluvium, jusqu'à la zone d'émergence, en passant par la zone de transit.

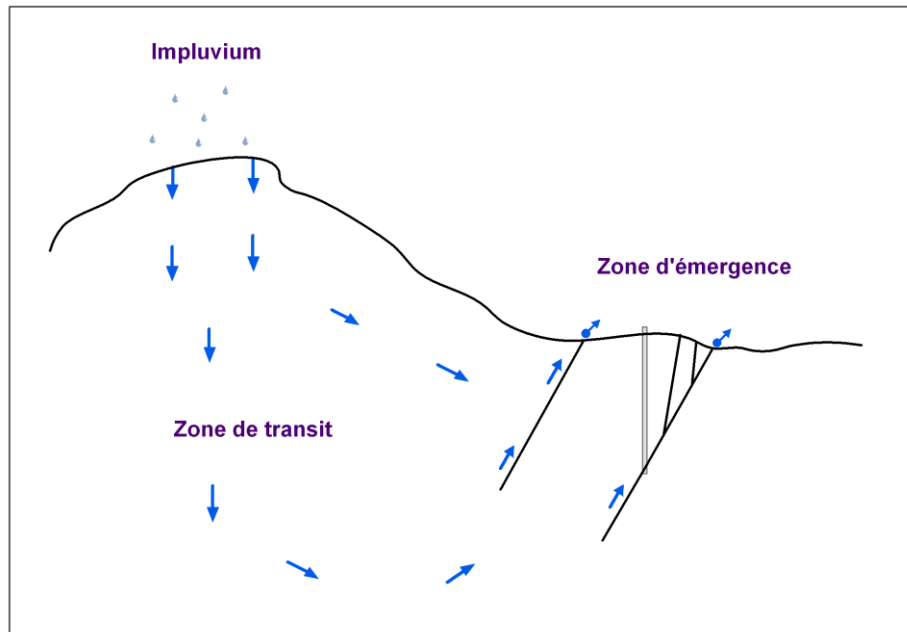


Illustration 2 : Schéma d'un gisement d'eau souterraine

Cette illustration n'est qu'un schéma et chacun des 3 secteurs ainsi représentés est nécessairement à relativiser d'un site à l'autre.

Il convient de relativiser, en particulier, la zone de transit selon que l'on est en présence d'une eau à minéralisation marquée, témoin de circulations longues et/ou profondes, ou d'une eau peu minéralisée, témoin de circulations rapides et/ou sub-superficielles. Pour les sites d'eau minérale, on parlera de circuit hydrominéral et pour les sites d'Alimentation en Eau Potable (AEP) on parlera tout simplement de circuit hydrogéologique.

Le raisonnement quant à la protection d'un gisement pourra être sensiblement distinct selon que l'on est en présence d'une zone de transit profonde ou plus superficielle. Cependant, quel que soit le cas, la préservation de la qualité de l'eau et la protection d'un gisement en un site donné nécessite de s'intéresser à l'ensemble du circuit que parcourt l'eau.

1.5. ETUDE DU SITE « TEST » : MODALITES PRATIQUES

Selon les dispositions retenues par le comité de pilotage du projet, le partenariat d'un site « test » avec le projet PRESCRIRE est acté par la signature d'une convention entre :

- le partenaire du site (Centre Hospitalier de Bourbon-Lancy pour ce rapport)
- et le BRGM.

Chaque partenariat débute par une réunion de démarrage. Pour le site de Bourbon-Lancy, celle-ci a eu lieu le 10 mai 2011. Elle a permis de présenter le projet PRESCRIRE, de confirmer le traitement des données de pompage comme objectif des investigations complémentaires à mener sur ce site, de faire le point sur les données disponibles et de visiter le site.

Les actions suivantes ont été ensuite entreprises :

- compilation et synthèse de l'ensemble des données disponibles concernant les divers domaines en lien avec le projet (géologie, hydrogéologie, occupation du sol, environnement, sensibilisation, réglementation) ;
- mission de terrain pour visiter le site du forage dans lequel le pompage d'essai est à interpréter ;
- rédaction du rapport d'étude du site de Bourbon-Lancy et présentation de l'analyse du site en réunion de restitution des résultats, notamment des résultats liés à l'étude des pompes d'essai.

Le présent rapport constitue le produit livré de l'étude du site de Bourbon-Lancy.

Après cet avant-propos, dont l'objectif est de préciser le contexte de réalisation de l'étude du site de Bourbon-Lancy, les deux chapitres qui suivent sont, avant une conclusion générale, une présentation des données disponibles pour qualifier le site de Bourbon-Lancy quant à la préservation de la ressource et la protection du gisement, puis une présentation des apports spécifiques du site de Bourbon-Lancy au projet, compte tenu des investigations complémentaires qui ont pu être réalisées.

2. Le site de Bourbon-Lancy

2.1. PRESENTATION GENERALE DU SITE DE BOURBON-LANCY

2.1.1. Contexte géographique

Bourbon-Lancy est une petite cité médiévale au Sud-Ouest de la Bourgogne. Elle est située à l'extrémité ouest du département de Saône-et-Loire, à la limite avec l'Allier et la Nièvre. La Loire se trouve à 3 kilomètres. Bourbon-Lancy est surtout connue depuis l'Antiquité pour ses eaux thermales qui, des Romains aux curistes du XXI^e siècle, soignent les rhumatismes (cf. illustration 3).

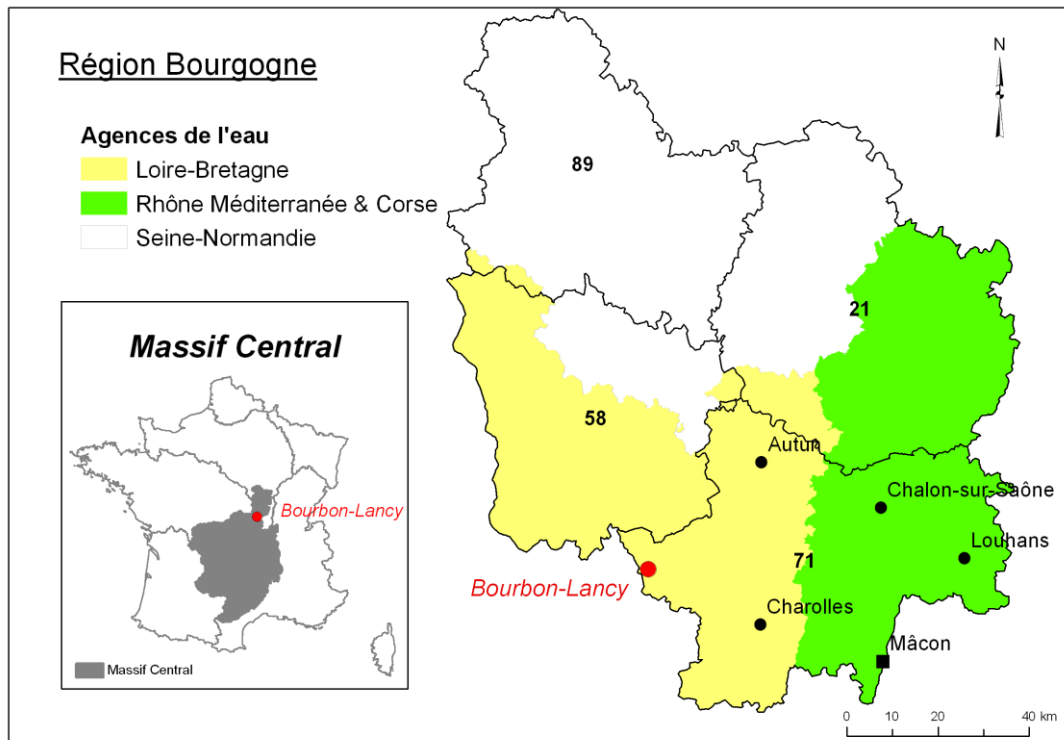


Illustration 3 : Localisation de la commune de Bourbon-Lancy

La commune de Bourbon-Lancy compte 5400 habitants (donnée 2007) pour une superficie de 55 km².

2.1.2. Contexte économique

L'activité thermique du site de Bourbon-Lancy peut, sommairement, se résumer par les deux informations suivantes :

- nombre de curistes : 2800 curistes en 2010 (données CNETh) ;
- période de la saison des cures : de mai à septembre.

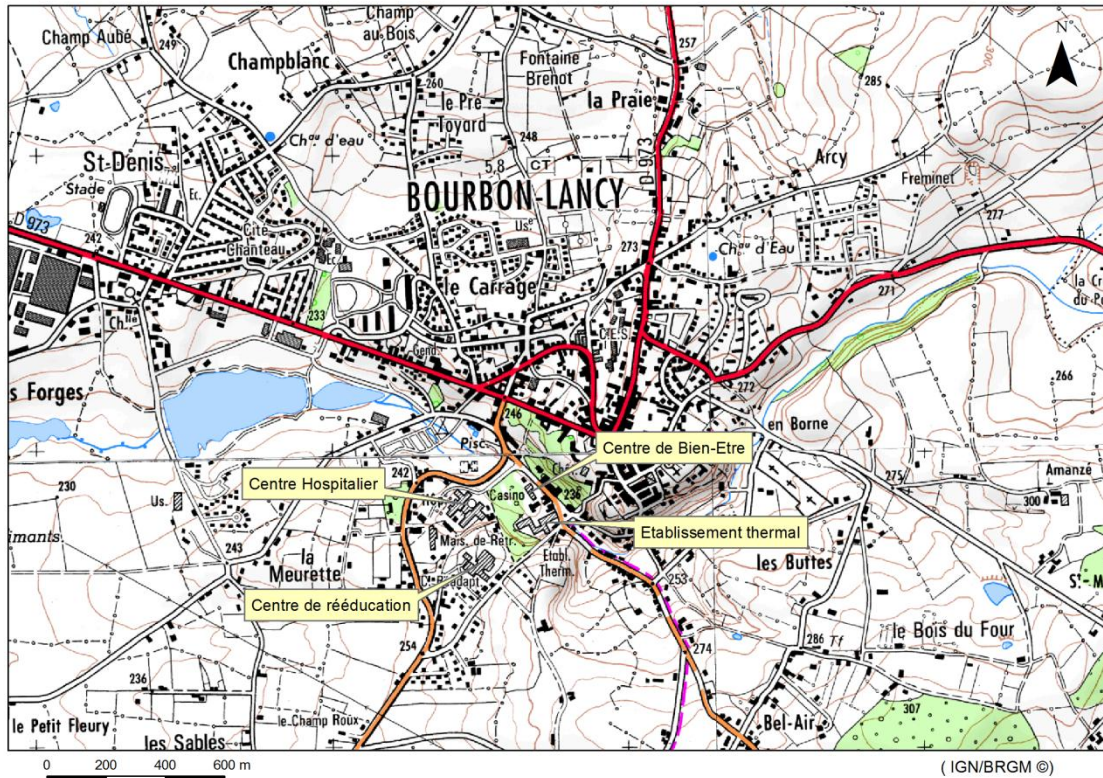


Illustration 4 : Carte de situation des différentes activités

Les activités thermales et associées se situent à proximité du centre hospitalier (cf. illustration 4).

2.2. CONTEXTES GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

2.2.1. Contexte géologique

Les sources thermales de Bourbon-Lancy se situent sur une zone faillée en limite du socle du Massif Central (ici socle morvandiau) et du fossé de la Loire. Les failles bordières principales du fossé sont orientées N-S à N20°E et sont accompagnées de failles secondaires orientées d'une part N60°E et d'autre part N120°E à N135°E. Le compartiment soulevé (socle) se situe côté est de la zone faillée et est constitué d'une série sédimentaire plissée d'âge stéphano-dévonien (grés, siltites). Le compartiment abaissé (fossé de la Loire) se situe côté ouest de la zone faillée et est occupé par une série sédimentaire horizontale d'âge miocène-oligocène essentiellement argileuse mais avec quelques niveaux sableux (Illustration 5).

Selon les données disponibles (cf. rapport BRGM 88/SGN/099/BOU), le bassin d'alimentation des eaux thermales de Bourbon-Lancy se situe côté Morvan, à l'Est de la zone des émergences, dans un secteur qui a été délimité selon les indications de la carte présentée par l'illustration 5.

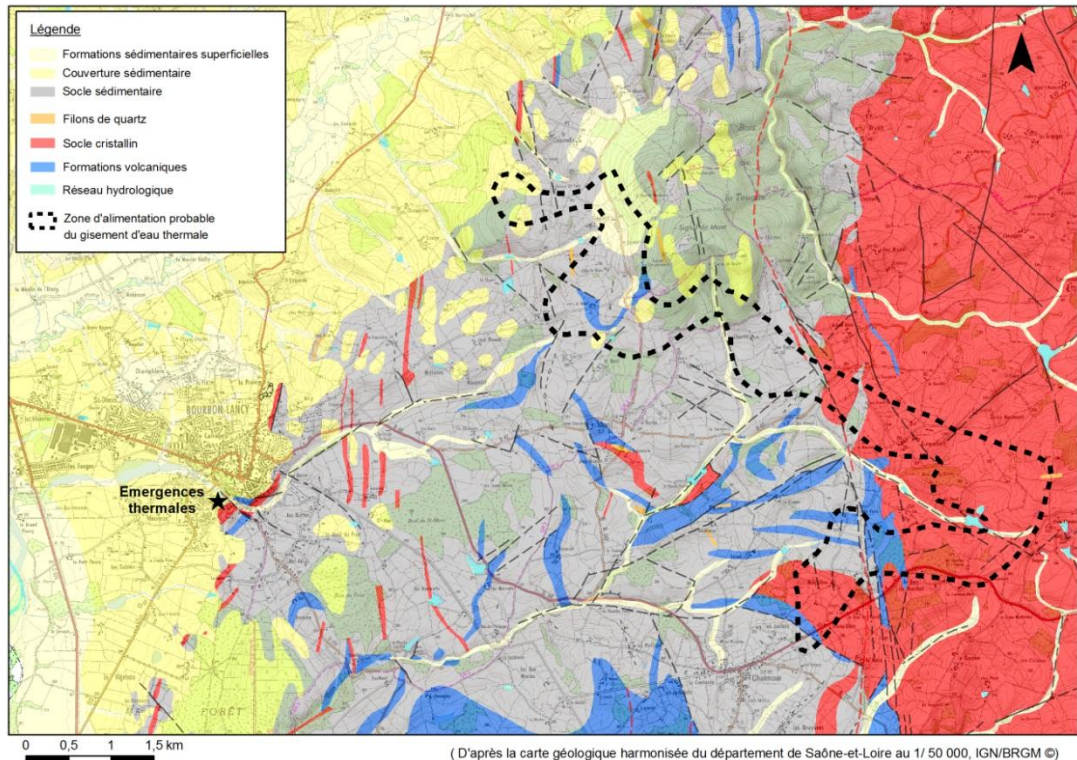


Illustration 5 : Contexte géologique du secteur de Bourbon-Lancy

Cette situation géologique régionale peut être précisée au niveau local. Les émergences sont localisées précisément sur une faille orientée N60°E marquée par un filon de microgranite injecté de quartz et de fluorine ; ce filon affleure à 13 m seulement de la source de Lymbe. L'eau thermale, depuis son gisement profond, remonte le long de cette faille puis, à quelques mètres sous la surface, traverse des formations récentes de recouvrement où elle subit un léger mélange avec les eaux contenues dans ces formations, c'est du moins le cas pour la source de Lymbe. Les 3 forages vont chercher l'eau thermale en profondeur, dans le socle fracturé qui est atteint à 25 m pour Piotot, 20 m pour Marquise et 34 m pour Sévigné. Le socle atteint par les forages, où les venues d'eau thermale ont été bien localisées, est constitué de microgranite et de roche broyée.

En 2008-2009, un forage profond a été réalisé dans le parc de l'établissement thermal à environ 200 m au Nord-Ouest des sources. Ce forage avait un but géothermique. Sous des formations argileuses avec d'assez nombreux passages de sables ou de graviers, il a atteint le socle à la profondeur de 226 m et a été poursuivi jusqu'à 283 m ; là aussi, le socle est constitué de microgranite fissuré. La coupe de ce forage est donnée par l'illustration 6. Un pompage d'essai de longue durée a été réalisé du 16 novembre 2010 au 23 février 2011 au débit de 9 m³/h. Le débit naturel total des 4 sources thermales, durant toute la durée de ce pompage, a montré une diminution sensiblement égale au débit pompé sur le forage profond. Ceci montre que ce forage recoupe vraisemblablement les principaux drains ascendants des eaux thermales. Par ailleurs, l'eau pompée sur le forage a montré une température très constante de 60 °C.

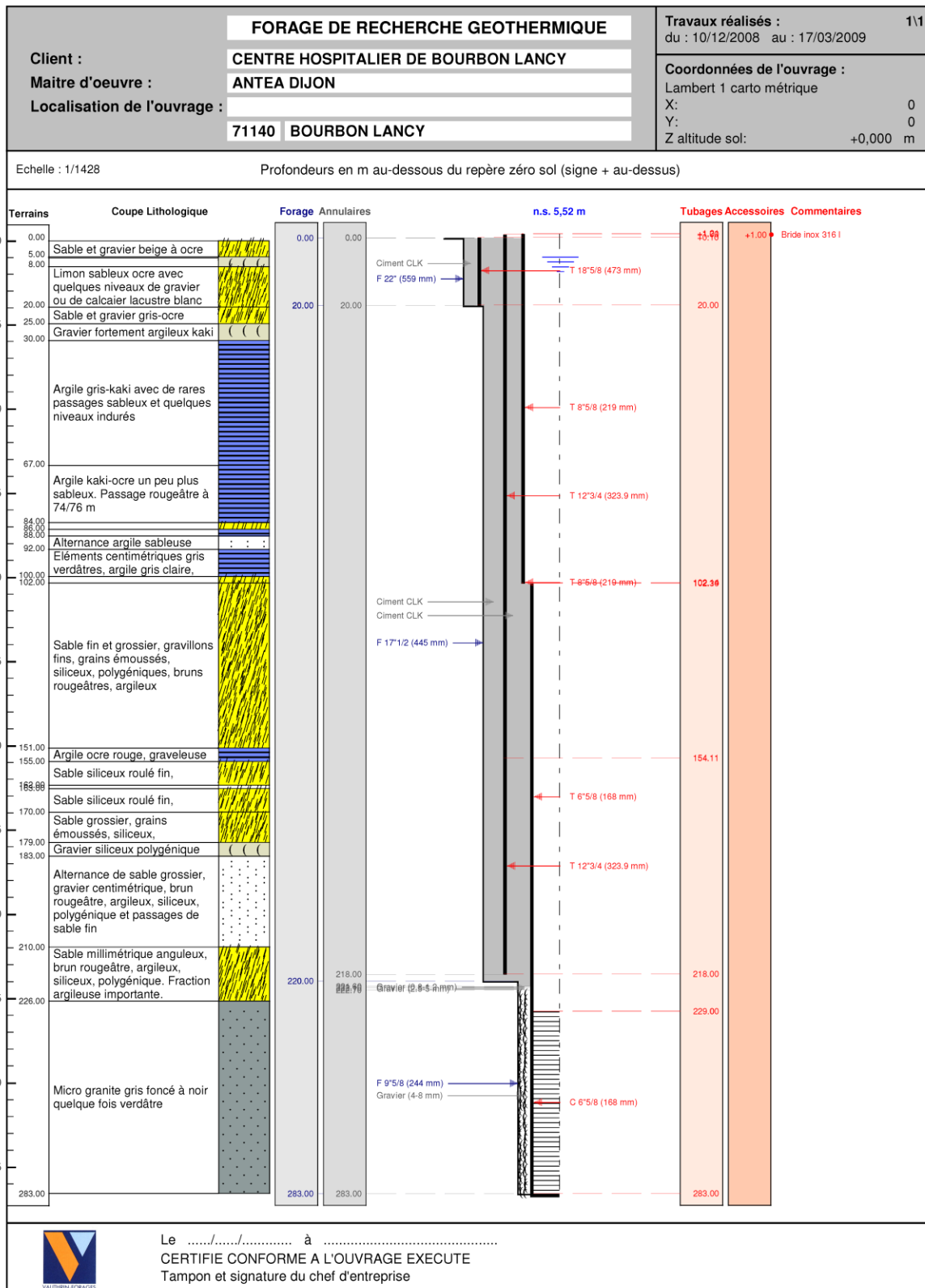


Illustration 6 : Coupe du forage géothermique 5992X0061 (données Vauthrin Forages)

Les différents forages réalisés sur le site (les 3 forages d'eau thermique et le forage profond de 2008-2009) montrent bien l'enfoncement rapide vers l'Ouest du socle morvandiau sous les formations tertiaires du fossé de la Loire (tableau de l'illustration 7 ci-dessous).

Forage	Distance forage / affleurement du filon de microgranite (en m)	Profondeur du toit du socle (en m)	Cote NGF du toit du socle (en m)
Forage source Marquise	16	20	213
Forage source Piatot	20	25	208
Forage source Sévigné	25	34	199
Forage profond 2008-2009	200	226	10

Illustration 7 : Tableau de la position relative des forages par rapport au socle

A partir de l'ensemble des données recueillies sur le site de Bourbon-Lancy, on peut dresser le schéma ci-dessous du gisement thermal de Bourbon-Lancy (cf. illustration 8).

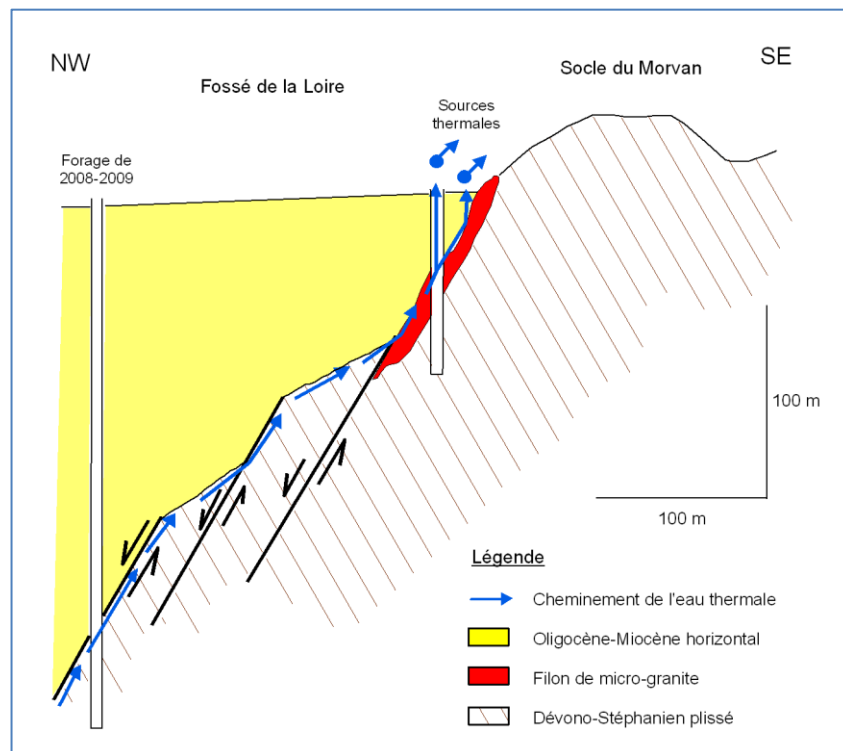


Illustration 8 : Schéma géologique du gisement thermal de Bourbon-Lancy

Sur le schéma géologique de l'illustration 8, on peut s'interroger sur la prolongation en profondeur du filon de microgranite.

2.2.2. Contexte hydrogéologique et circuit hydrominéral

Le contexte hydrogéologique et le circuit hydrominéral sont décrits sur la base de la géologie du site et des analyses chimiques et isotopiques de l'eau des sources. Cette description reprend principalement les conclusions du rapport BRGM 88 SGN 099 BOU.

a) L'impluvium

Les teneurs en deutérium des eaux thermales indiquent un bassin d'alimentation à peine plus élevé que Bourbon-Lancy (une centaine de mètres au plus), donc situé côté Morvan, dans le secteur de Chalmoux et du signal du Mont (cf. illustration 5).

b) La zone de transit

Les teneurs en tritium des sources thermales ne sont pas détectables (en 1988), ce qui laisse supposer des temps de circulation dans le sous-sol relativement longs, de l'ordre de 25 à 30 ans.

Les températures atteintes en profondeur sont estimées entre 120 et 250 °C selon les géothermomètres chimiques utilisés :

Na-K => 160 °C / Na-K-Ca => 168 °C / Na-Li => 250 °C / SiO₂ => 120 °C

c) La zone d'émergence (cf. illustration 9)

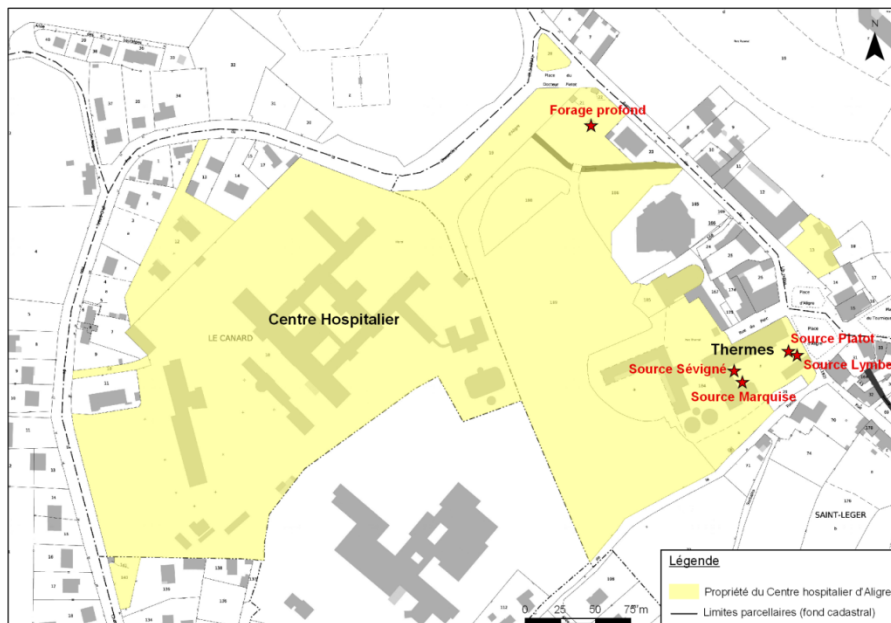


Illustration 9 : Situation des émergences aux alentours de la station thermale

Dans la zone d'émergence, le dispositif d'exploitation de la ressource, qui dispose d'un plateau technique de suivi qualité (cf. illustration 10), est constitué des ouvrages suivants :

- trois forages artésiens de profondeur variant de 34 à 57 m, réalisés en 1959 : les sources Sévigné (nommée autrefois Source Reine), Marquise et Piatot ;
- la source artésienne dénommée Lymbe.



Illustration 10 : Equipement de suivi qualité des ouvrages exploités

2.3. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU THERMALE

Les eaux thermales de Bourbon-Lancy ont un faciès chimique principalement chloruré-bicarbonaté sodique avec une minéralisation importante qui atteint 1.8 g/l ; cette forte minéralisation permet de les distinguer des eaux peu profondes issues du granite et très peu minéralisées (10 fois moins environ).

Les sources thermales :

- ont des compositions chimiques extrêmement voisines, les teneurs en sodium variant de moins de 2 % et celles des chlorures de 6 % au maximum ;
- ont des teneurs en lithium et en bore importantes (entre 1.8 et 4.6 mg/l) ;
- contiennent du brome, du fluor, de l'arsenic et du strontium.

La composition chimique de l'eau du forage est totalement similaire à celle des sources (cf. illustrations 11 et 12 et annexe 2).

Point d'analyse	Source Lymbe	Forage Marquise	Forage Piatot	Forage Sévigné	Forage géothermique
Document de référence	Annales des Mines 1998				Pompage de qualification
Date de référence	22/04/1997	22/04/1997	22/04/1997	22/04/1997	03/03/2011
T° C	53,2	57,9	58,4	59,6	60
Conductivité (µS/cm)	2960	2970	2950	2980	2920
Ca (mg/l)	71,7	71,3	70,7	71,7	73,5
Mg (mg/l)	2,9	2,9	2,9	2,8	2,8
Na (mg/l)	520	507	505	530	527
K (mg/l)	37,2	36,5	37	35,5	37
SO4 (mg/l)	81,2	81	81,4	81,3	79,3
Cl (mg/l)	786	761	765	788	738
HCO3 (mg/l)	256	258	256	259	261
SiO2 (mg/l)	70,5	70,6	70,5	70,5	69,7

Illustration 11 : Composition physico-chimique des eaux du site (extraits d'analyses de référence et essai de qualification)

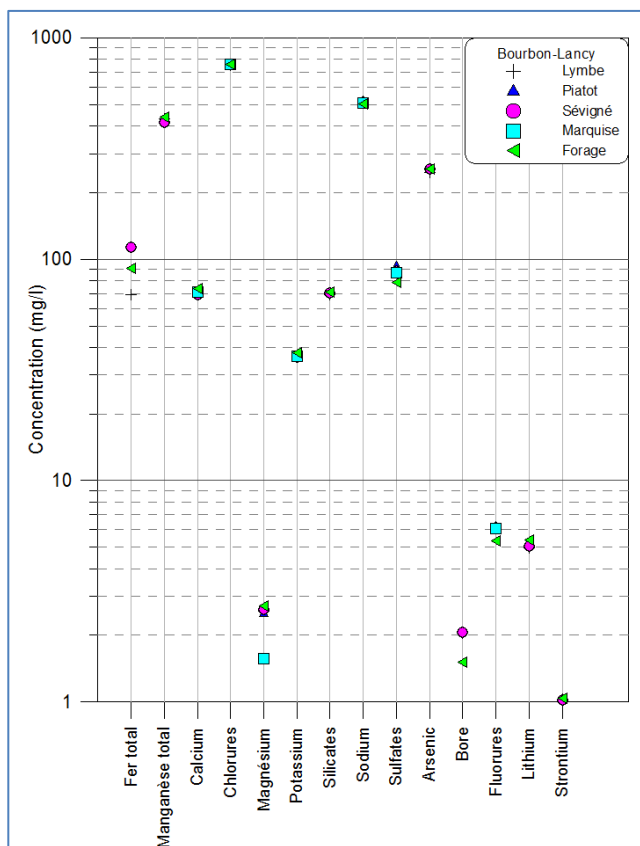


Illustration 12 : Comparaison du chimisme des eaux des sources et du forage géothermique

2.4. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

2.4.1. Données générales du secteur de l'impluvium

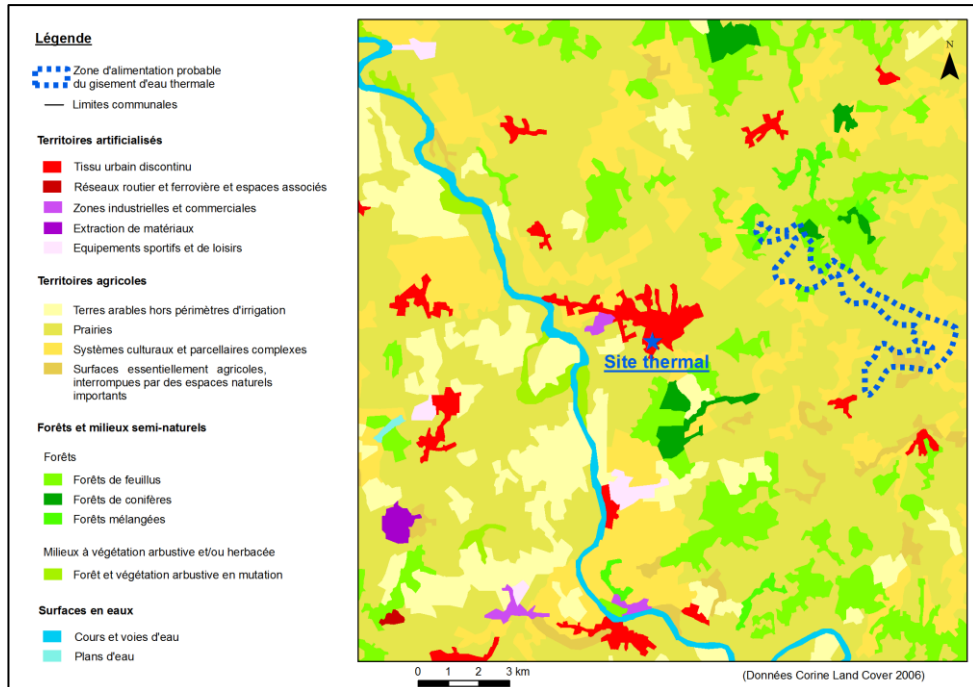


Illustration 13 : Occupation du sol sur le secteur de l'impluvium

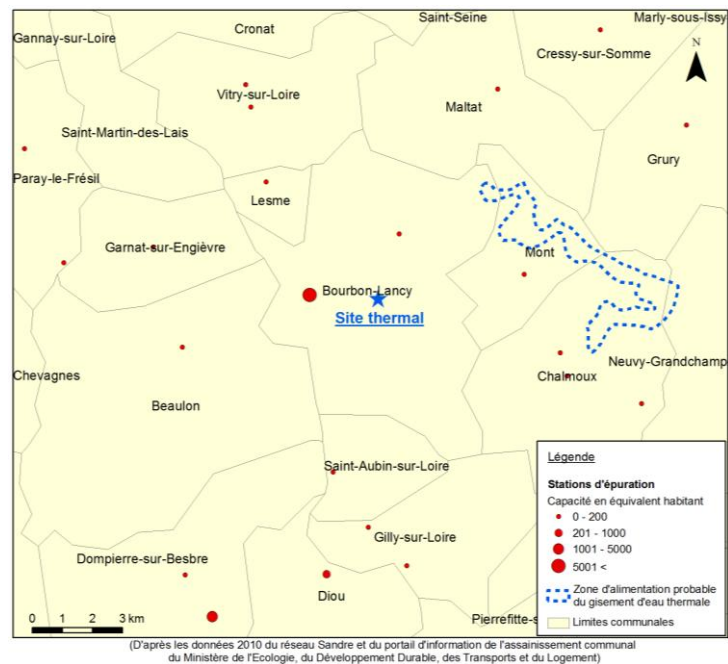
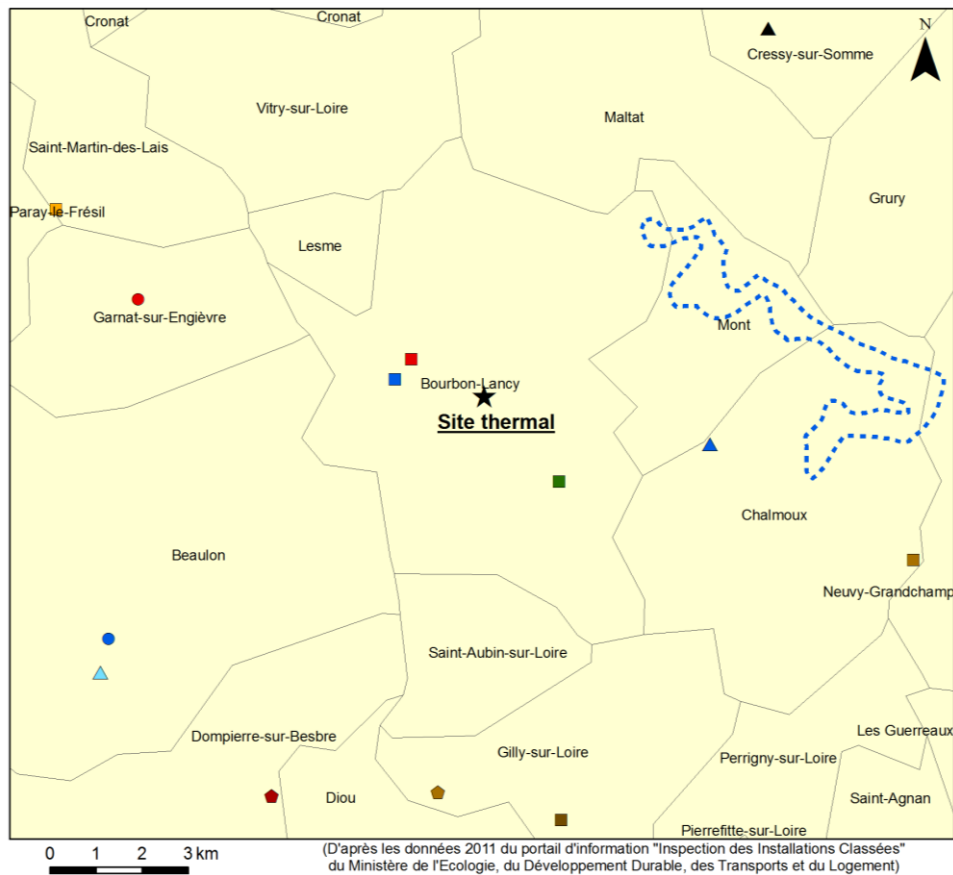
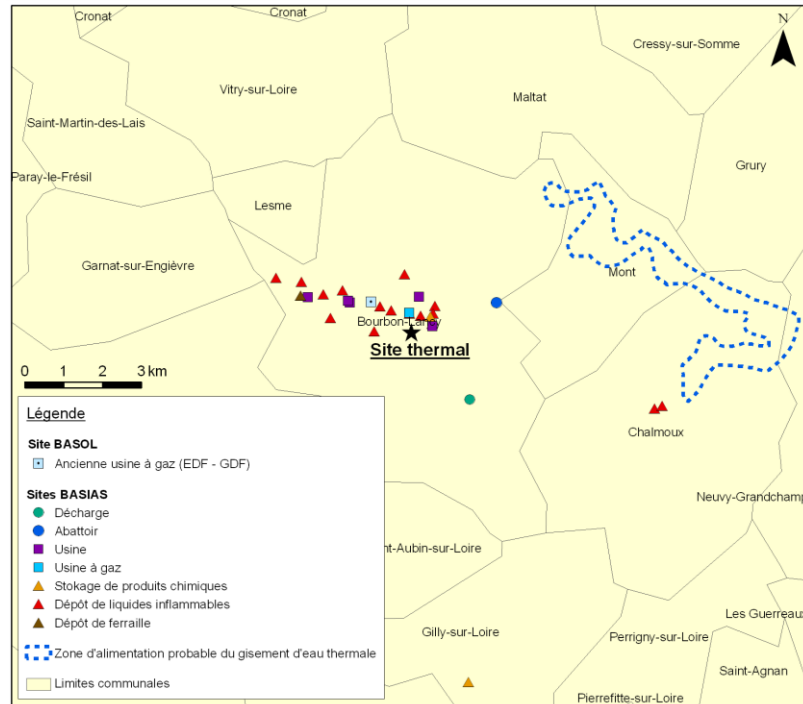


Illustration 14 : Localisation des stations d'épuration dans le secteur de Bourbon-Lancy



Légende	
IC PE	
●	GAEC Grataloup : élevage de bovins (100 animaux-équivalents)
●	SCEA du Pere Hibou : élevage de chiens (556 animaux-équivalents)
⬮	PSA Peugeot Citroën : Fonderie (équipements automobiles)
⬮	Auto-Pieces 71 : casse automobile
■	Coopaca : stockage de céréales
■	Co de Co du canton de Bourbon-Lancy : collecte et traitement d'ordures ménagères
■	Recuperation De Macedo : récupération de ferraille
■	Purfer : récupération de ferraille
■	FPT - Powertrain Technologies France SA : fabrication de moteurs diesel
■	EDF-GDF : dépôt de gaz combustibles liquéfiés
▲	Imerys Ceramics France : carrière d'argile
▲	SA Georges Bouhet : carrière à ciel ouvert de schistes
▲	Société Carrières de Cressy : carrière (schistes, roches éruptives et volcaniques)
⋯	Zone d'alimentation probable du gisement d'eau thermale
□	Limites communales

Illustration 15 : Installations classées situées dans les alentours de Bourbon-Lancy



(D'après les données disponibles dans la Base de données des Anciens Sites Industriels et Activités de Service, BASIAS, et la base de données des sites pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif BASOL)

Illustration 16 : Localisation des sites répertoriés dans les bases de données BASIAS et BASOL dans le secteur de Bourbon-Lancy

Nota : Pour quelques sites répertoriés dans la base de données BASIAS, les coordonnées géographiques ne sont pas disponibles. La liste des sites illustrée par la carte précédente peut ne pas être exhaustive.

Les données des illustrations 13 à 16 traduisent l'absence de risque environnemental sur le secteur de l'impluvium.

2.4.2. Données générales au voisinage du quartier thermal

a) Contexte urbain

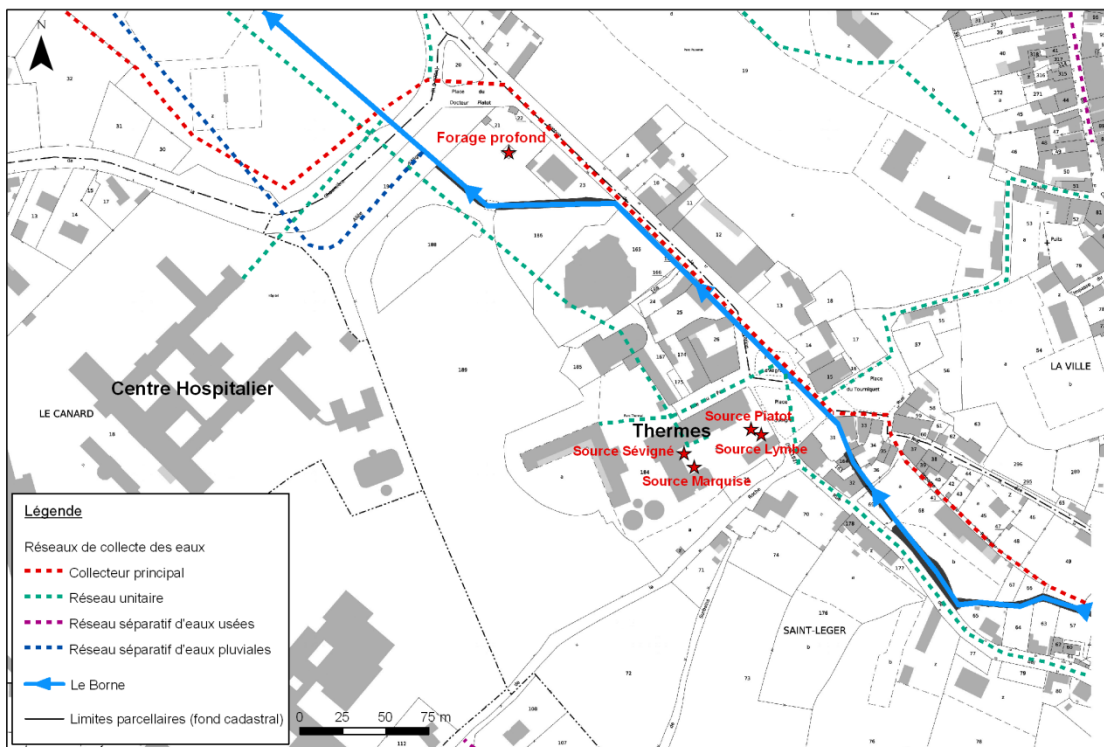
De par leur localisation géographique, les sources thermales de Bourbon-Lancy peuvent être exposées à certaines pollutions d'origine anthropique. En effet, ces dernières sont situées dans un point bas de la ville. Le contexte urbain alentour représente un risque de pollution pour la ressource thermale, par l'intermédiaire des émergences existantes. Les pressions anthropiques sont d'autant plus fortes pendant la période d'activité thermique (avril-octobre), durant laquelle la population de Bourbon-Lancy augmente.

Les principales sources potentielles de pollution, associées à l'urbanisation, sont listées ci-après :

- les réseaux de communication, en particulier le réseau routier (D192) et les zones de parking qui sont des lieux privilégiés pour la présence d'huiles et d'hydrocarbures ;

- les installations liées à la collecte des eaux et à l'assainissement. Les réseaux de canalisations et les déversoirs d'orage peuvent constituer, en cas de fuite, des sources de pollution bactériologique.

L'ensemble du quartier thermal est relié au réseau d'assainissement communal. La station d'épuration de Bourbon-Lancy, située à environ 2,5 km des thermes, ne présente pas, à priori, de risque de contamination pour les émergences exploitées. Les tracés des différents réseaux de collecte des eaux sont présentés sur l'illustration 17 ci-après.



(D'après le rapport "Profil de la zone de baignade du plan d'eau de Breuil - Janvier 2011", données issues du Diagnostic d'assainissement - Saunier Environnement - 2004)

Illustration 17 : Réseaux de collecte des eaux dans le secteur du quartier thermal

b) Hydrographie

Le Borne est un cours d'eau temporaire (cf. illustrations 18 et 19) qui traverse la ville de Bourbon-Lancy et plus particulièrement le quartier thermal. Dans ce secteur, le ruisseau est en grande partie chenalisé ou busé. Il draine un bassin versant d'une superficie d'environ 12 km², constitué à 87 % de prairies et de terres agricoles dans la partie amont de Bourbon-Lancy (d'après le rapport Safeg N° 10CLE017).

Le lit du ruisseau temporaire Le Borne n'est situé qu'à environ 30 m du nouveau forage (cf. illustration 18).



Illustration 18 : Lit du ruisseau temporaire Le Borne (à environ 30 m du nouveau forage)

Cet affluent de la Loire peut constituer un vecteur de pollution, notamment lors de crues liées à des événements orageux importants. En effet, un mélange avec des eaux superficielles telles que celles du Borne altérerait la qualité naturelle de l'eau thermale, notamment sur le plan bactériologique, ainsi que ses vertus thérapeutiques.

En juillet 2007, le quartier thermal fut en partie inondé à la suite de fortes pluies, mais les captages thermaux n'ont heureusement pas été atteints par les eaux du Borne.

Le bureau d'études Safege a réalisé en 2010 une étude hydraulique sur le Borne (cf. rapport Safege N° 10CLE017). Cette étude a permis d'estimer, grâce à un modèle informatique, les zones inondables liées aux crues du cours d'eau.

Ce modèle a pris en compte de nombreux paramètres tels que les observations faites lors de la crue de 2007, la pluviométrie, la topographie et les paramètres hydrauliques du Borne. Les zones inondables délimitées à la suite de cette étude sont présentées sur l'illustration 19.

L'illustration 19 permet d'apprécier la vulnérabilité des captages exploités pour l'activité thermale, face aux crues du Borne, notamment lors des crues centennales.

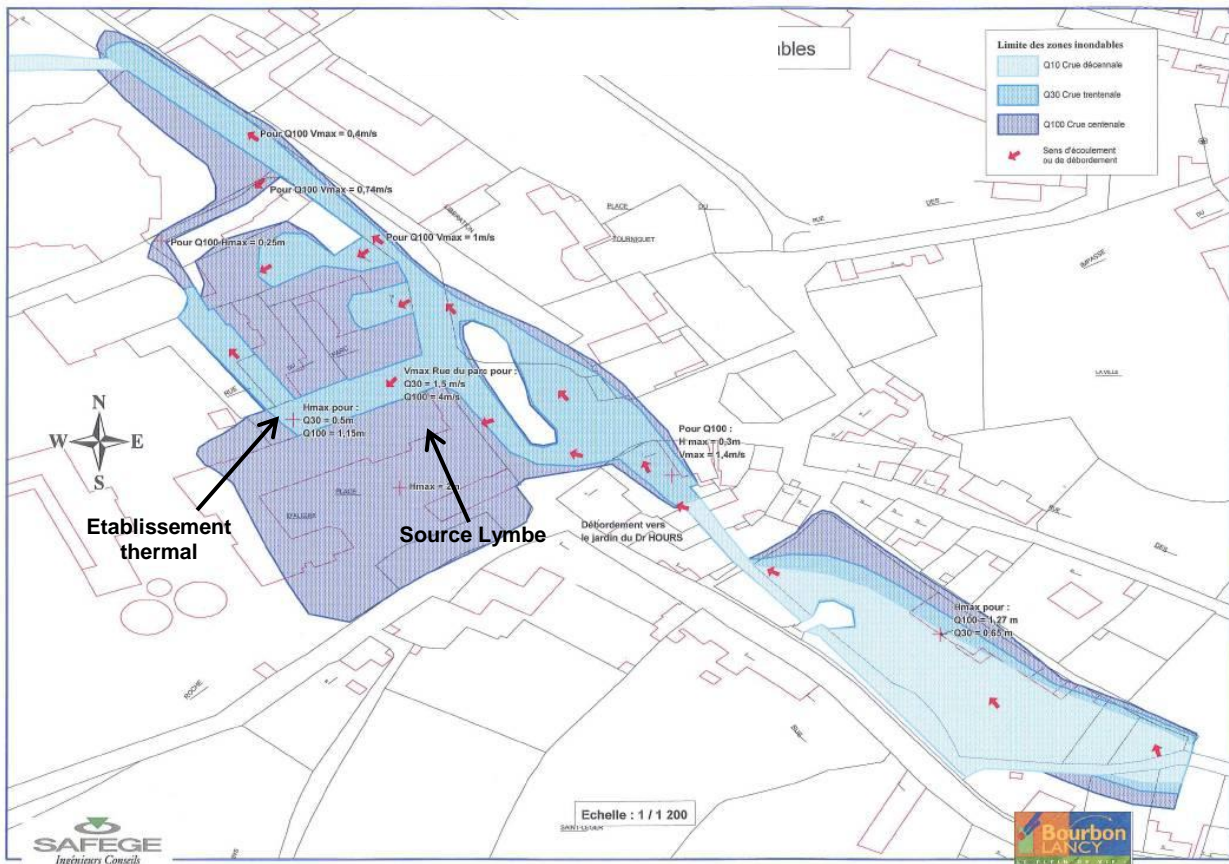


Illustration 19 : Carte des zones inondables associées aux crues du Borne (document Safege)

Pour protéger les sources lors de ces événements, il existe plusieurs moyens techniques tels que la création de bassins de rétention ou la mise en place de pièges à flottants.

Dans le cas de Bourbon-Lancy, les solutions retenues par la commune ont été l'installation de batardeaux et d'un piège à flottant, ainsi que la création de 2 bassins de rétention.

2.5. COMMUNICATION/SENSIBILISATION

Il n'existe pas d'action spécifique de communication à l'attention des habitants du secteur (en particulier sur le secteur présumé de l'impluvium) sur la nécessité de préserver la ressource et d'agir avec précaution, du point de vue environnemental, lorsque des projets (aussi divers soient-ils) sont engagés dans les secteurs sensibles.

2.6. ASPECT REGLEMENTAIRE

2.6.1. Au niveau de l'impluvium

a) *Protection liée aux dispositions du patrimoine naturel*

Un inventaire du patrimoine naturel français a été effectué par le Muséum national d'Histoire naturelle. Celui-ci a donné lieu à la délimitation de zones géographiques en fonction de la richesse du patrimoine naturel qu'elles possèdent. Les objectifs d'une telle délimitation sont de mieux connaître le patrimoine français et de le protéger par une gestion adaptée des milieux naturels et des paysages.

Le secteur de l'impluvium du gisement hydrothermal de Bourbon-Lancy (précédemment défini) est concerné par 3 types de zones (cf. illustration 20). La couverture géographique de ces zones est présentée par l'illustration 21.

Type d'entité	Nom de l'entité	
Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique (ZNIEFF)	type 1	Bois de Breuil ; La Loire aux Consouls ; Les Grands Verziaux ; La Loire à Saint-Aubin ; Signal de Mont ; Bois de Serre ; Etang de Garnot ; Rive de Loire Garnat sur Engièvre-Ganay sur Loire- lit moyen ; La Loire à Vitry-sur-Loire ; Etang des Treffoux
	type 2	Contreforts Sud et Atlantique du Morvan ; La Loire de Digoin à Saint-Hilaire Fontaine ; Sologne Bourbonnaise
Zone d'Importance pour la Conservation des Oiseaux (ZICO)	Vallée de la Loire : Lit majeur d'Iguerande à Decize Sologne Bourbonnaise	
Site du réseau Natura 2000	type SIC	Vallée de la Loire entre Devay et Digoin ; Landes sèches et milieux tourbeux du Bois de Breuil ; Vallée alluviale de la Loire
	type ZPS	Vallée de la Loire d'Iguerande à Decize Sologne Bourbonnaise

Illustration 20 : Zones de protection réglementaire dans le secteur de l'impluvium

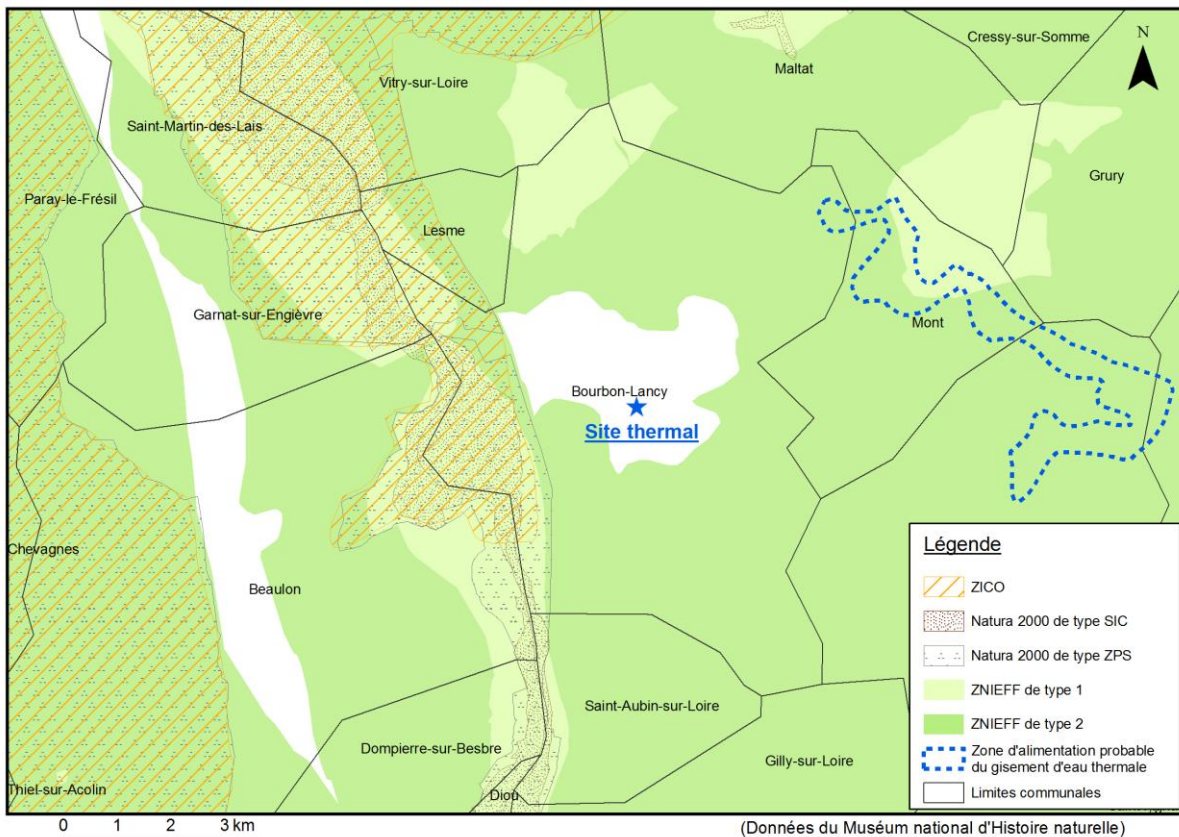


Illustration 21 : Carte des zones de délimitation du patrimoine naturel dans le secteur de Bourbon-Lancy

• Réglementation liée aux ZNIEFF

Les Zones Naturelles d'Intérêt Écologique Faunistique et Floristique (ZNIEFF) jouent un rôle d'inventaire du patrimoine naturel mais ne possèdent pas de valeur juridique directe pour la protection des espaces naturels. Ces zones constituent des outils d'aide à la décision en matière d'aménagement du territoire car elles doivent être considérées lors de la réalisation d'études d'impact et de documents d'urbanisme.

Il existe deux types de ZNIEFF :

- les ZNIEFF de type 1 sont définies (d'après les DREAL) comme des secteurs de superficie généralement limitée qui abritent au moins une espèce ou un milieu naturel remarquable ou rare (ex : loutre, tourbière...) ;
- les ZNIEFF de type 2 sont définies (d'après les DREAL) comme de grands ensembles naturels riches, peu modifiés par l'Homme ou offrant des potentialités biologiques importantes (massifs forestiers, plateaux). Les zones de type 2 peuvent inclure des zones de type 1.

• Réglementation liée aux ZICO

Les Zones d'Importance pour la Conservation des Oiseaux (ZICO), aussi appelées Zones d'Intérêt Communautaire pour les Oiseaux, abritent des espèces d'oiseaux sauvages reconnues d'importance communautaire ou européenne. Elles n'ont pas de portée juridique directe.

Certaines ZICO peuvent être désignées comme Zone de Protection Spéciale (ZPS), cette appellation permettant aux ZICO qui en bénéficient d’être intégrées au réseau Natura 2000.

- **Réglementation liée aux sites Natura 2000**

Le réseau Natura 2000 est un réseau européen qui regroupe des zones pour la conservation de certains types d’habitats naturels et certains types d’habitats d’espèces (Zones Spéciales de Conservation, ZSC) et des zones pour la conservation d’espèces d’oiseaux ciblées (Zones de Protection Spéciale, ZPS).

Pour chaque site Natura 2000, l’Etat définit des objectifs de gestion durable (revus tous les 6 ans) pour le territoire concerné. Cette gestion doit concilier la protection du patrimoine naturel classé et les activités anthropiques.

b) Protection liée à des captages AEP¹

L'alimentation en eau potable de Bourbon-Lancy provient de captages dans les alluvions de la Loire, à environ 2 km de l'hôpital. L'illustration 22 ci-après permet d'apprécier la situation relative des captages AEP du secteur de Bourbon-Lancy au regard du secteur des exploitations d'eau thermale.

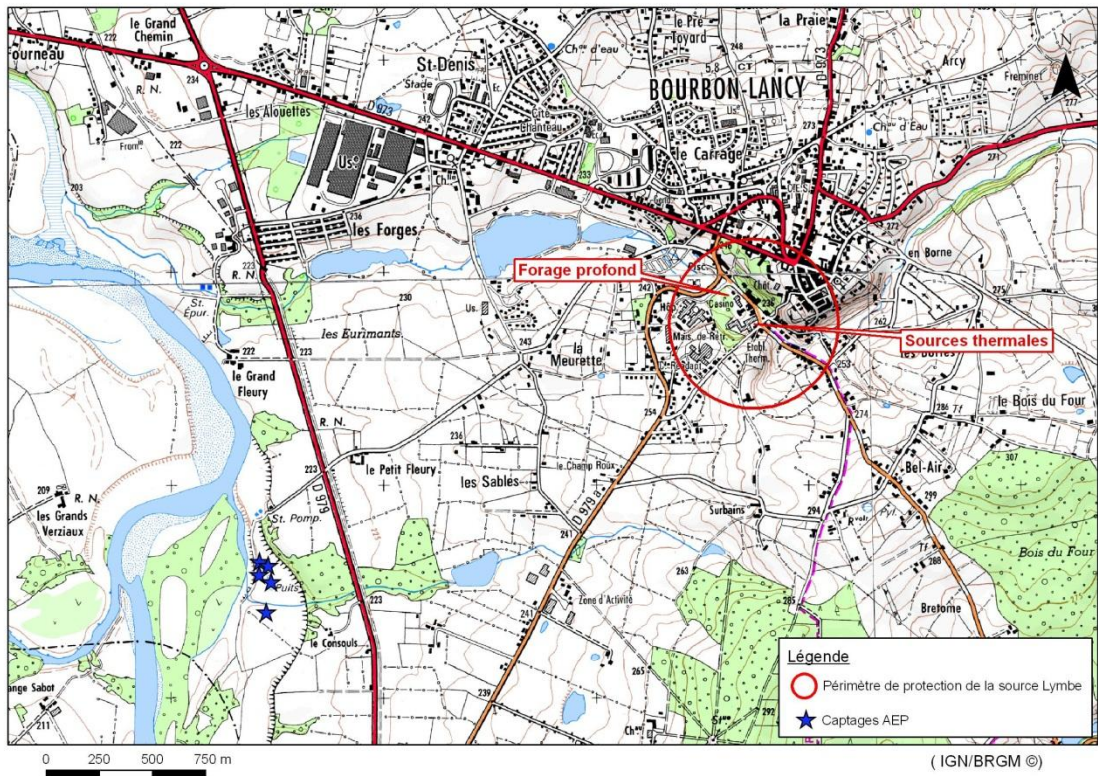


Illustration 22 : Carte de situation des captages AEP du secteur de Bourbon-Lancy

¹ AEP = Alimentation en Eau Potable

Les périmètres de protection des captages AEP de Bourbon-Lancy sont en cours de régularisation quant à la définition de leurs périmètres de protection. En l'absence de données validées au plan réglementaire, ces périmètres n'ont pas été représentés.

Néanmoins, d'un point de vue général, les informations suivantes sont intéressantes à considérer pour apprécier la protection relative d'un secteur donné en lien avec des protections mises en place pour l'AEP.

- **Réglementation liée au périmètre de protection immédiate**

Un périmètre de protection immédiate délimite une zone où toute activité est strictement interdite et où aucun produit toxique ne peut être stocké.

Un périmètre de protection immédiate est très généralement de dimension réduite (quelques centaines de m² au plus), et concerne une section de terrain situé aux alentours proches du captage.

- **Réglementation liée au périmètre de protection rapprochée**

Un périmètre de protection rapprochée délimite une zone où toutes les activités potentiellement polluantes sont interdites ou soumises à une réglementation rigoureuse. Il peut s'agir de rejets, d'épandage (compost, produits phytosanitaires, boues de station d'épuration, ...), de zones de stockage (produits dangereux), de la construction et de la modification de voies de communication, d'exploitation de matériaux ou encore de la création ou de l'agrandissement de cimetières.

- **Réglementation liée au périmètre de protection éloignée**

L'établissement d'un périmètre de protection éloignée n'est pas obligatoire. Ce périmètre peut être mis en place pour limiter les activités pouvant polluer la ressource captée, grâce à une réglementation spécifique.

Dans un périmètre de protection éloignée, aucun projet ne peut être interdit mais tout projet doit prouver qu'il ne présente pas de risque environnemental pour les captages.

2.6.2. Au niveau des émergences d'eau thermique

La source Lymbe dispose d'une protection spécifique liée à la réglementation des eaux minérales.

On distingue pour cette émergence les deux dispositifs réglementaires suivants :

- d'une part un Périmètre Sanitaire d'Emergence (PSE) défini par un Arrêté Ministériel d'Autorisation d'exploiter (AMA). L'arrêté établi pour la source Lymbe date du 7 décembre 1880 ;
- d'autre part, un périmètre de protection (DPP) établi au titre d'une Déclaration d'Intérêt Public (DIP). Ces procédures de protection (DIP et DPP associé) sont rares et peu utilisées car la décision au plus haut niveau de l'Etat (Conseil d'Etat) est difficile à obtenir. La source Lymbe bénéficie de cette procédure DIP et DPP associé depuis le 15 novembre 1914.

Le périmètre établi au titre de la DIP est un cercle centré sur la source Lymbe, de 400 m de rayon, soit une superficie de 56 ha 26 a (cf. illustration 23).

Ce périmètre englobe les forages Piatot, Marquise, Sévigné, ainsi que le nouveau forage géothermique.

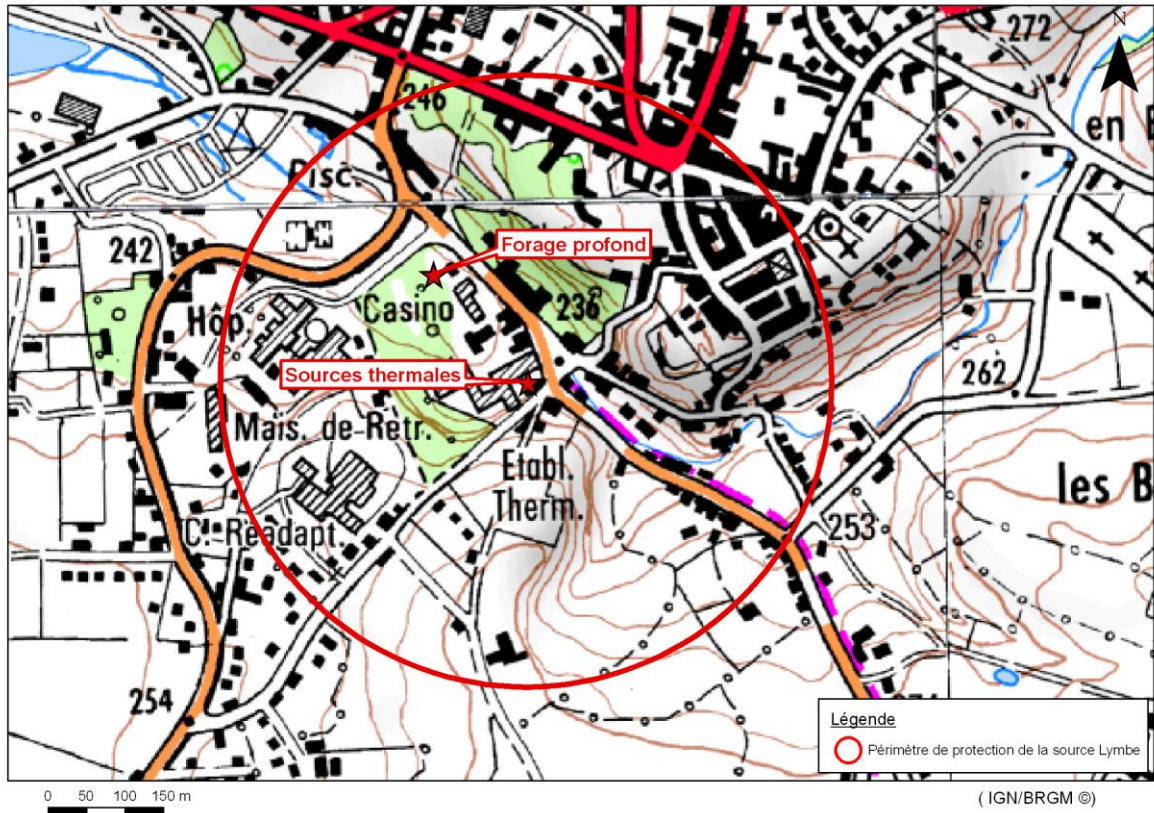


Illustration 23 : Carte de situation du périmètre de protection établi au titre de la DIP pour l'eau thermique du site de Bourbon-Lancy

3. Apport spécifique du site de Bourbon-Lancy pour le projet PRESCRIRE

3.1. NOTION D'APPORT SPECIFIQUE

Il convient de rappeler que le projet PRESCRIRE a pour objet d'apprécier les conditions de préservation de la qualité de la ressource en eau souterraine et de protection du gisement sur la base de l'analyse de plusieurs sites « test ». Le site de Bourbon-Lancy est un de ces sites « test ».

Pour chaque site « test » analysé, il a été retenu d'identifier un point fort spécifique, de manière à illustrer, à partir de l'exemple², l'intérêt de réaliser telle ou telle investigation ou de mener telle ou telle action pour faire avancer la problématique.

Divers points forts ont émergé des réflexions entreprises entre les partenaires du projet PRESCRIRE (exploitants, institutions, collectivités, équipe de projet BRGM) et les experts thématiques du BRGM (géologues, structuralistes, géochimistes ...).

La connaissance, clé de la compréhension d'un système, concerne de multiples domaines. Les experts consultés ont permis d'apporter leur expérience (de recherche notamment) à la notion de caractérisation d'un contexte hydrogéologique dans son environnement (naturel et anthropique). Quelques points forts spécifiques ont ainsi, d'ores et déjà, été listés pour guider la démarche. On citera :

- analyse isotopique pour juger de la présence ou non d'éventuels mélanges entre eaux de durées de transit distinctes (eau ancienne et eau récente),
- étude de la caractérisation structurale d'un contexte local d'émergence pour apprécier l'extension relative d'un secteur d'émergence,
- analyses chimiques pour apprécier le transit en profondeur et les conditions d'acquisition de la minéralisation (contact eau/roche),
- étude cartographique géologique à l'échelle locale pour caractériser les différents faciès (dont les niveaux d'altération) et pour relativiser le rôle des différents horizons,
- analyse en laboratoire d'échantillons de roches (microscope polarisant) pour caractériser la composition des roches et apprécier leur structure interne,
- essais d'interférence entre ouvrages par approche numérique spécifique (diagnostic, modélisation des données numériques) pour apprécier la compartimentation hydrogéologique locale (géométrie, perméabilité, flux),

² Chaque site « test » a contribué, par son implication dans la réflexion menée par le projet et financièrement à la réalisation d'investigations complémentaires (sommaires et très ciblées) destinées à illustrer une composante spécifique des notions de préservation et de protection.

- analyse physico-chimique de détail (éléments traces) du fluide exploité et calage des résultats sur le fond géochimique régional pour juger de la présence ou non d'une anomalie géochimique (naturelle) locale,
- définition de la signature isotopique élémentaire d'une ressource locale pour disposer d'éléments d'appréciation quant au secteur de recharge du gisement,
- analyse de la perception sociétale de la (des) commune (s) impliquée (s) dans un secteur à protéger pour apprécier la nécessité relative de communiquer sur la notion de protection et sur les contraintes environnementales,
- étude d'un mode de communication / sensibilisation de l'environnement humain d'un site à protéger à l'aide d'un outil de vulgarisation (plaquette),
-

Cette liste, non exhaustive, ne constitue qu'une première énumération de points forts qui pourront, très probablement, être pris en compte dans le cadre de l'analyse des sites « test », selon les particularités locales.

3.2. APPORT SPECIFIQUE DU SITE DE BOURBON-LANCY

Sur le site de Bourbon-Lancy, la réalisation d'un forage géothermique (5992X0061) a été menée entre décembre 2008 et février 2009. Ce forage et les sources de la station exploitent le même gisement thermal. Les enjeux de ce forage concernent des économies d'énergie importantes³, rendues possibles grâce à un débit de 10 m³/h à 60 °C. Par ailleurs, la contrainte absolue est de ne pas perturber le fonctionnement du centre thermal lié à la production de 4 sources. Ce forage a donc fait l'objet de pompage de qualification dans le but d'estimer un débit d'exploitation sans risque pour les sources actuellement utilisées.

Dans le cadre de PRESCRIRE, le but supplémentaire est de mieux caractériser le gisement sur le plan hydraulique à partir des données disponibles. L'interprétation précédente a donc été affinée en appliquant la méthode des dérivées et une fonction analytique représentant le fonctionnement d'un aquifère compartimenté.

3.3. DONNEES UTILISEES

Plusieurs pompages d'essai ont été réalisés dans ce forage géothermique. Les pompages suivants ont été modélisés dans le cadre du projet PRESCRIRE :

- le pompage par paliers des 25 et 26 février 2009,
- le pompage d'essai de longue durée (111 jours), commencé le 16 novembre 2010 et terminé le 1er mars 2011.

³ Ce forage sera capable d'assurer le chauffage de l'hôpital (économie estimée à 300 000 €/an) ainsi que (probablement) d'autres bâtiments dans le secteur.

Le pompage d'essai de 72 h de mars 2009 n'a pas été repris car les informations du pompage de 111 jours sont de même nature et beaucoup plus complètes du fait de la durée de l'essai.

Les descriptions de ces pompages sont extraites des rapports Antéa⁴ (54128/A d'avril 2009 et 62304 de mai 2011). Les données sont disponibles au pas de temps d'une heure. Les fichiers de données ont été transmis par Antéa et par l'établissement thermal.

3.4. TRAITEMENT DU SIGNAL

Un examen rapide des chroniques enregistrées lors des pompages d'essai montre des fluctuations régulières sur plusieurs paramètres. Celles-ci ont été étudiées sur les chroniques de niveaux dans le forage durant le pompage d'essai, de température et de conductivité (cf. illustration 24) afin de quantifier les effets périodiques et de comparer entre elles les fluctuations des différents paramètres. Ce travail préalable de caractérisation des données apporte quelques indications avant l'interprétation du pompage d'essai.

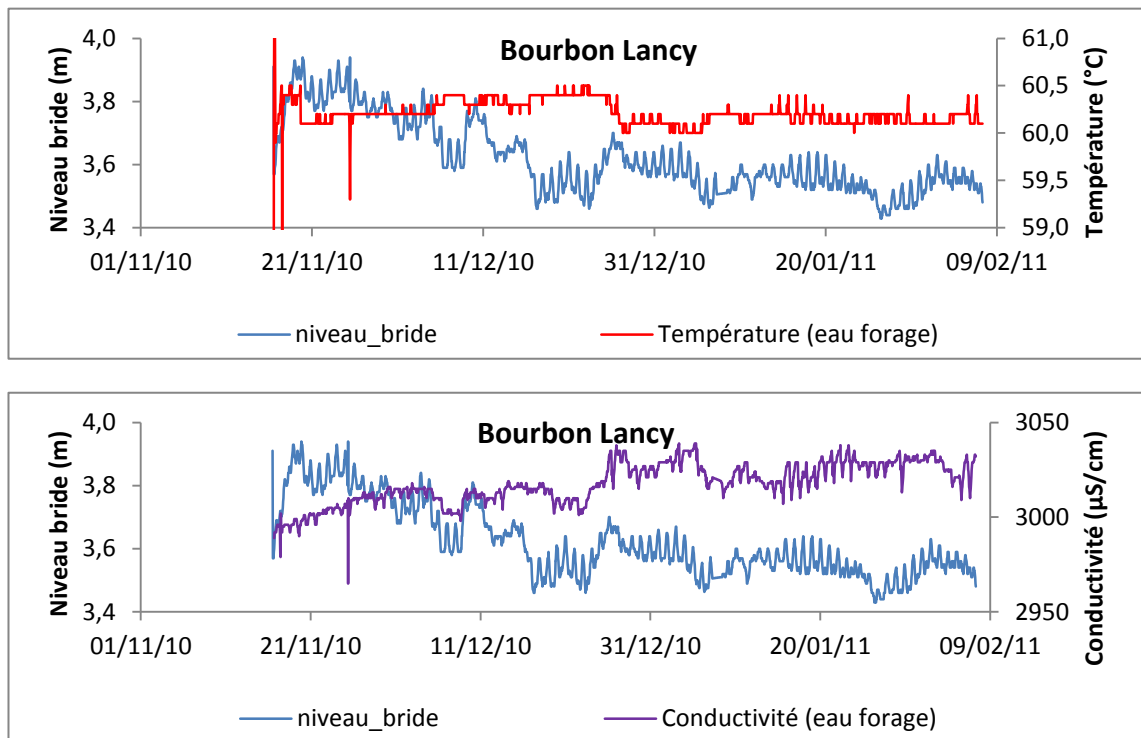


Illustration 24 : Chroniques étudiées pour le traitement du signal

Ces graphiques permettent de noter la forte stabilité de la température, même avec une diminution relative des niveaux, avec cependant, en parallèle, une relative augmentation de la conductivité pour ces mêmes variations de niveau.

⁴ Les références complètes de ces rapports sont en annexe 1.

3.4.1. Analyses spectrales

Des effets périodiques sont mis en évidence à 12 h et 24 h sur les chroniques de niveau piézométrique, conductivité et température de l'eau pompée (Illustration 25).

- ⇒ Ce phénomène concerne l'aquifère et on peut donc exclure un problème instrumental.
- ⇒ L'origine de l'effet périodique reste à élucider : il peut s'agir d'un effet barométrique sur aquifère captif et/ou d'un effet marée terrestre sur l'aquifère. Dans ce dernier cas, la perméabilité de l'aquifère serait très faible.

Les données barométriques seraient à acquérir pour poursuivre les investigations.

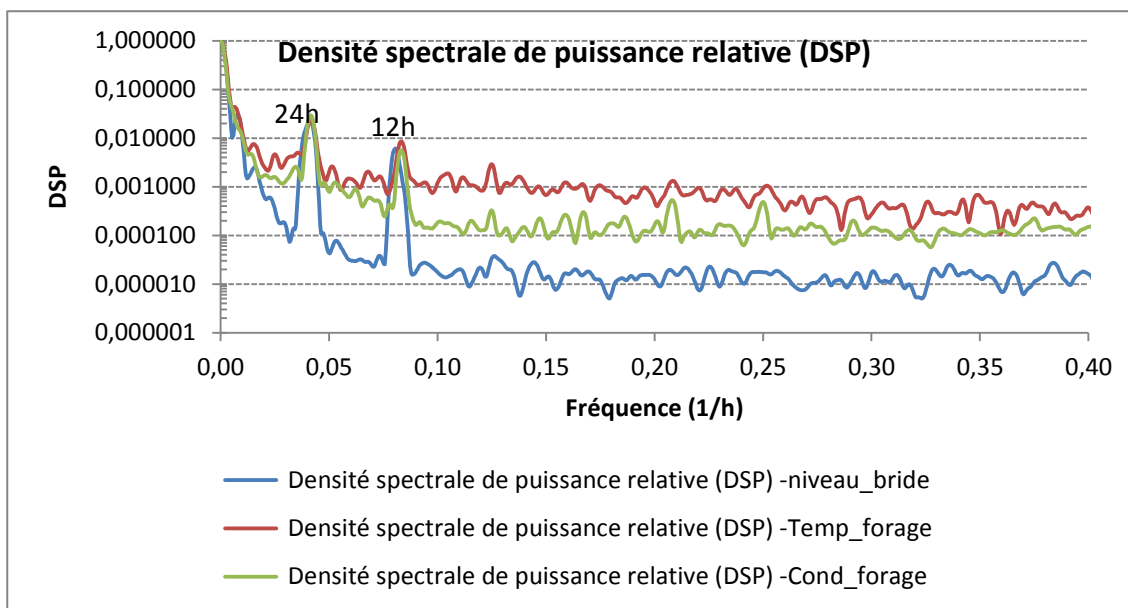


Illustration 25 : Densité spectrale de puissance relative

3.4.2. Filtrage des chroniques

Ces effets périodiques ont une cause extérieure à l'aquifère et ils masquent en partie certains aspects de son fonctionnement hydraulique : ainsi, par exemple, la baisse du niveau d'eau, suite à un pompage, sera modifiée par ces fluctuations. La technique de traitement du signal (ondelettes) permet de filtrer ce phénomène à 12 et 24 heures (utilisation d'un filtre bande passante > 25 h) et ainsi de mieux observer le fonctionnement intrinsèque de l'aquifère (cf. illustration 26).

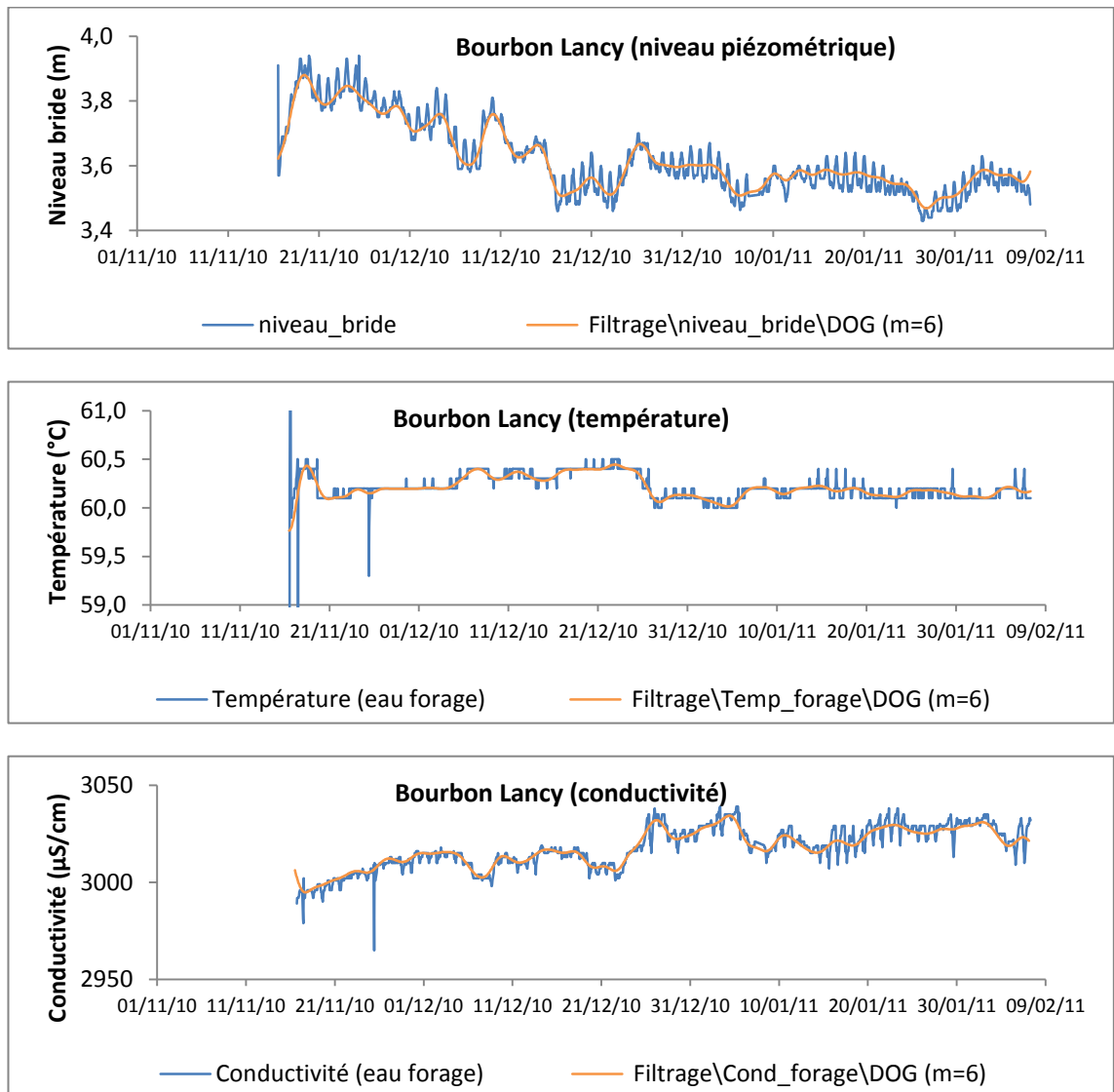


Illustration 26 : Chroniques filtrées des effets périodiques

3.4.3. Évolution de la température, de la conductivité et des niveaux d'eau

Ces chroniques lissées permettent de constater une évolution en opposition de phase de la conductivité et de la température. Les augmentations de température des eaux pompées sont accompagnées par une légère baisse de la minéralisation et inversement (cf. illustration 27).

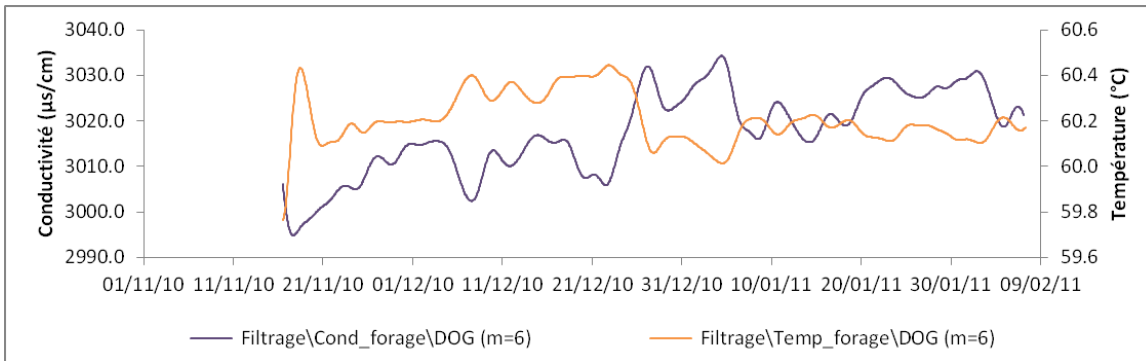


Illustration 27 : Opposition de phase entre température et conductivité

Les évolutions de conductivité et de température n'apparaissent pas vraiment contrôlées par les variations du débit de pompage (Illustration 28). Les évolutions dépendent fortement des modalités de fonctionnement de l'hydrosystème.

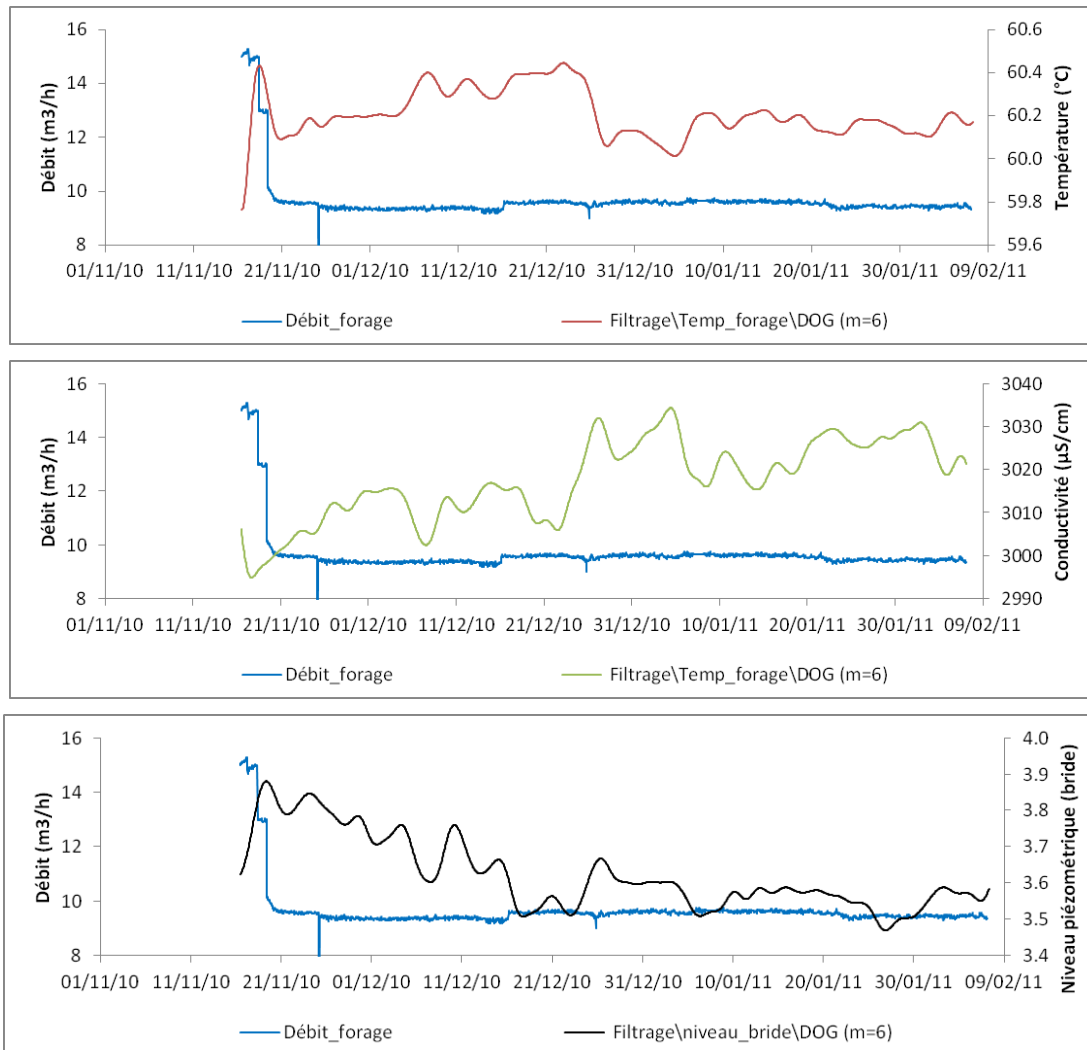


Illustration 28 : Évolution de la température, de la conductivité et du niveau piézométrique en fonction du pompage

Pour les niveaux d'eau, la baisse induite par le pompage est marquée par des fluctuations qui sont du même ordre de grandeur (à peine plus faibles) ; ce sera un facteur compliquant l'interprétation du pompage d'essai. Ces fluctuations ne sont pas les fluctuations régulières de cycle 12 et 24 heures.

3.4.4. Conclusion

L'analyse des données du pompage par le traitement du signal montre :

- un signal périodique à 12 et 24 heures dont l'origine n'a pas été définie,
- peu d'influence du pompage sur la conductivité et sur la température,
- des fluctuations de niveaux sans relation avec le pompage.

3.5. POMPAGE D'ESSAI PAR PALIERS

Le pompage par paliers permet de **caractériser le forage** sur le plan hydraulique en déterminant les pertes de charges quadratiques engendrées dans les zones de fractures et par l'écoulement de l'eau de l'aquifère dans le forage.

Cette étape, bien qu'apportant très peu d'information sur l'aquifère, permet d'estimer les pertes de charge hydraulique (équivalent à la baisse des niveaux dans le forage) dues à l'ouvrage. Celles-ci retirées des pertes de charge totales permettront d'identifier les pertes de charge dues à l'aquifère qui caractérisent le gisement.

3.5.1. Description

Le pompage d'essai par paliers a été réalisé du 25 au 26 février 2009. Les paliers de débits ont été maintenus pendant deux heures aux débits suivants :

- 10.6 m³/h,
- 25.0 m³/h,
- 36.8 m³/h,
- 52.1 m³/h.

Les périodes de pompage ont été suivies de périodes sans pompage d'au moins deux heures pendant lesquelles la remontée des niveaux d'eau a été observée (cf. illustration 29).

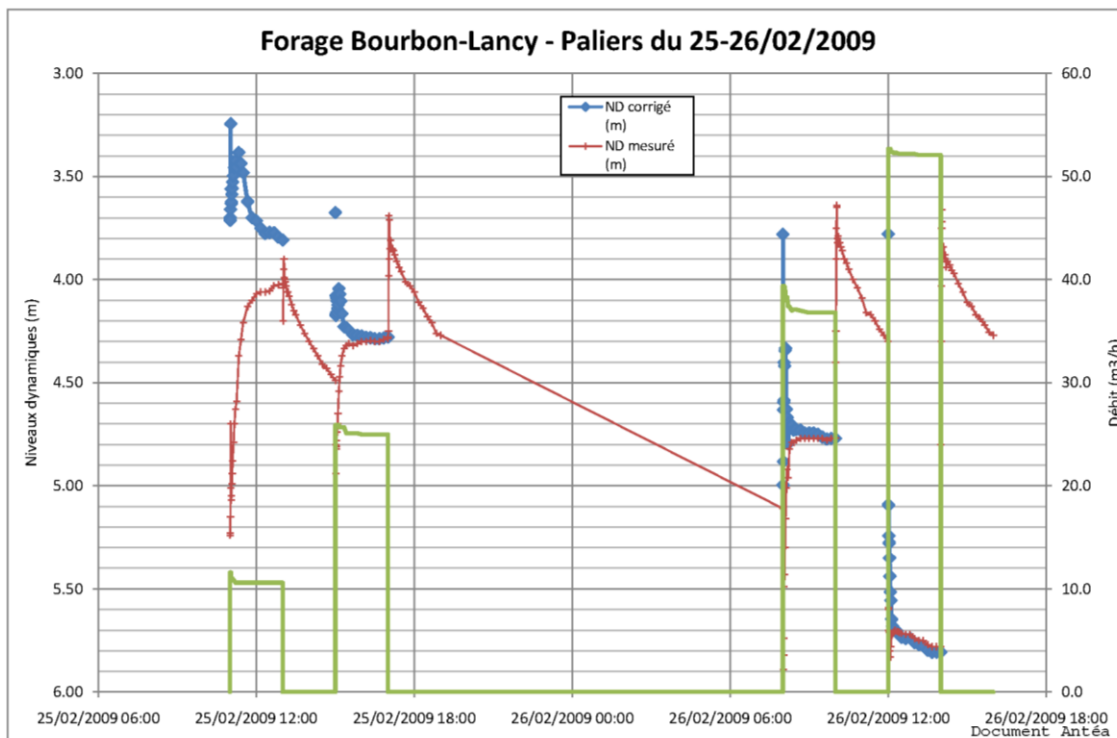


Illustration 29 : Pompage d'essai par paliers (données Antéa)

Les couples débit-rabatement sont reportés sur l'illustration 30. Le rabattement après 2 h de pompage (cf. LD_2010) de l'essai de longue durée (16/11/2010-01/03/2011) est aussi reporté sur le graphique⁵.

⁵ Le point se situe à l'extérieur de la courbe caractéristique ($s=bQ+cQ^2$) car non corrigé des effets de température.

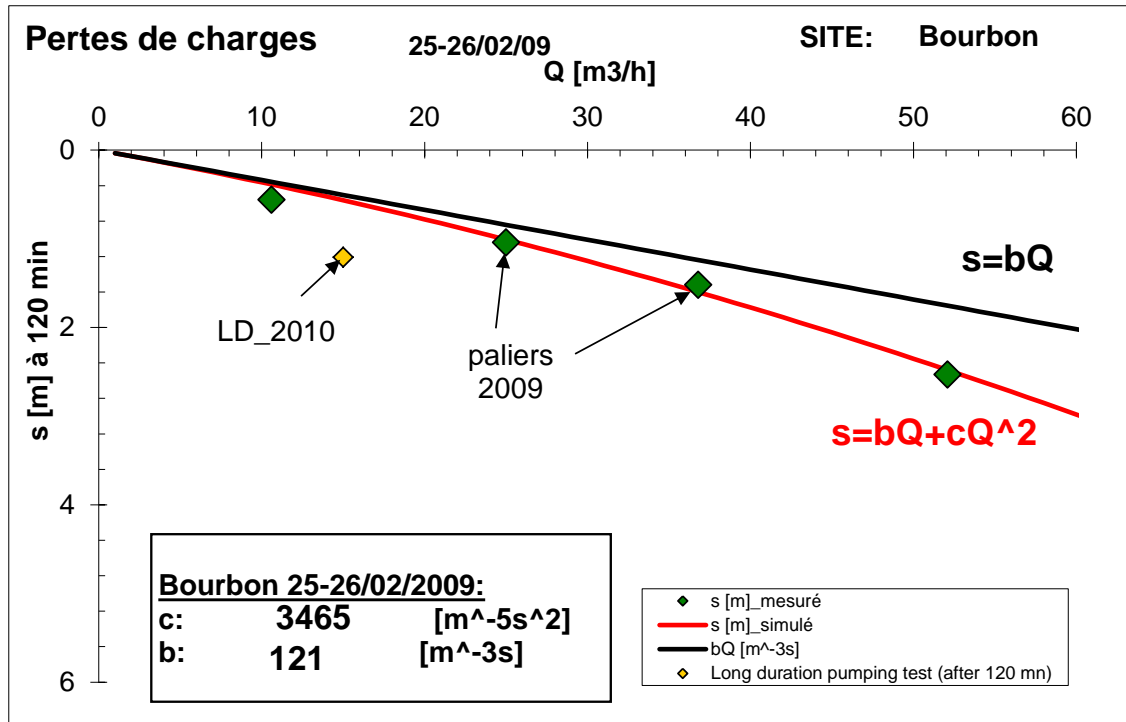


Illustration 30 : Interprétation du pompage d'essai par paliers de février 2009

3.5.2. Conclusion

Les pertes de charge s'élèvent à **3 500 m⁻⁵/s²**. C'est une valeur faible pour un milieu fracturé : elle traduit donc un échange correct entre l'aquifère et l'ouvrage.

Les pertes de charge seront néanmoins prises en compte lors de l'interprétation de l'essai de longue durée.

Cet essai a aussi été interprété pour une première estimation de la transmissivité conduisant à une valeur de 1.9 à 2.0 x 10⁻² m²/s, alors que l'essai de trois jours (mars 2009) donne une transmissivité de l'ordre de 5.0 x 10⁻³ m²/s. Cette différence n'est cependant pas expliquée (rapport Antéa 54128/A).

3.6. POMPAGE D'ESSAI DE LONGUE DUREE

L'objectif d'un pompage d'essai de longue durée est de décrire le **fonctionnement hydraulique de l'aquifère** et de mettre en évidence éventuellement des limites hydrauliques qui peuvent être étanches ou des limites d'alimentation. Le paragraphe 3.6.1 esquisse la théorie avant son application à Bourbon-Lancy (cf. paragraphe 3.6.4).

3.6.1. Méthodologie utilisée pour l'interprétation des essais hydrauliques par pompages

L'objectif de cette méthodologie est (cf. illustration 31) :

- de contribuer au schéma conceptuel de l'aquifère,
- de choisir un modèle de calcul le plus approprié à ce schéma,
- de calculer les différents paramètres hydrodynamiques.

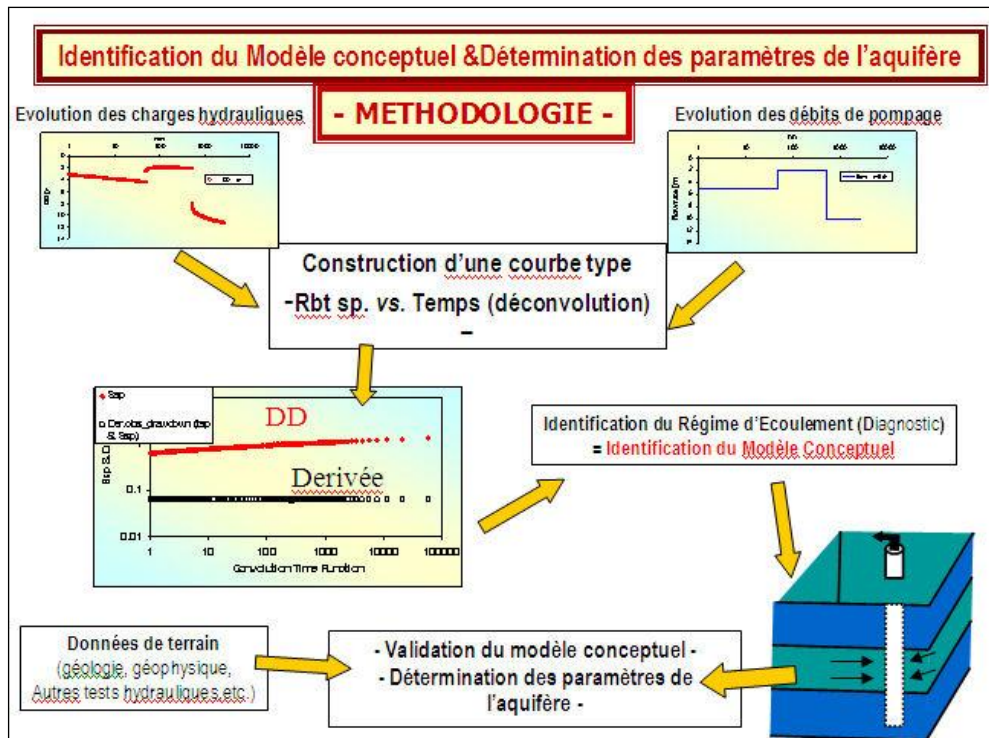


Illustration 31 : Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation des pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer l'essai

Dans les formations fissurées, l'interprétation des essais de pompage est très souvent complexe, conséquence de l'orientation, de la densité et de la perméabilité des fissures, ainsi que des éventuels effets de limites (rivière, absence de connexion des réseaux de fissures, etc.). Aussi, afin de déterminer les différentes composantes d'écoulements associées aux propriétés hydrauliques de tels aquifères, une attention toute particulière doit être portée aux essais de pompage car ils peuvent contenir beaucoup d'informations.

Le diagnostic repose sur l'interprétation de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements ($ds/d\ln t$; à la descente ou à la récupération), qui a l'avantage de représenter tous les régimes d'écoulement sur un seul et même graphique bi-logarithmique (Bourdet et al., 1983, 1989 ; Spane and Wurstner, 1993 etc.). L'avantage de cette méthode est que pour chaque type et/ou géométrie d'aquifère (et type de configuration forage-aquifère), correspond un certain régime (ou une succession de certains régimes d'écoulement) qu'il est en général possible d'identifier sur la courbe de dérivée (Deryck et al., 1992 ; Shlumberger, 2002 ; Renard et al., 2009).

Le calcul de la dérivée nécessite souvent un traitement par lissage afin d'augmenter le rapport signal sur bruit, bruit engendré par des micro-variations du débit et/ou par la sensibilité de l'outil de mesure des niveaux d'eau (sonde manuelle, sonde automatique). Ce traitement n'altère en rien la qualité des données originelles. Par contre, lorsque le débit varie de façon significative durant l'essai, il est nécessaire de prendre en compte ces variations dans le calcul de la dérivée. Le calcul de la dérivée sera donc réalisé à partir des rabattements spécifiques (normalisation par rapport à un débit unitaire) et du temps de superposition (fonction aussi des variations de débits). On obtient ainsi une courbe type de l'essai qui est dérivée et interprétée suivant la méthode précédemment décrite.

Une fois la courbe des dérivées construite, la phase de diagnostic consiste à identifier les différents régimes d'écoulement et d'en déduire les propriétés du forage (effet de capacité, effet de skin, ...), de l'aquifère (isotrope, anisotrope, fracture verticale, double porosité, etc.), de sa géométrie (effets de limites), des éventuelles relations entre l'aquifère capté et les aquifères de sub-surface (effet de drainance par exemple), et éventuellement de mettre en évidence des écoulements fractionnalisés comme par exemple dus à la forte perméabilité d'un drain karstique.

Ces informations viendront compléter les résultats issus d'autres données et méthodes (géologiques, géophysiques...) pour établir un modèle conceptuel du gisement et choisir la représentation mathématique la plus appropriée au cas étudié. Puis, sur cette base, le modèle conceptuel de l'aquifère est validé en jugeant de la pertinence de la modélisation et des informations géologiques disponibles sur la formation testée.

A partir de la courbe des dérivées, il est déjà possible d'estimer les paramètres hydrodynamiques, en particulier la transmissivité et la perméabilité de la formation captée lorsqu'un écoulement radial cylindrique est atteint.

Le logiciel utilisé pour l'interprétation des tests est WinISAPE (logiciel BRGM). WinISAPE propose une dizaine de solutions analytiques pour modéliser les données des pompages d'essai : milieu homogène isotrope, anisotrope, double porosité, fracture verticale, effet de drainance verticale, limites étanches ou alimentées, etc. Par ailleurs, le logiciel prend aussi en compte les effets de puits (capacité de puits, pertes de charges, skin).

3.6.2. Description du pompage d'essai longue durée

Cet essai a été réalisé du 30/11/2010 au 01/03/2011 (cf. illustration 32). Le débit initial de 15 m³/h a été ajusté et réduit vers 9 m³/h pour que le rabattement du niveau d'eau aux sources ne les empêche pas de continuer à couler.

La mesure du niveau d'eau juste avant pompage n'est pas disponible. Après la période initiale, on observe une baisse lente et continue des niveaux marquée par des fluctuations de deux types : les premières sont périodiques et les autres irrégulières (§ 3.4.3 et Illustration 32).

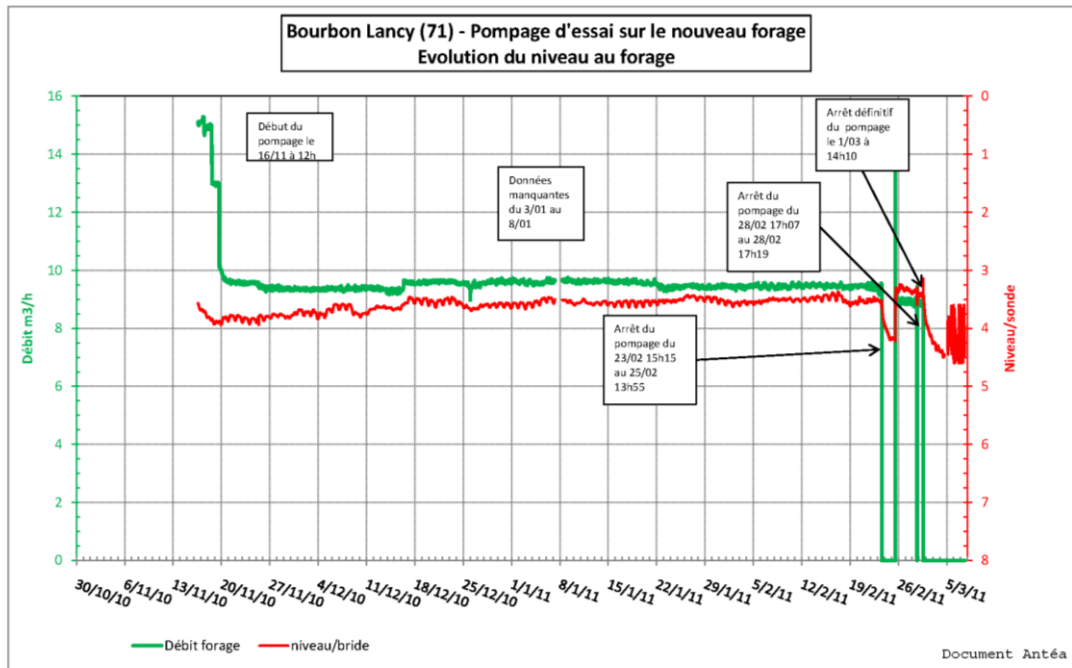


Illustration 32 : Chronique du pompage d'essai de longue durée utilisée

3.6.3. Méthodes d'interprétation retenues

Les résultats du pompage d'essai de Bourbon-Lancy s'avèrent difficilement interprétables par la méthode des dérivées. En effet, la dérivée est assimilable à la pente de la baisse des niveaux et ces pentes sont en permanence perturbées par les fluctuations non périodiques⁶ très proches de la baisse induite par le pompage.

Dans le cas de Bourbon-Lancy, l'interprétation des pompages d'essai fournit des valeurs plus élevées de transmissivité quand l'essai est court. Ceci suggère la présence de deux milieux géologiques différents. Cette hypothèse est retenue pour un des modèles utilisés.

3.6.4. Modélisation

Deux méthodes pour interpréter ce pompage d'essai ont été utilisées. La première est l'interprétation par la méthode classique de Theis. La seconde fait appel à une fonction analytique plus représentative du milieu à Bourbon-Lancy.

La solution de Theis, valable dans un milieu homogène isotrope infini, a été appliquée en prenant en compte les pertes de charges quadratiques et l'effet de capacité de puits. Cet effet se fait sentir uniquement en début de pompage et il

⁶ La régularité des fluctuations périodiques à 12 et 24 h permettent leur correction.

correspond au fait que l'eau pompée provient, en début de pompage, non seulement de l'aquifère mais aussi de la réserve d'eau disponible dans le forage.

La solution « aquifère compartimenté » correspond au schéma suivant (cf. illustration 33) :

- le puits est dans un aquifère compartimenté de transmissivité $T1$ et d'emmagasinement $S1$, de longueur $2L$ et de largeur infinie,
- le forage capte l'aquifère sur toute son épaisseur,
- les limites de cet aquifère sont verticales et recoupent tout l'aquifère.
- au-delà de ces limites, s'étendent à l'infini deux autres aquifères de transmissivité $T2$ et d'emmagasinement $S2$.
- les diffusivités (rapport de la transmissivité sur le coefficient d'emmagasinement) sont égales : $T1/S1 = T2/S2$.

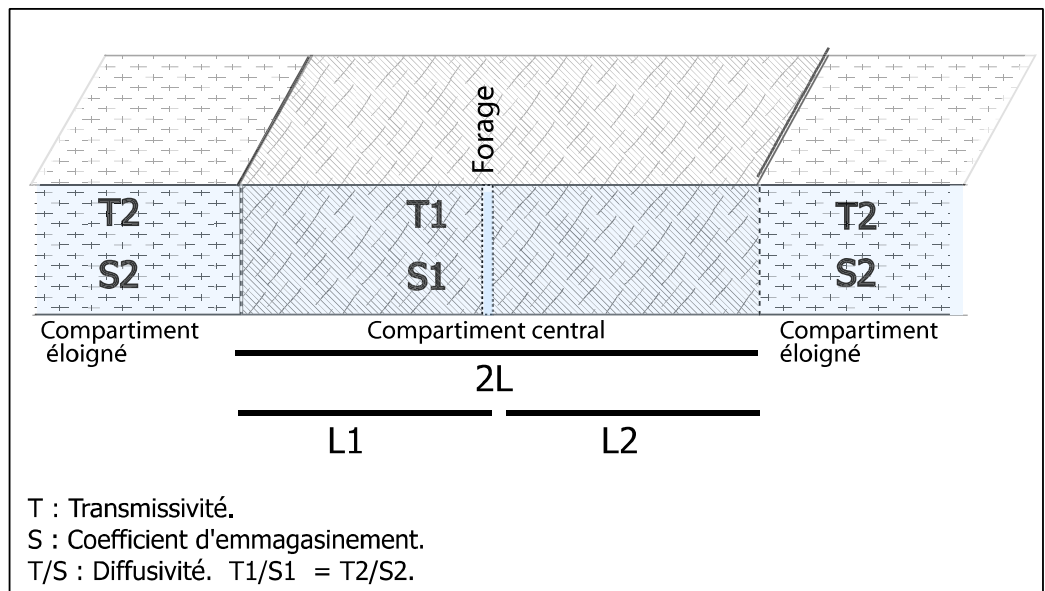


Illustration 33 : Modèle de la solution « aquifère compartimenté »

Ce modèle prend en compte les pertes de charge quadratiques, mais pas l'effet de capacité du puits. Dans le cas de Bourbon-Lancy, cet effet devient rapidement négligeable après une heure de pompage ; cette durée est à comparer avec celle de l'essai (111 jours).

Les données du pompage d'essai sont représentées sur l'illustration 34.

Sur le graphique du haut, sont reportées sur un repère à échelle arithmétique, en fonction du temps, les valeurs suivantes :

- les rabattements dans le puits et les débits de pompage pour les données,
- les rabattements calculés par le modèle de Theis et par la solution « aquifère compartimenté » (Dble Limit),

Sur le graphique du bas, les axes sont logarithmiques. En plus des éléments cités ci-dessus, les résultats de la méthode des dérivées y sont représentés pour :

- le rabattement mesuré,
- le rabattement calculé pour la solution « aquifère compartimenté ».

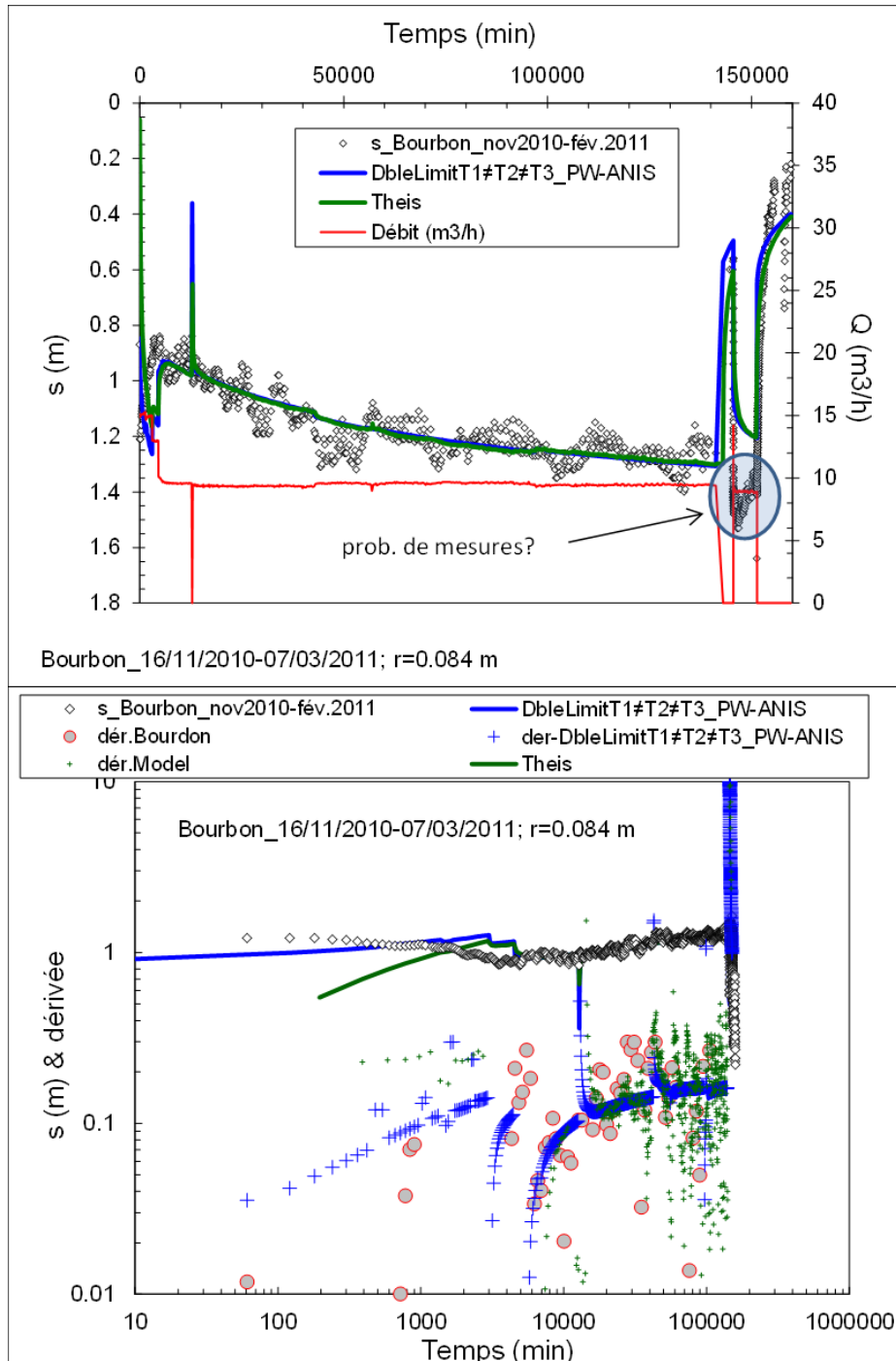


Illustration 34 : Modélisation du pompage d'essai de longue durée (16/11/2010 – 01/03/2011)

3.6.5. Interprétation

L'illustration 34 montre que les modèles "Theis" et "aquifère compartimenté" donnent des calages très similaires.

- **Transmissivité**

Le modèle de Theis estime une **transmissivité globale** de l'aquifère à $1.40 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Elle est concordante avec l'estimation d'Antéa pour des temps longs de pompage. Cependant, ce modèle ne permet pas d'expliquer pourquoi la transmissivité est plus élevée ($1.1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$) lorsqu'elle est calculée sur une période de pompage courte (72 heures : cf. rapport Antéa essai par paliers).

Le modèle « aquifère compartimenté » permet d'expliquer cette différence : durant les premières minutes et heures de l'essai, le pompage sollicite vraisemblablement une zone à transmissivité plus élevée ($1.1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$), environ 10 fois plus transmissive que l'aquifère qui l'entoure ($1.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$). Cette solution apparaît donc la plus adaptée, car elle représente correctement les rabattements en début de pompage et sur le long terme. Au fur et à mesure du pompage, le compartiment éloigné est de plus en plus sollicité. Il est donc normal, et vérifié, que les estimations par Theis et par la solution « aquifère compartimenté » pour l'aquifère éloigné soient alors proches. La solution « aquifère compartimenté » permet d'identifier sur le plan hydraulique la présence d'un milieu plus transmissif autour et à proximité immédiate du forage.

Cette interprétation est confortée par la représentation géologique au niveau du site : le filon de microgranite injecté de quartz et de fluorine traversé par le forage (cf. illustration 8).

La solution Theis ne permet pas d'identifier la différence entre ces deux milieux.

- **Coefficient d'emmagasinement**

Le coefficient d'emmagasinement n'a pas pu être estimé en raison de l'absence de piézomètre d'observation. La connaissance de ce paramètre est indispensable pour calculer la distance entre le forage et ces limites. Elles peuvent cependant être évaluées en temps et elles sont atteintes après 45 mn de pompage environ, donc relativement proches de l'ouvrage.

- **Anisotropie**

Cette zone plus transmissive dans laquelle le puits est implanté peut aussi être caractérisée par une anisotropie de perméabilité, par exemple plus perméable selon l'axe de la zone de forte transmissivité. Celle-ci n'a pas pu être estimée faute de piézomètre d'observation (au moins un autre piézomètre aurait été nécessaire).

• Récapitulatif des résultats

Elément	Unité	Modèle		Commentaire
		Theis	Aquifère compartimenté	
T1	m ² /s	-	1.10E-02	Transmissivité de l'aquifère à proximité du forage
S1	-	7.38E+02*	1.00E-09*	Coefficient d'emmagasinement (valeur de calage)
Dist.L1&L2	mn	-	45.0**	Distance aux limites (en temps) (valeur mesurée lors du pompage)
Dist.L1&L2	m	-	344673.8*	Distance aux limites (en longueur) (valeur de calage)
2*L	m	-	689347.52*	Largeur du compartiment du forage (valeur de calage)
T2	m ² /s	1.40E-03	1.20E-03	Transmissivité de l'aquifère dans les compartiments éloignés
pdc	m ⁻⁵ s ²	3500	3500	Pertes de charge quadratiques
Effet capacité du forage (diamètre)	mm	168	Non	Prise en compte de l'effet de capacité du forage
r	m	0.084	0.084	Rayon du forage

*S au puits et les calculs de distances aux limites sont des valeurs de calage

**La distance de la limite en temps est la valeur mesurée, elle permet de contraindre le calcul

La valeur du coefficient d'emmagasinement (S) ne pouvant pas être calculée, le calage a été optimisé sans respect particulier d'une valeur plausible de S.

Le calage du modèle en dérivé soufre, dans le cas particulier de Bourbon-Lancy, du bruitage des données par les fluctuations relativement proches des valeurs de rabattement.

Bien que ceci conduise à des valeurs de dérivées erratiques, le calage est considéré comme correct pour des temps longs, d'autant plus que les moyennes sont respectées, ne présentant ni sous-estimation, ni sur-estimation.

3.6.6. Conclusion

Le fonctionnement hydraulique complexe capté par le forage est mieux caractérisé par les résultats obtenus à l'aide de la solution « aquifère compartimenté ». Cette solution a permis :

- de prendre en considération la complexité géologique du gisement, par une représentation d'une zone faillée entre deux compartiments, en accord avec la description géologique (cf. illustration 8),
- d'avoir accès à plus d'informations concernant les propriétés hydrodynamiques du gisement, telles que les valeurs de transmissivité pour chaque compartiment. La caractérisation de l'anisotropie aurait été aussi possible avec cette solution, mais elle n'a pas pu être exploitée à Bourbon-Lancy car elle exige des mesures de niveaux d'eau dans un ouvrage indépendant (piézomètre) séparé du forage.

Ces informations :

- apportent les premiers éléments de base, nécessaires à une représentation hydraulique de l'aquifère. Elles constituent un préalable à une modélisation numérique du gisement pour le calcul, en fonction des conditions d'exploitation, de l'évolution des flux dans l'aquifère, le forage et les sources, et de l'évolution de la minéralisation.
- contribuent à une meilleure fiabilité des prédictions (niveau, qualité de l'eau) en fonction de l'exploitation.

3.7. APPORT DU SITE « TEST » ETUDIE A LA REFLEXION GLOBALE

L'étude du site « test » de Bourbon-Lancy permet d'illustrer l'apport de l'analyse de chroniques de données issues de pompage d'essai à l'aide d'outils de traitement du signal et de modélisation d'essai, selon de nouvelles méthodes d'interprétation hydrogéologique.

Ces nouvelles techniques permettent de mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique d'un site. Cette meilleure compréhension d'un système hydrothermal est une condition indispensable à une meilleure appréciation des actions à engager pour assurer une exploitation durable de la ressource et une préservation de la qualité des eaux exploitées.

Le traitement du signal permet de qualifier des signaux parasites et de s'en dédouaner, ou de comprendre certaines réactions particulières assez « non conformes » par rapport à des courbes théoriques. On peut ainsi mieux contraindre la donnée disponible pour ne travailler que sur des signaux représentatifs des phénomènes que l'on cherche à comprendre.

La modélisation des données d'essai par pompage par la méthode des dérivées permet, quant à elle, de caler le site étudié sur un modèle de comportement repère (multi-compartiment et pluri-paramétrique) et ainsi de faire une représentation conceptuelle du système hydrogéologique complexe étudié. On peut ainsi émettre des hypothèses déjà consolidées du fonctionnement hydrogéologique d'un site et concevoir des scénarios d'action à engager dans de nouvelles investigations (à vocations théorique ou opérationnelle).

4. Conclusion

L'étude du site « test » de Bourbon-Lancy, réalisée dans le cadre du programme PRESCRIRE, a permis de noter les différentes composantes qui caractérisent la préservation de la qualité des eaux minérales de Bourbon-Lancy et la protection du gisement.

Il ressort de l'analyse du site de Bourbon-Lancy les points essentiels suivants :

- le secteur amont du circuit hydrominéral (secteur de l'impluvium) est, selon les limites définies, relativement bien protégé en l'absence d'activité anthropique. La délimitation de l'impluvium reste cependant potentiellement à confirmer ;
- la connaissance du mode de fonctionnement hydrogéologique du secteur des émergences est perfectible au regard d'un contexte géologique local complexe, matérialisé par une circulation associée à un filon dont l'extension latérale n'est pas connue avec précision ;
- le secteur des émergences est tout particulièrement sensible en terme de préservation de la qualité des eaux thermales exhaurées, dans la mesure où les interférences entre ouvrages nécessitent de prévenir tout risque d'intrusion d'eau superficielle vers les sources artésiennes exploitées, pour le cas où la pression du gisement serait diminuée.

Au vu de ces éléments et compte tenu de la mise à disposition par le site de Bourbon-Lancy de données d'essais de pompage, le programme PRESCRIRE a été orienté sur l'apport du traitement du signal et de la modélisation des données d'essai pour qualifier un modèle de fonctionnement hydrogéologique spécifique du secteur des émergences.

Il apparaît que l'apport du traitement du signal et de la modélisation des données d'essai complète de manière significative la compréhension du contexte hydrogéologique local du secteur des émergences. La solution « aquifère compartimenté » a permis de prendre en considération la complexité géologique du gisement, par une représentation d'une zone faillée entre deux compartiments, en accord avec la description géologique du site, et d'avoir accès à plus d'informations concernant les propriétés hydrodynamiques du gisement, telles que les valeurs de transmissivité pour chaque compartiment.

L'analyse réalisée est à relativiser en terme d'importance dans la mesure où seuls des essais à plus forts débits (ce qui est difficilement envisageable compte tenu des interférences avec les sources autorisées exploitées) et l'utilisation d'un piézomètre de suivi complémentaire, permettraient de caler avec une sécurité plus affirmée le système hydrogéologique local, et de renforcer de manière plus conséquente la compréhension du système.

Annexe 1

Eléments de bibliographie

Antéa (2011) - Centre hospitalier de Bourbon-Lancy (71). Pompage de qualification du nouveau forage géothermique. Rapport de fin de pompage. 62304 Version A.

Antéa (2009) - Bourbon-Lancy (71). Réalisation d'un forage de reconnaissance géothermique dans le parc thermal. Rapport de fin de travaux. 54128/A.

Bourdet D., Ayoud J.A. and Prirard Y.M. (1989) - Use of pressure derivative in well-test interpretation. SPE, 293-302.

Bourdet D., Whittle T.M., Dougals, A.A., Pirard V.M. (1983) - A new set of type curves simplifies well test analysis, World Oil.

BRGM (2007) - Avis sur le projet de forage géothermique du centre hospitalier de Bourbon-Lancy (71). Rapport BRGM RP-55344-FR.

BRGM (1988) - Etude des ressources en eau thermo-minérales de la Bourgogne, en bordure Ouest du Morvan - Gisement de Bourbon-Lancy (71) - Contexte géologique et structural, caractérisation hydrochimique, état des conditions de captage. Rapport BRGM 88SGN099BOU.

Cooper H.H. and Jacob C.E. (1946) - A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. Am. Geoph. Union Trans. 27, 526-534.

Deruyck B., Ehlig-Economides C. and Joseph J. (1992) - Testing design and analysis. Oilfield and analysis. 28-45.

Hantush, M.S. (1961) - Aquifer tests on partially penetrating wells. Proc. of the Am. Soc. of Civil Engineers, 87, 171-195.

Renard Ph., Glenz D. and M. Mejias (2009) - Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. Hydrogeology Journal. 17: 589-600.

Rivages Pro Tech (2011) - Profil de la zone de baignade - Plan d'eau du Breuil. 102 p.

Safege (2010) - Etude hydraulique du Borne dans sa traversée de Bourbon-Lancy. Rapport final. N° 10CLE017. 36 p.

Schlumberger (2002) - Well test interpretation. Schlumberger Edit., 122 p.

Spane F.A. and Wurstner S.K. (1993) - DERIV : a computer program for calculating pressures derivatives for use in hydraulic test analysis.

Theis, C.V. (1935) - The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Trans. Am. Geoph. Union, 16, 519-524.

Annexe 2

Comparaison des analyses chimiques des sources et du forage géothermique

(Extrait du rapport Antéa 62304)

Centre hospitalier de Bourbon Lancy (71). Pompage de qualification sur forage géothermique – Rapport n°62304/A

Forage géothermique - Pompage de qualification de l'hiver 2010-2011. Comparaison de la qualité de l'eau du forage avec les analyses de référence des sources

Famille de paramètre	MINERALISATION										OLIGO-ELEMENTS ET MICROPOLLUANTS M.										
	Calcium	Chlorures	Magnésium	Potassium	Silicates (en mg/L de SiO2)	Sodium	Sulfates	Aluminium total µg/l	Antimoine	Arsenic	Baryum	Béryllium mg/L	Bore mg/L	Bromures mg/L	Cadmium	Chrome total	Cuivre	Cyanures totaux	Fluorures mg/L	Iodures mg/L	Lithium
Paramètre	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/l	µg/l	µg/l	mg/L	µg/l	mg/L	mg/L	µg/l	µg/l	mg/L	µg/l	mg/L	mg/L	mg/L
Unité	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Valeurs référence Lymbe	69	430	70.3	755	2.58	36.2	69.4	517	91.4	91.4	517	91.4	517	91.4	517	91.4	517	91.4	517	91.4	517
Valeurs référence Platot			68.0	755	2.51	35.6		510	92.3	92.3	510	92.3	510	92.3	510	92.3	510	92.3	510	92.3	510
Valeurs référence Sévigné	113	414	69.4	757	2.63	36.0	70.2	512	88.9	88.9	512	88.9	512	88.9	512	88.9	512	88.9	512	88.9	512
Valeurs référence Marquise			71.4	756	1.57	36.4		507	86.9	86.9	507	86.9	507	86.9	507	86.9	507	86.9	507	86.9	507
05/03/2009	359	402	73.9	778	2.47	37.7	61.7	511	81.2	81.2	511	81.2	511	81.2	511	81.2	511	81.2	511	81.2	511
18/11/2010			77.0	790	3.00	38.0		484	86	86	484	86	484	86	484	86	484	86	484	86	484
10/12/2010			72.3	808	2.70	37.8		493	85.6	85.6	493	85.6	493	85.6	493	85.6	493	85.6	493	85.6	493
20/12/2010	81	431				71.1					238		2.01						5.87		5.01
16/02/2011	85	431	69.6	754	2.66	35.6	67.7	486	77.6	77.6	486	77.6	1.95					5.35		4.91	
03/03/2011	88	431	73.5	738	2.80	37.0	49.7	527	79.3	79.3	527	79.3	<2	2.08	3.8	1.4	<2	<0,005	<10	5.62	<0,5
21/03/2011	91	437	73.5	761	2.71	37.7	70.8	502	78.6	78.6	502	78.6	1.52					5.33		5.40	
valeur mini	81	402	69.6	738	2.47	35.6	49.7	484	77.6	77.6	484	77.6	1.52					5.26		4.91	
valeur maxi	359	437	77.0	808	3.00	38.0	71.1	527	86.0	86.0	527	86.0	2.08					5.87		5.40	
moyenne	141	426	73.3	771	2.72	37.3	64.2	501	81.4	81.4	501	81.4	1.89					5.49		5.14	

Centre hospitalier de Bourbon Lancy (71). Pompage de qualification sur 1 forage géothermique – Rapport n°62304/A

Forage géothermique - P_c Forage géothermique - Pompage de qualification de l'hiver 2010-2011. Comparaison de la qualité de l'eau du forage avec les analyses de référence des sources

Famille de paramètre	OLIGO-ELEMENTS ET MICROPOLLUANTS M.							PARAMETRES AZOTES ET PHOSPHORES					PARAMETRES LIES A LA RADIOACTIVITE											
	Mercur	Nickel	Plomb	Sélénium	Strontium	Sulfures	Zinc	Ammonium (en NH4)	Nitrates (en NO3)	Nitrites (en NO2)	Orthophosphates (en PO4)	Phosphore total (en P2O5)	Activité alpha globale en Bq/L	Activité bêta globale en Bq/L	Activité Tritium (3H)	Dose totale indicative	Activité Plomb-210	Activité Polonium-210	Activité Radium-226	Activité Radium-228	Dosage Uranium isotopique 234	Dosage Uranium isotopique 235	Dosage Uranium isotopique 238	
Paramètre	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	Bq/L	Bq/L	Bq/L	Bq/L	Bq/L	Bq/L	Bq/L	Bq/L	Bq/L	Bq/L	Bq/L	Bq/L	Bq/L
Unité																								
Valeurs référence Lymbé	<0,20	<2	<5	<5	1028		<0,010	0.13	<0,02	<0,10		1,03	2,26	<11										
Valeurs référence Piatot																								
Valeurs référence Sévigné	<0,20	<2	<5	<5	1021		<0,010	0.20	<0,02	<0,10		0,92	3,20	<9,0							<0,0040	0,390	0,96	0,0022
Valeurs référence Marquise																								
05/03/2009							0.176	<0,01	<2,0	<0,02	<0,02													
18/11/2010									<1															
10/12/2010								0.24	<2,0	<0,02														
20/12/2010					989																			
16/02/2011					966			0.24	<2,0	<0,02														
03/03/2011	<0,20	<2	<5	<5	1020	<0,5	<0,010	0.25	<2,0	<0,02	<0,15	0.52	1.45	<8,2	0.14	<0,039	0.001	0.386	0.12		0.012	<0,003	0.011	
21/03/2011					1039			0.26	<2,0	<0,02														

valeur mini								0.24	<2,0	<0,02														
valeur maxi					1039	<0,5		0.26	<2,0	<0,02														
moyenne					1006	<0,5		0.25	<2,0	<0,02														



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

Service Géologique Régional Auvergne
Campus des Cézeaux
12, avenue des Landais
63170 Aubière - France
Tél. : 04 73 15 23 00